

КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

XXI Международная
научно-техническая конференция
5-7 октября 2016 год

**КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ
ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Тезисы докладов

Обнинск
2017

Тезисы докладов публикуются в оригиналах,
представленных авторами

Оргкомитет не несет ответственности
за содержание этих материалов

Секретарь конференции

И. Ю. Келина

*Под общей редакцией канд. техн. наук, акад. РИА,
члена SAMPE О. Н. Комиссара*

Редакционная коллегия:

М. Ю. Русин, докт. техн. наук, профессор;

Г. С. Шуль, канд. техн. наук;

В. И. Самсонов, канд. техн. наук;

О. В. Коваль, канд. эконом. наук;

Г. И. Куликова, канд. техн. наук;

А. М. Каплунова, канд. хим. наук;

Л. А. Климакова,

А. В. Соколова

Е. С. Петракова

Сборник подготовили:

И. Ю. Келина, канд. техн. наук

Н. И. Ершова, канд. техн. наук

И. В. Огнева

Л. К. Ващенко

Дизайн, верстка:

Е. Н. Петяева, Ю. А. Завьялов

© 249031, г. Обнинск Калужской обл., Киевское шоссе, 15
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» ГНЦ РФ

**Департамент авиационной промышленности
Минпромторг РФ**



ПАО «Корпорация «Иркут»



АО «РТ-Химкомпозит»



АГНЦ «Наука»



Российская инженерная академия



**Международное общество прогрессивных
материалов и технологий, Россия-СНГ (SAMPE)**



Международная инженерная академия



**АО «ОНПП «Технология»
им. А. Г. Ромашина» ГНЦ РФ**



ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- О. Ф. Демченко** – президент ПАО «Корпорация «Иркут»
- С. В. Емельянов** – директор Департамента авиационной промышленности Минпромторга РФ
- А. В. Дутов** – генеральный директор ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н.Е. Жуковского»
- С. Л. Чернышев** – генеральный директор ФГУП «ЦАГИ» ГНЦ РФ, докт. физ.-мат. наук, член-корр. РАН
- К. Ю. Шубский** – генеральный директор АО «РТ-Химкомпозит»
- А. Н. Силкин** – генеральный директор АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» ГНЦ РФ
- А. А. Александров** – ректор МГТУ им. Н. Э. Баумана, докт. техн. наук, профессор
- А. Х. Гильмутдинов** – ректор КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева, докт. техн. наук, профессор
- И. В. Горская** – генеральный директор АГНЦ «Наука»
- В. С. Боголюбов** – директор ОНЦ «Композит», докт. техн. наук, профессор, академик РИА и МИА, член SAMPE
- К. А. Солнцев** – директор института Металлургии и Материаловедения им. А.А.Байкова, докт. хим. наук, академик РАН
- Б. Л. Красный** – генеральный директор ЗАО «НТЦ «Бакор», докт. техн. наук, академик РИА
- А. В. Гапонюк** – директор по международной кооперации в Европе и России компании «Airbus SAS»
- Р. Серре** – глава представительства «Fives», Франция
- Ф. Дюмель** – директор завода ООО «Порше Современные материалы», Франция
- С. Лёба** – президент «STEVIK SAS», Франция
- В. Руппель** – генеральный директор «STEVIK SAS», Франция
- Б. Самакоски** – президент компании «Mikrosam A.D.», Македония
- А. А. Сотников** – генеральный директор АО «Агентство инновационного развития – центр кластерного развития Калужской области», канд. техн. наук, доцент
- С. И. Бредихин** – заместитель директора ИФГТ РАН, докт. физ.-мат. наук
- В. Н. Сигаев** – руководитель международной лаборатории функциональных материалов на основе стекла им. П.Д. Саркисова РХТУ им. Д.И. Менделеева, докт. хим. наук, профессор



Ромашин Александр Гаврилович

Основатель и генеральный директор ОНПО «Технология». Почетный гражданин г. Обнинска, д.т.н., профессор, академик Российской и Международной инженерных академий и Мировой академии керамики. Лауреат Ленинской и Государственных премий. Заслуженный деятель науки и техники СССР. Почетный авиастроитель.

Научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» отсчитывает свою историю с 1967 года. За это время значительно расширилась география участников, конференция вышла на международный уровень. А. Г. Ромашин был инициатором её проведения, принимал активное участие в работе – сначала как молодой ученый, затем как руководитель крупного предприятия.

Основополагающим принципом эффективной научно-производственной деятельности в области создания конструкционных материалов А. Г. Ромашин всегда считал неразрывную связь материала, конструкции и технологии изготовления. Этот подход отражен и в тематике конференции. Александр Гаврилович всегда старался создать условия для преемственности поколений, сохранения сложившихся за долгие годы традиций. Благодаря его активной поддержке научной деятельности и личным заслугам в России появилась новая форма научных организаций – Государственные научные центры. Одними из первых высокой статус ГНЦ РФ получили ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, ВИАМ, ЦИАМ им. П. И. Баранова, ОНПП «Технология» и др.



ОН – С НАМИ

ОНПП «Технология» носит имя первого генерального директора Александра Гавриловича Ромашина. Хорошо бы, чтобы такие люди жили всегда. Природа обязана делать исключения для таких людей. Может, поэтому такие люди не умирают. Они ушли, но они с нами.

Александра Гавриловича – почетного гражданина Обнинска – знает весь город. Не потому, что академик, доктор технических наук, профессор, Лауреат Ленинской премии, премии Совета Министров СССР, двух премий российского правительства в области науки и техники и обладатель других весомых титулов. От него никогда было не услышать про эти звания и награды. А потому, что он всю свою жизнь (не побоимся пафосного слова) бескорыстно служил своему предприятию, и не будь такого руководителя, неизвестно, какой урон понесли бы и сотрудники «Технологии», и жители Обнинска.

Международную известность принесло городу самое перспективное его предприятие, нацеленное на создание продукции для авиакосмической и ракетной техники. Но, возможно, сегодня не пришлось бы об этом даже говорить, если бы его поглотила или растащила по разным квартирам беспорядочная перестройка. Про тот экономический ураган, разворотивший мощные стратегические гиганты страны, много сказано. Можно было бы написать не менее захватывающий сценарий и про «Технологию», когда ветер перемен нес ее к пропасти. Но... Само время востребовало такого человека, который не просто остановил падение уже сложившегося научно-производственного комплекса, но помог ему подняться и приобрести бойцовскую форму, что дало силы двигаться к цели. Сначала робко, а потом все настойчивее и быстрее. В этом и кроется талант Ромашина. Хотя в те отчаянные 1990-е годы ошалевшие от вольности пустословы пренебрежительно называли Александра Гавриловича державником и «красным» директором.

Ромашину было не до тех дешевых укулов. Помимо руководства своим предприятием он, как председатель городского Совета директоров, занимался еще спасением жизнедеятельности Обнинска. Только вспомнить... Монополисты самовольно установили грабительские тарифы. Отключали свет, тепло, воду, газ. Хаос. Ромашин смог прекратить этот беспредел. Во главе с ним Совет директоров внес определенные коррективы в нормы поведения фирм-монополистов, что позволило отрегулировать цены на коммунальные услуги.

Но все свое время, внимание и заботы Александр Гаврилович отдавал «Технологии». Была у него «Белая книга», где он подробно записывал все события, предложения сотрудников, интересные проекты, собрания, совещания, выступления и замечания. Почему книга называется «белой»? Потому что в ней все видно, все прозрачно. Если пролистать ее, то вот они, сегодня, как на ладони, все этапы становления, развития, падения и роста «Технологии».

В 1959 году, когда на болоте возле Обнинска забивали первые сваи под будущий корпус стекольного завода, никто и подумать не мог, каких высот достигнет предприятие. Также не представлял – какой ценой. Сколько придется пережить тяжелых лет... Какое глубокое уныние поселится в цехах, когда объявят курс на всеобщую конверсию. «Технологии» предлагали перейти на выпуск любой стекольной тары, вплоть до майонезных баночек. И опять нужно было быть именно такому руководителю, как Ромашин, который не дал предприятию скатиться на унижительный ширпотреб. Он нашел выход — выпустить, как и требовали «сверху», товары народного потребления, но не какие попало. А из перспективных материалов - термостойкого стекла и углепластика. Эта работа позволила почти полностью сохранить производственный потенциал предприятия и «подняться с колен», когда стала возрождаться отечественная промышленность.

Еще одним дальновидным шагом стало решение Александра Гавриловича о продвижении предприятия как научного центра. Высокий статус государственного научного центра Российской Федерации, полученный «Технологией» в 1994 году, дал ей большие преференции в виде целевого финансирования и налоговых льгот.

Ставка на новые материалы и современные технологии дала «Технологии» возможность принять участие в крупнейших национальных проектах: создании космического корабля «Буран», истребителя Су-47 с крылом обратной стреловидности, зенитно-ракетных комплексов С-300 и С-400 и многих других. А в начале 2000-х годов вывела и на международную орбиту. Сегодня весь образованный мир знает о крупнейшем в мире ускорителе частиц - Большом адронном коллайдере. А когда еще только планировалось его создание, был объявлен конкурс на разработку и серийное производство отдельных деталей и узлов, в частности, на изготовление размеростабильной опорной конструкции. Заявки подали 12 предприятий из разных стран, а контракт заключили с «Технологией» - надежным партнером с безупречной репутацией.

Сегодня ОНПП «Технология» считается одним из ведущих предприятий в области создания продукции для авиационной, ракетно-космической техники, транспорта и вооружения. Сотрудники предприятия относят такую высокую оценку «Технологии» за счет заслуг Александра Гавриловича. Они по сей день считают его своим гуру. И этот факт (такой вот парадокс) соединяет поколения, но рвет между ними порочную практику. Как обычно бывало? Ушел руководитель, и о нем в лучшем случае забыли, в худшем – списывают все грехи. Здесь по-другому. Здесь не только с огромным пиететом относятся к Ромашину. Здесь говорят: «Он ушел, но он с нами».

Память о выдающемся руководителе и незаурядном человеке живет не только в названии предприятия, им основанного, но и в памяти людей, которым посчастливилось работать с Александром Гавриловичем, и которые передают опыт новым поколениям ученых, инженеров и специалистов.

Нонна ЧЕРНЫХ,
журналист, писатель

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время основой поступательного развития служат кооперация, постоянный обмен опытом и своевременное отслеживание мировых тенденций. Инструментом подобной консолидации и служит проводимая конференция, дающая возможность российским и зарубежным ученым всесторонне обсудить современные направления развития науки и технологий создания изделий для авиационной, ракетно-космической техники, транспорта и вооружения. Востребованность подобной дискуссионной площадки подтверждается тем фактом, что в этом году мероприятие проходило при поддержке Международного общества прогрессивных материалов и технологий SAMPE.

XXI научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» традиционно проходила в Обнинске, первом наукограде России, на базе Государственного научного центра Российской Федерации АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина». ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина - один из ведущих центров компетенций страны в области создания наукоемкой, высокотехнологичной продукции из неметаллических материалов почти пятьдесят лет проводит научно-технические конференции по основным направлениям деятельности предприятия.

Тематика конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» традиционно посвящена достижениям и проблемам в области создания изделий из полимерных композиционных, керамических и стеклообразных материалов, включая материаловедческие, прикладные технологические исследования, конструкторские разработки, испытания материалов и изделий на их основе, а также вопросы создания опытно-экспериментального и серийного производства уникальной наукоемкой продукции.

В настоящее время основой поступательного развития служат кооперация, постоянный обмен опытом и своевременное отслеживание мировых тенденций. Инструментом подобной консолидации и служит проводимая конференция, дающая возможность российским и зарубежным ученым всесторонне обсудить современные направления развития науки и технологий создания изделий для авиационной, ракетно-космической техники, транспорта и вооружения. Востребованность подобной дискуссионной площадки подтверждается тем фактом, что в этом году мероприятие проходило при поддержке Международного общества прогрессивных материалов и технологий SAMPE.

С приветственным словом к участникам обратились директор департамента авиационной промышленности Минпромторга России С. В. Емельянов, министр экономического развития Калужской области Д.О. Разумовский, заместитель генерального директора ФГБУ «НИЦ «Институт им. Н. Е. Жуковского» М. В. Гордин, генеральный директор ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» А. Н. Силкин, глава Администрации г. Обнинска В. В. Шапша.

На пленарном заседании были представлены результаты разработок в сфере неметаллических материалов в рамках реализации проекта создания российского пассажирского самолета МС-21, а также обсуждены новые тенденции в прорывных тех-

нологиях. Докладчиками из ведущих отечественных центров компетенций озвучены результаты и анализ перспектив применения композиционных, стеклообразных и керамических материалов в авиастроении.

В рамках конференции работали секции: «Полимерные композиционные материалы и конструкции», «Керамика специального назначения, стекло и оптические покрытия» и «Управление инновационными процессами», а также состоялось заседание круглого стола «Молодежный взгляд на развитие науки в научных учреждениях», организованное Советом молодых ученых и специалистов АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина». Круглый стол позволил молодежи обсудить проблемы постановки актуальных научных задач и коммерциализации результатов исследований, поиск источников финансирования научных исследований в современных условиях, а также вопросы привлечения молодежи в научную сферу.

Впервые в день открытия конференции была организована профильная выставка, на которой предприятия – участники и организации Обнинска демонстрировали свои достижения в области создания продукции из композитных материалов, презентовали новые технологии, а также рекламировали свою деятельность. Была представлена продукция АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева (г. Казань), МГТУ им. Н. Э. Баумана, АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», АНО «Обнинский Бизнес Инкубатор», ООО НПО «Полет» (г. Обнинск).

В области создания полимеркомпозитных (ПКМ) конструкций широко освещены такие перспективные проектно-конструкторские, материаловедческие и технологические аспекты, как: внедрение термопластичных углеволоконных материалов; совершенствование свойств ПКМ, в том числе путем модификации связующих и методов их переработки; разработка неметаллических наполнителей для многослойных конструкций, в том числе сотовых и стержневых ферменного типа; создание 3D армированных преформ и армирующих каркасов; широкомасштабное внедрение автоматизированных методов изготовления конструкций из ПКМ; использование методов численного моделирования как инструмента выбора оптимальных технологических параметров; использование аддитивных технологий и развитие неавтоклавных методов переработки композиционных материалов.

Керамика специального назначения представлена разработками тугоплавких и жаростойких керамических материалов на основе карбида и нитрида кремния, карбида бора, оксида алюминия, нитрида алюминия, диоксида циркония, предназначенных для экстремальных условий эксплуатации. Особый интерес вызывают результаты научных исследований в области создания сверхвысокотемпературных керамических материалов из диборидов гафния и циркония, оптически и ИК-прозрачной керамики из алюмомагниевого шпинели, а также теплоизоляционных неорганических материалов со сверхнизкой теплопроводностью.

По тематике «Стекло и оптические покрытия» представлена инновационная разработка моно- и гетерогенного остекления самолетов и вертолетов на основе монолитного поликарбоната, позволяющая улучшить летно-технические характеристики авиационной техники и повысить эксплуатационную надежность авиатехники.

На заседании секции «Управление инновационными процессами» были рассмотрены механизмы совершенствования управления инновационными процессами, аспекты управления интеллектуальной собственностью, вопросы «Бережливого про-

изводства». В области информационных технологий обсуждался опыт практического внедрения в научно-производственную деятельность предприятия систем управления жизненным циклом изделия (PLM систем). Особое внимание было уделено новому направлению работы секции - кластерной политике, как наиболее эффективному инструменту инновационного развития и на уровне отдельно взятой компании, и на уровне региона и страны в целом.

В работе конференции приняли участие более 300 делегатов из 60 ведущих предприятий и институтов России и зарубежья. В числе участников – ОАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королева», ФГУП «ВИАМ», ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», ОАО «Композит», МГУ им. М. В. Ломоносова, КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, РХТУ им. Д. И. Менделеева, «БФУ им. И. Канта», АО «ЦНИИСМ» и др., а также представители фирм «Mikrosam A.D.» (Македония), «Fives» (Франция), «STEVİK SAS» (Франция), «Aramicore Composite Co., Ltd.» (Китай) и др.

В издание вошли тексты пленарных докладов и тезисы 147 докладов, представленных на XXI Международной научно-технической конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», которая проходила с 5 по 7 октября 2016 года в городе Обнинске Калужской области.

**Приветственные обращения на открытии
XXI Международной научно-технической конференции
«Конструкции и технологии получения изделий
из неметаллических материалов»**

5 октября 2016 г., Обнинск, Дом ученых



Генеральный директор
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина»
А. Н. Силкин



Директор Департамента авиационной
промышленности Минпромторга РФ
С. В. Емельянов



Министр экономического развития
Калужской области
Д. О. Разумовский



Заместитель генерального директора
ФГБУ «НИЦ «Институт им. Н.Е. Жуковского»
М. В. Гордин



Глава Администрации г. Обнинска
В. В. Шапша

Уважаемые коллеги!

Международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» в 2016 году проводится в Обнинске в двадцать первый раз и демонстрирует рекордное количество участников: 300 представителей из 34 городов мира. Это разработчики авиационной и ракетно-космической техники, производители материалов и оборудования, институты Российской академии наук и государственные научные центры, высшие учебные заведения Российской Федерации.

В течение трех дней участники рассмотрят 150 научных докладов в области разработок и применения полимерных композиционных материалов, керамики, стекла. Отдельная секция будет посвящена теме инновационного развития. Свой взгляд на развитие науки представит молодежь. На круглом столе с участием молодых ученых и специалистов будет затронута проблематика деятельности государственных научных центров в кризисные периоды, необходимости государственных заказов.

Интересная программа, интересные встречи, интересные участники – все это в очередной раз подтверждает востребованность дискуссионной площадки. Организованная нами конференция позволит обменяться опытом, обсудить мировые тенденции, в итоге, получить знания, которые являются основой развития любого современного производства.

**Генеральный директор
ОНПП «Технология»
им. А. Г. Ромашина
*А. Н. Силкин***

Уважаемые участники конференции и её гости!

Я рад приветствовать вас на знаковом для нашей авиации мероприятии. Конференция, позволяющая подвести определенные итоги в области отечественного гражданского авиастроения и наметить перспективы его развития, не случайно проходит в первом наукограде России. «Здесь воплощаются мечты» - написано на въезде в Обнинск. Это справедливо и объективно. Поскольку с самого рождения город участвует в важнейших для страны прорывных проектах. Касается это космонавтики, ядерной энергетики, или, как сейчас, авиации, без труда обнинских ученых и производственников, успех, похоже, уже немислим. Именно сплав науки и производства является сутью и организатора конференции – научно-производственного предприятия «Технология» имени Александра Гавриловича Ромашина.

Для отрасли создание семейства самолета МС-21, который включил в себя последние мировые достижения в области самолето- и двигателестроения, стало прорывным проектом. После долгого перерыва встаёт на крыло наш – именно Российский – авиалайнер. Самолёт, который невозможно представить без колоссальной кооперации по его созданию. Инновационные материалы, уникальные технологии, новые межотраслевые и межкорпоративные связи – всем этим мы обязаны МС-21-му, ставшему настоящим локомотивом возрождающегося отечественного авиастроения.

Полученный в рамках этой работы опыт необходимо использовать как можно шире. Авиационная промышленность, как средоточие всего самого передового, должна максимально эффективно задействовать весь научный и производственный потенциал, чтобы обеспечить экономическую независимость отрасли, её опережающее развитие и конкурентоспособность на международном рынке.

Но вышеперечисленное не является синонимом «изоляции». Наша политика в области авиационной промышленности направлена на развитие потенциала международного сотрудничества. Без тесной международной кооперации немисливо развитие авиации. Понимание этого есть. И состав участников подтверждает это.

Сегодня в этом зале собрались творцы. Те, благодаря кому Россия была и остается высокотехнологичной державой, способной создавать продукцию, опережающую не только существующие аналоги, но, нередко, само время. Перед нами стоят грандиозные задачи и от того, сумеем ли мы развить полученный в последние годы опыт, зависит очень многое. Желаю всем плодотворной работы, дальнейших успехов на пути развития науки, свершения творческих планов и надежд!

Директор Департамента авиационной промышленности Минпромторга РФ

С. В. Емельянов

Уважаемые коллеги!

От имени Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов приветствую организаторов, участников и гостей XXI Международной научно-технической конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов»!

Конференция является значимым мероприятием, призванным стать площадкой для дискуссий и обмена мнениями между российскими и зарубежными учёными, инженерами и специалистами. Участники имеют уникальную возможность рассказать о результатах фундаментальных исследований и последних разработках, обсудить современные тенденции в области создания изделий из неметаллических материалов для различных областей промышленности.

Уверен, что конференция будет способствовать выработке эффективных механизмов, необходимых для инновационного развития в сфере производства неметаллических материалов, налаживания перспективных связей между ведущими промышленными предприятиями и научными организациями, решения приоритетных задач в области реализации масштабных инженерных проектов.

Желаю организаторам, участникам и гостям конференции продуктивной живой дискуссии и новых достижений!

**Генеральный директор
ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ,
док. техн. наук, профессор,
академик РАН**

Е. Н. Каблов

Уважаемые участники конференции!

Международная научно-техническая конференция по конструкциям и технологиям получения изделий из неметаллических материалов, проходящая в г.Обнинске на базе хорошо известного не только в России, но и за рубежом Государственного научного центра РФ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», традиционно вызывает большой интерес в научных и инженерных кругах благодаря высокому уровню представляемых научных результатов, их практической применимости и открытой теплой атмосфере мероприятия.

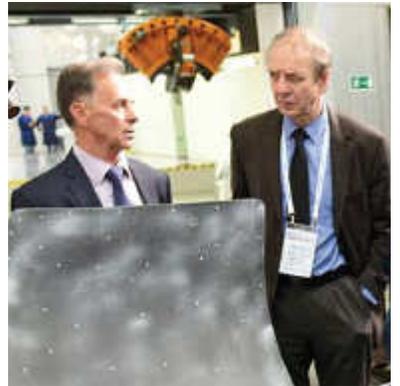
За несколько десятилетий конференция из небольшого научного семинара постепенно и уверенно выросла в крупное мероприятие международного уровня. И этот год стал особенным, так как XXI Международная научно-техническая конференция впервые проводится под эгидой Международного общества прогрессивных материалов и технологий SAMPE, которое ведет активную работу по объединению интеллектуальных усилий ученых и инженеров в области разработки новых материалов, обладающих уникальными свойствами, и современных технологий. Этот факт стал показателем признания высокого международного уровня конференции как по научно-техническому содержанию, так и по организационным вопросам.

Хочу выразить уверенность в том, что этот форум будет крайне интересным и продуктивным, а научные дискуссии дадут всем участникам новое видение прорывных направлений исследований.

С уважением и пожеланием успеха,

**Вице-президент, академик-секретарь
«Российской инженерной академии»,
Президент отделения SAMPE
по России и СНГ
*В. С. Боголюбов***





ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ

Секция 1	Полимерные композиционные материалы и конструкции
Секция 2	Керамика специального назначения, стекло и оптические покрытия
Секция 3	Управление инновационными процессами
Круглый стол	Молодежный взгляд на развитие науки в научных организациях

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Часть 1.

Российский пассажирский самолет МС-21 – ведущий мировой инновационный продукт 35

Филипенко А. Ф.

Семейство самолетов МС-21 36

Гайданский А. И.

Инновационные технологии создания углепластикового крыла самолета МС-21 38

Комиссар О. Н., Мухин Н. В., Выморков Н. В., Свиридов А. Г.

Технологические аспекты производства углепластиковых деталей хвостового оперения МС-21-300 41

Самсонов В. И., Хмельницкий А. К., Силкин А. Н.

Разработка моно- и гетерогенных композиций авиационного остекления на основе поликарбоната и технологий их получения 46

Часть 2.

Новые тенденции в прорывных технологиях неметаллических материалов 49

Русин М. Ю., Забейайлов А. О.

Перспективные направления развития специальной керамики для экстремальных условий эксплуатации 50

Андреевский Р. А.

Новые возможности применения наноматериалов в экстремальных условиях 53

Тихонравов А. В.

Многослойные оптические покрытия – ключевые элементы современных технологий 56

Сотников А.А.

Кластерная политика Калужской области. Практика и перспективы формирования кластера неметаллических материалов 58

Секция 1. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ

Гайдачук В. Е., Кондратьев А. В., Чесноков А. В.

Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники 63

Биткин В. Е., Гаврилова Е. А., Ерёмин С. А., Гордеев С. А., Альшина С. А., Зайченко А. С., Шлаферов А. Л., Тихонов А. А.

Вопросы проектирования размеростабильных конструкций антенных рефлекторов из волокнистых композиционных материалов 65

Климакова Л. А., Кореванов Р. В.

Исследование термостабильности крупногабаритной антенной платформы при эксплуатационных термических нагрузках 68

Кравченко Е. А., Богданова О. С., Сережин С. С.

Конструктивно-технологические аспекты изготовления размеростабильной несущей конструкции из ПКМ 70

Афанасьев Д. В., Каримбаев Т. Д., Луппов А. А.

Экспериментальные рабочие лопатки вентиляторов ТРДД из полимерных композиционных материалов 71

Жобер Б.

Новая технология аддитивного производства – лазерная газопорошковая наплавка 72

Белоглазов А. П., Матюшкин С. Э., Сорокин В. Н.

Опыт изготовления конструкционных элементов систем энергоснабжения КА из ПКМ 74

Аккуратов И. Л., Копыл Н. И., Алямовский А. И.

Силовой стержень из высокомодульного углепластика для ферменной конструкции космического аппарата 76

Алямовский А. И., Копыл Н. И., Аккуратов И. Л., Давыдов Д. Я.

Технология изготовления композитных конструкций на примере приборных рам 77

Степанов П. А., Атрощенко И. Г., Никулина О. В., Мельников Д. А., Строева О. А.

Разработка высокотемпературных многослойных конструкций из композиционных материалов для летательных аппаратов 79

Сафонов А. А., Саратов А. А., Бондарчук Д. А. Выбор оптимальных технологических параметров пултрузии изделий из ПКМ на основе численного моделирования.....	80
СУЙ Гуанчжун, СЮЙ Мэн Текущая ситуация и тенденция развития китайских арамидных сот	82
Волков В. С., Крюков А. М., Кулагина И. В., Садикова Н. А., Шуль Г. С. Разработка нового облегченного стеклосотопласта повышенной прочности для космических аппаратов.....	84
Корнейчук А. Н., Волков В. С., Чугунов С. А., Рыбакова Н. В., Шуль Г. С., Денисова Е. В. Пути повышения термостойкости полиимидных стеклосотопластов	85
Вермель В. Д., Калитин Е. И., Олейников А. И. Расчет технологических параметров способа ремонта ударных повреждений конструкций из слоистых ПКМ.....	87
Зеркаев А. И., Фролов М. А. Специальные термопластичные углепластики для авиации и космоса: новая ключевая технологическая компетенция в мире и в России	88
Димитар Богданоски, Светлана Ристеска Передовые решения для технологии термопластичных композиционных материалов	89
Мухаметов Р. Р. Термостойкие полимеры для композитов	91
Руппель В., Лёба С. Новейшие разработки в сфере антиадгезионных составов и покрытий для мастер-моделей и оснастки в производстве композиционных изделий	93
Корохин Р. А., Солодилов В. И., Зверева У. Г., Соломатин Д. В., Бамборин М. Ю. Модифицирование эпоксидных матриц углепластиков полиэфиримидом	95
Портнова Я. М., Мазур В. В., Войлочников А. И., Плясункова Л. А. Исследование влияния фуллеренов на структурное состояние и физико-механические характеристики ПКМ для перспективных изделий специального назначения	98

**Чалых А. Е., Будылин Н. Ю., Пахомов К. С.,
Антипов Ю. В., Алиев А. Д.**

Переходные зоны в адгезионных соединениях арамидное
волокно-эпоксидное связующее 100

Якушкин П. Ю., Кордо М. Н., Забейжайлов М. О., Ланин А. В.

Сопоставление результатов определения энергии активации
полимерного материала исходя из анализа ТГ-кривых и анализа
его прочностных свойств 101

Мосиук В. Н., Морозов С. В., Томчани О. В.

Сравнение свойств полимерных композиционных материалов, полученных
по различным неавтоклавным технологиям формования 103

Ямщикова Г. А.

Низковязкое эпоксидное связующее, не поддерживающее горение,
и стеклопластик на его основе 104

**Данилаев М. П., Богомолова О. Ю., Михайлов С. А., Польский Ю. Е.,
Ценцевицкий А. А.**

Технология капсулирования субмикронных частиц наполнителя
для дисперсно наполненных полимерных композиционных материалов
с воспроизводимыми механическими характеристиками 106

Волков Д. А., Богданов А. П.

Применение контрольных карт при анализе технологических
параметров деталей из ПКМ в опытном производстве 108

Обухова Н. С., Баранов А. А., Ширко А. А., Шуль Г. С.

Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков – опыт применения 110

Вешкин Е. А., Постнов В. И., Плетинь И. И.

К вопросу снижения объёмной пористости при безавтоклавном формовании ПКМ 111

Сергеев В. Т.

Технология и оборудование для производства многослойных тканей и 3D тканых
преформ для армирования композиционных материалов 113

Бухаров С. В., Лебедев А. К.

Особенности пропитки толстостенных волокнистых преформ 113

Чесноков А. В., Тимофеев А. Н., Тимофеев И. А.

Формообразование армирующих каркасов и изготовление композиционных
материалов в технологическом университете 116

<i>Ирошников А. И., Половый А. О., Мартиросян В. С., Шкиркова Л. М.</i> Перспективы применения гибридных углепластиков для изготовления композиционной формообразующей оснастки	117
<i>Антошина Ю. Г., Богданова О. С.</i> Исследование влияния на прочность клеевого соединения технологических нарушений при склеивании углепластиковых обшивок	119
<i>Картабаев С. Ж., Русланцев А. Н.</i> Методика идентификации прочности углепластика при сдвиге в плоскости слоя	121
<i>Обухова Н. С., Захаров Е. В., Морозова З. В., Шуль Г. С.</i> К вопросу оценки компонентного состава полимерных композиционных материалов	123
<i>Гадолина И. В., Лисаченко Н. Г., Попов А. Г.</i> Сравнение доверительных интервалов для процентилей случайной выборки на основании формул математической статистики и полученных бутстреп-моделированием	125
<i>Русланцев А. Н., Думанский А. М., Портнова Я. М.</i> Модель ползучести углепластика БМИ-3/3692 на основе равнопрочной ткани	128
<i>Попов А. Г., Матюшевский Н. В.</i> Исследование напряженно-деформированного состояния образцов из высокомодульных углепластиков методами 3d моделирования и определение геометрических размеров образца, обеспечивающих равномерное распределение касательных напряжений при сдвиге с укладкой слоев $\pm 45^\circ$	130
<i>Скоморохов А. О., Русаков Д. Ю.</i> Анализ результатов теплового контроля изделий из полимерных композиционных материалов	132
<i>Артамонова Т. А., Шашунькина О. В., Савченкова Г. А.</i> Герметизирующие ленты серии Абрис-А для вакуумного формования полимерно-композиционных материалов	135
<i>Думанский А. М., Портнова Я. М., Русланцев А. Н.</i> Анализ критериев статической прочности углепластиков	136
<i>Вагин В. П., Дворецкий А. Э., Миронихин А. Н., Ташев В. П., Тащилов С. В.</i> Методы оценки тепловой, окислительной и термомеханической стойкости перспективных КМ для РКТ	139

<i>Лахин А. В., Магнитский И. В., Тащилов С. В., Чернокожеев И. И.</i> Применение в материалах типа «Арголон» прошивных тканно-выкладочных каркасов из волокон на основе гидратцеллюлозы и матрицы на основе каменноугольного пека	140
<i>Симачко А. И., Лахин А. В., Кокин П. А., Скудин В. В.</i> Исследование влияния состава пека, применяемого при получении УУКМ на основе пространственно армированного каркаса из углепластиковых стержней и объемно-изотропной углеродной матрицы, на физико-механические свойства УУКМ	142
<i>Половый А. О., Шелковой А. Н.</i> Моделирование перфорационных отверстий в электронных моделях панелей звукопоглощающих конструкций из ПКМ	143
<i>Халиулин В. И., Батраков В. В., Константинов Д. Ю., Шабалов А. В.</i> Опыт создания преформ для высоконагруженных композитных конструкций	146
<i>Халиулин В. И., Двоеглазов И. В., Беззаметнова Д. М.</i> Применение метода направленной укладки волокна для изготовления стержневых и сетчатых конструкций	147
<i>Батраков В. В., Данилов Я. С., Шабалов А. В.</i> Проблемы проектирования и изготовления опорных конструкций с высокой термостабильностью методом радиального плетения для космических аппаратов	149
<i>Кордо А. А., Бойко Л. И., Иваницкий А. С.</i> Электрические свойства термостойкого эпоксидного компаунда ВЭК-7	150
<i>Шкиркова Л. М., Ирошников А. И., Обухова Н. С., Захаров Е. В., Ширко А. А.</i> Влияние состава и структуры углестеклопластиков на термодформационные свойства	152
<i>Шкиркова Л. М., Мартиросян В. С., Обухова Н. С., Ширко А. А.</i> Термодформационные свойства полимерных композиционных материалов, полученных методом пропитки под вакуумом	154
<i>Корнейчук А. Н., Чузунов С. А., Рыбакова Н. В., Волков В. С.</i> Исследования по разработке гибких стеклосотопластов с прямоугольной ячейкой	156

Крюков А. М., Волков В. С., Мурашкин Ю. Г., Мешков С. А., Степанов Н. В.	
Исследования по повышению гибкости стеклосотопластов	158
Волков В. С., Кулагина И. В., Крюков А. М., Садикова Н. А., Корнейчук А. Н., Денисова Е. В.	
Разработка новых крупногабаритных стеклопластиковых сотовых заполнителей повышенной прочности	160
Петрова О. Л., Попов А. Г., Выморков Н. В., Перова И. Е., Лисаченко Н. Г.	
Анализ прочностных и упругих характеристик и исследование масштабного фактора при испытаниях на сжатие отечественного сотового заполнителя	162
Кованов А. Е.	
Исследование методов перфорации многослойных звукопоглощающих конструкций из полимерных композиционных материалов	164
Насонов Ф. А.	
Разработка метода ремонта отверстий под разъемные соединения в изделиях из углепластика с помощью установки стеклопластиковой втулки	165
Волков Д. А., Попов А. Г., Осауленко А. В., Петрова О. Л., Литицкая В. А., Хандорина Е. А.	
Исследование влияния технологических факторов и конфигурации образцов на значение предела прочности при сжатии углепластика на основе препрега БМИ-3/3692	168
Зорин Ю. В., Горлов А. В.	
Разработка технологии и изготовление из композиционных материалов опытного образца направляющего аппарата первой ступени компрессора низкого давления	170
Маслов А. С., Волков Д. А.	
Влияние конструктивных особенностей створки РУ на технологию изготовления детали	172
Домбров А. В., Волков Д. А.	
Оптимизация расхода материала при переходе от опытного производства изделий из ПКМ к серийному	174
Пунина М. А., Бухаров С. В.	
Разработка эпоксизалятокомпозиата для коррозионной защиты железобетонных конструкций трубопроводов	175

Иванова С. М., Лисаченко Н. Г., Хабенко А. В.

Экспресс-оценка кинетических параметров реакции отверждения термореактивных материалов по данным дифференциальной сканирующей калориметрии 176

Ворвиль С. В., Мосиук В. Н., Томчани О. В.

Подбор режимов дополнительной термообработки связующего БМИ-3 методом ДМА 178

Смирнов А. А., Рубцов М. А.

Модификация эпоксифенольного термореактивного связующего силикатными наночастицами 181

Секция 2. КЕРАМИКА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, СТЕКЛО И ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

**Путляев В. И., Евдокимов П. В., Гаршев А. В., Сафронова Т. В.,
Климашина Е. С., Иевлев В. М.**

3D-печать керамических изделий сложной формы 185

Мезенцев М. А., Каримбаев Т. Д., Ежов А. Ю.

Разработка прорывных технологий создания узлов и элементов из композиционных материалов для МГТД 186

**Соколов П. С., Аракчеев А. В., Михальчик И. Л., Ланин А. В.,
Русин М. Ю., Келина И. Ю.**

Сверхвысокотемпературная керамика на основе ZrB_2 -SiC: получение и основные свойства 188

**Быков Ю. В., Егоров С. В., Еремеев А. Г., Плотников И. В., Рыбаков К. И.,
Сорокин А. А., Холопцев В. В.**

Сверхбыстрое микроволновое спекание оксидных керамических материалов 189

Ганичев А. И., Забежайлов А. О., Лисаченко М. Г., Келина И. Ю.

Особенности азотирования кремния с добавкой оксида иттербия 192

Овсиенко А. И., Румянцев В. И., Ордастьян С. С., Синани А. Б., Беспалов И. А.

Баллистическая стойкость керамики на основе карбида бора 193

Часовской Е. Н., Русин М. Ю., Келина И. Ю.

Использование модели слабейшего звена Вэйбулла для оценки прочностной надежности керамических антенных обтекателей 196

Нечепуренко А. С., Гарипов О. Ф., Поженский С. В., Ласыченков Ю. Я. Высокотемпературная керамика на основе нитрида бора гексагонального	198
Мугла Д. Р., Галиновский А. Л., Хахалин А. В., Судник Л. В. Исследование и перспектива использования конструкционной керамики на основе оксида алюминия	200
Георгиу И. Ф., Лисаченко М. Г., Забейжайлов А. О., Путляев В. И. Исследование влияния состава газовой среды при синтезе реакционносвязанного нитрида кремния на его микроструктуру и физико-механические свойства	201
Рыжова О. Г., Стороженко П. А., Тимофеев И. А., Жукова С. В., Драчев А. И., Кузнецова М. Г., Тимофеев П. А., Кузнецова Т. М. Особенности формирования карбонитридокремниевой керамики, самоармируемой волокнистыми наноструктурными образованиями	202
Каримбаев Т. Д. Нелинейное деформирование монолитной керамики композиционного материала на его основе	203
Лорян В. Э., Качин А. Р. Прямой синтез изделий в режиме СВС из неметаллических материалов на основе фторфлогопита	204
Макаров Н. А., Вершинин Д. И., Крыльцов И. С. Керамика в системе $\text{Li}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{TiO}_2$ с добавкой эвтектического состава	207
Иванов Н. З., Неповинных В. И., Думанский А. М. Исследование напряженно-деформированного состояния элементов тонкостенных конструкций летательных аппаратов методом рентгеновской томографии	209
Балабанов С. С., Беляев А. В., Быков Ю. В., Егоров С. В., Еремеев А. Г., Новикова А. В., Паршин В. В., Пермин Д. А., Сорокин А. А. Получение оптически и радиопрозрачной керамики из алюмомагниевого шпинели	211
Гольева Е. В., Михайлов М. Д., Дунаев А. А., Игнатенков Б. А., Соколов И. А. Исследование микроструктуры и оптических свойств прозрачной керамики алюмомагниевого шпинели, полученной горячим одноосным прессованием нанопорошков	213

Томчани О. В., Кашкарова Е. М., Шугаев М. В., Зайцев И. М., Улановский А. А. Конструкционные теплоизоляционные материалы – направления применения	216
Куфтырев Р.Ю., Бешенков П.С. Высокотеплопроводные материалы на основе нитрида алюминия, выпускаемые на ООО «ЗТК»	218
Просовский О. Ф., Гвоздев А. Б., Исамов А. Н., Просовский Ю. О. Технология и методы в производстве металлodieлектрических покрытий	220
Солнцев С. С., Денисова В. С., Розененкова В. А. Новые высокотемпературные покрытия на основе системы (BaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂)-SiB ₄ для авиационных сплавов	221
Тарновский Р. В., Дитц А. А. Влияние температуры и состава стекла на угол смачивания нитрида алюминия	222
Кучерявый С. С. Адаптация авиационных дисплеев к нашлемным очкам ночного видения	225
Мишина Е. Н. Математические модели для тонкопленочной технологии. Недостатки матричного метода АБЕЛЕ и моделей МГУ. Адмиттансный метод	226
Липилин А. С., Чернов Е. И., Никонов А. В., Спириин А. В. Перспективные конструкции и технологии изготовления твёрдооксидных топливных элементов (ТОТЭ)	229
Миронов Р. А., Забежайлов М. О., Бородай С. П. Определение размеров пор в кварцевой керамике по спектрам полного отражения от слоев двух толщин	232
Кордо М. Н., Ланин А. В., Забежайлов М. О. Оценка кинетических параметров термодеструкции кварцевой керамики с пропиткой МФСС-8	235
Фетисов В. С., Кирюшина В. В., Латыш С. И., Воробьев С. Б., Харчук М. Д. Исследование взаимосвязи химического состава и ТКЛР прецизионного литейного сплава для деталей, контактирующих с керамикой при повышенных температурах	237

Харитонов Д. В., Анашкина А. А., Моторнова М. С. Влияние кинематических параметров перемешивания герметика «Виксинт У-2-28НТ» на прочностные свойства клеевого соединения металл-керамика	238
Судальцев Е. И., Зайчук Т. В., Вандрай С. Н., Устинова Ю. С., Орлов А. А. Получение и свойства спеченной кордиеритовой стеклокерамики	241
Модин С. Ю., Попова Н. А., Лебедева Ю. Е. Дилатометрические исследования процессов фазообразования и спекания керамики на основе карбида кремния, легированного бором, при применении метода механической активации на стадии подготовки порошков	244
Тарасовский В. П., Красный Б. Л., Кошкин В. И., Боровин Ю. М., Васин А. А., Смирнов А. Д. Анализ поровой структуры проницаемой керамики методом рентгеновской микротомографии	246
Беспалов И. А. Исследование влияния скорости и конструкции пули на броневые свойства керамических материалов	248
Кораблева Е. А., Майзик М. А., Саванина Н. Н. Исследование свойств высокоплотной наноструктурной керамики на основе $ZrO_2-Y_2O_3$	251
Райлян В. С., Антонов В. В., Фокин В. И., Тесленко Е. А., Мешков С. А. Тепловые испытания комплектующих керамического обтекателя	253
Райлян В. С., Харитонов Д. В., Фокин В. И., Харахонов Г. А., Ерошин Д. В., Ногарев М. В. О некоторых аспектах операции механической обработки в системе производства керамических обтекателей ракет	253
Закоржевский В. В., Лорян В. Э., Боровинская И. П., Кириллов А. В., Санникова С. Н. Синтез нитрида циркония из элементов в режиме горения	254
Кирюшина В. В., Ковалева Ю. Ю., Фетисов В. С., Анашкина А. А. Статистические средства в управлении качеством технологических процессов производства изделий из керамических материалов	257
Погодин В. А. Синтез ультрадисперсного порошка Al_2O_3 парофазным гидролизом изопропилата алюминия	258

Осипова Ю. Н., Каргина Е. А., Бекренев А. С.

Производство наконечников оптических керамических (НОК) на основе диоксида циркония (Zr ферул) методом литья под давлением для волоконно-оптических соединителей, работающих в жестких условиях эксплуатации 259

Сафаралиев Г. К., Шабанов Ш. Ш., Кардашова Г. Д., Биалалов Б. А.

Структура и упругие свойства керамических материалов в системе SiC-BeO 262

Солнцев С. С., Розененкова В. А., Прокофьев В. А., Денисова В. С.

Исследование жаростойкой эмали типа ЭВК-103 для защиты никелевых сплавов 264

Корзунин А. В., Фурминский А. А.

Стохастические и детерминистские методы для задач оптимизации многослойных оптических покрытий 265

Антропова Е. В.

Метод секционного анализа в технологии получения многослойных оптических покрытий на вакуумной установке с массовой системой контроля 266

Лисаченко М. Г., Рудыкина В. Н., Ганичев А. И.,

Забейайлов А. О., Келина И. Ю.

Влияние плотности упаковки сырца на физико-механические свойства реакционносвязанного нитрида кремния 269

Строева О. А., Атрощенко И. Г., Никулина О. В., Тюшина Н. Б.,

Степанов П. А., Степанов В. А.

Разработка новых термостойких покрытий для радиопрозрачных конструкций летательных аппаратов 271

Атрощенко И. Г., Бородай Ф. Я., Мельников Д. А., Неповинных Л. К.,

Никулина О. В., Стародубцева Н. И., Степанов П. А.

Разработка новых термостойких композиционных материалов для радиопрозрачных конструкций летательных аппаратов 272

Алексеев М. К., Бизин И. Н., Куликова Г. И., Русин М. Ю.,

Саванина Н. Н., Горчакова Л. И., Шер Н. Е.

Высокоплотная мелкокристаллическая корундовая керамика 275

Анучин С. А., Просунцов П. В., Забейайлов М. О., Ланин А. В., Кордо М. Н.

Влияние способа заделки поверхностных термопар на погрешность определения температуры при испытаниях керамических материалов на установках радиационного нагрева 277

Шкарупа И. Л., Rogov Д. А. Расчёт теплового состояния керамического тигля при моделировании процесса нестационарного нагрева	279
Фролова Т. С., Бородай С. П., Мишинова Т. А., Забейжайлов М. О. К вопросу о возможности контроля коэффициента интенсивности напряжений керамических материалов методом индентирования	281
Якушкина В. С., Кораблева Е. А., Саванина Н. Н., Короткий С. А., Осипова М. Е., Плясункова Л. А., Бизин И. Н. Получение высокоплотной керамики из наноразмерных порошков на основе диоксида циркония методом инъекционного формования	283
Судальцев Е. И., Зайчук Т. В., Вандрай С. Н., Устинова Ю. С. Исследование реологии водных суспензий магнийалюмосиликатного стекла	285
Миронов Р. А., Ланин А. В., Крюков А. Е., Забейжайлов М. О. Способ определения нормальной монохроматической излучательной способности непрозрачных материалов при высоких температурах	287
Голубева Н. А., Келина И. Ю., Плясункова Л. А., Журавлев А. А. Свойства керамических материалов на основе реакционносвязанного карбида бора	289
Неповинных В. И., Цвєрава В. Г., Русин М. Ю. О некоторых особенностях термодеструкции герметика Виксинт У-2-28 НТ в клеевых соединениях с субстратами из разных материалов	291
Шер Н. Е. Активная пайка металлокерамических гермовводов сложной конструкции	294
Журба Е. В., Лемешев Д. О., Попова Н. А. Синтез методом обратного гетерофазного соосаждения прекурсора алюмомагнезиальной шпинели для прозрачной керамики	296
Кирюшина В. В., Фетисов В. С., Коваленко П. В., Хамицаев А. С. Оценка прочностной надежности головного обтекателя летательного аппарата из стеклокерамики в серийном производстве	298
Часовской Е. Н., Русин М. Ю., Келина И. Ю. Применение теплозащитных покрытий в конструкции керамических антенных обтекателей	300

<i>Чевыкалова Л. А., Келина И. Ю., Михальчик И. Л., Плясункова Л. А., Аракчеев А. В.</i>	
Высокопрочный керамический материал на основе композиционных порошков нитрид кремния – оксид магния, полученных методом СВС	301
<i>Чевыкалова Л. А., Келина И. Ю., Михальчик И. Л., Плясункова Л. А., Аракчеев А. В.</i>	
Керамический материал в системе $(\text{Si}_3\text{N}_4\text{-MgO})_{\text{СВС}}\text{-BN}_r$	302
<i>Часовской Е. Н., Русин М. Ю., Келина И. Ю., Забежайлов М. О.</i>	
К вопросу испытания керамических материалов на растяжение	304
<i>Рабинский Л. Н., Рипецкий А. В., Ситников С. А., Соляев Ю. О., Погодин В. А.</i>	
Исследование пористой керамики на основе нитрида кремния, полученной с использованием технологии трехмерной печати	305
<i>Погодин В. А., Сидельников С. А., Ситников С. А.</i>	
Применение полиорганосилазанов в технологии сверхвысокотемпературных композиционных материалов	307
<i>Бизин И. Н., Куликова Г. И., Алексеев М. К., Горчакова Л. И., Саванина Н. Н., Шер Н. Е., Анашкина А. А.</i>	
Мелющие корундовые шары, формуемые методом квазиизостатического прессования	308
<i>Шаталин Н. В., Остролуцкий Д. А., Симакина Е. И.</i>	
Исследование и отработка технологии получения типовой детали остекления вертолета из абразивостойкого, обогреваемого органического слоистого материала	311

Секция 3. УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

<i>Зайнетдинов Р. И., Гадолина И. В.</i>	
Совершенствование управления инновационными процессами на основе аттракторов технологического развития	313
<i>Иванова М. В.</i>	
Формирование системы управления интеллектуальной собственностью инновационной компании	315

<i>Ершова Н. И.</i>	
Вопросы стимулирования инновационной деятельности на научно-производственных предприятиях	316
<i>Харитонов Д. В., Грошев А. В., Анашкина А. А., Блинов А. Н.</i>	
Опыт внедрения элементов бережливого производства на участке изготовления керамических заготовок	317
<i>Бубало Д. А., Петров В. Б., Кулас К. Ю.</i>	
Опыт информационной поддержки изделий из ПКМ на стадии производства.....	318
<i>Коваль О. В.</i>	
Использование современных инструментов инновационного развития в деятельности государственных научных центров Российской Федерации	319
<i>Новикова И. И.</i>	
Кластерный подход в стратегии инновационного развития региона.....	322
<i>Мотова Д. Б.</i>	
Мировой опыт формирования инновационных кластеров: роль бизнес-структур	324



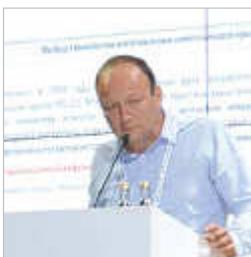
Ультрасовременный ближне-среднемагистральный самолёт MC-21 предназначен для перевозки пассажиров, багажа и грузов на внутренних и международных авиалиниях. Является российским проектом в области гражданской авиации.

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Часть 1. Российский пассажирский самолет МС-21 – ведущий мировой инновационный продукт



Главный технолог
АО «Корпорация «Иркут»
А. Ф. Филипенко



Генеральный директор
АО «АэроКомпозит»
А. И. Гайданский



Заместитель генерального директора
по науке и развитию
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина»,
канд. техн. наук
О. Н. Комиссар



Директор НПК «Стекло» – главный конструктор
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина»,
канд. техн. наук
В. И. Самсонов

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

СЕМЕЙСТВО САМОЛЕТОВ МС-21

Филипенко А. Ф.

АО «Корпорация «Иркут», г. Москва, Россия

Прорывной продукт отечественного авиастроения - пассажирский самолет МС-21 - с целью более выгодного позиционирования на мировом рынке авиаперевозок предусматривает две модификации в зависимости от вместимости пассажиров: МС-21-300 (190 пассажиров) и МС-21-200 (160 пассажиров). Самолет имеет ряд аэродинамических, конструктивных и эксплуатационных новшеств, которые существенно выделяют его на фоне аналогичной авиационной техники. Кабина экипажа нового типа содержит многофункциональные 15-дюймовые жидкокристаллические дисплеи, связанные боковые ручки управления с эффектом обратной связи, Electronic Flight Bag (EFB) класса 2+ с системой внекабинного обзора. Уровень эргономики кабины, соответствующий перспективным тенденциям и категории автоматического захода на посадку CAT 3b (опционально), снижают нагрузки на пилотов и обеспечивают полную унификацию кабины между модификациями семейства МС-21.

Пассажирский салон имеет самый широкий проход в своем классе и увеличенное пространство для пассажира, сидящего у окна. Максимальная естественная освещенность в салоне обеспечивается за счет наибольшего размера иллюминаторов. Поворотные багажные полки имеют уникальную инновационную конструкцию.

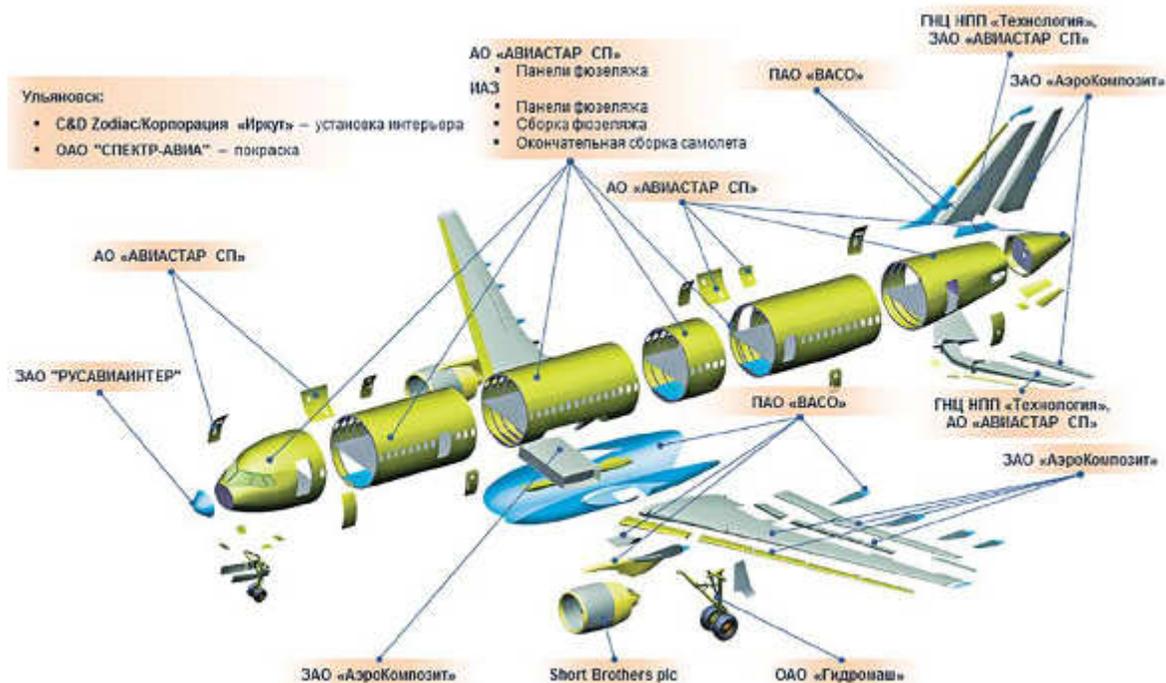


Рис. 1. Схема кооперации производства планера

В кооперации создания планера самолета задействованы одиннадцать ключевых участников – крупные российские и зарубежные предприятия, являющиеся несомненными мировыми лидерами в своих компетенциях.

Следует отметить, что 46,8 % деталей омываемой аэродинамической поверхности планера самолета выполнено из современных полимерных композиционных материалов, что позволило реализовать уникальные характеристики. Наиболее крупными углепластиковыми агрегатами являются: центральный кессон крыла (ЗАО «АэроКомпозит-Ульяновск»), центроплан (ЗАО «АэроКомпозит-Ульяновск»), кессоны киля и стабилизаторов (ЗАО «АВИАСТАР СП» и ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина») и механизация крыла и хвостового оперения (ЗАО «КАПО-Композит»).

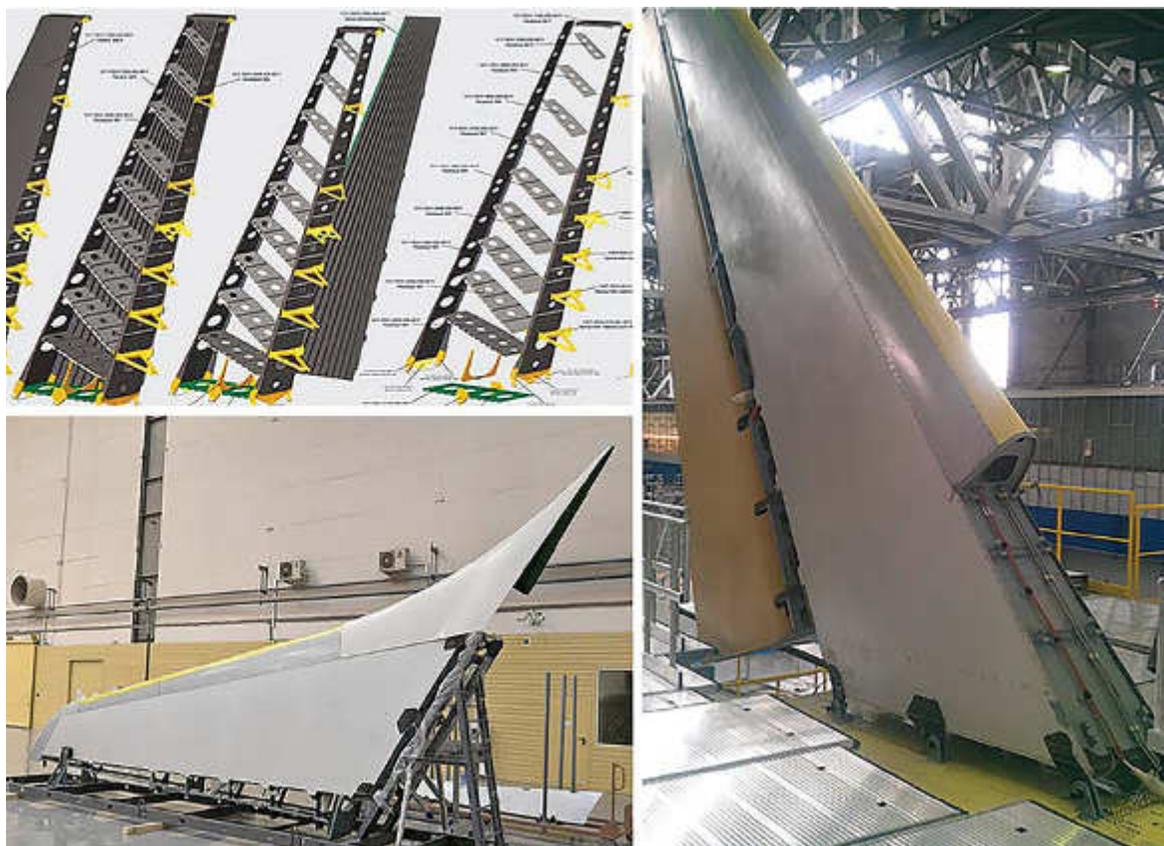


Рис. 2. Киль - Авиастар-СП (Ульяновск)
и ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина

Окончательная сборка самолета осуществляется на «Иркутском авиационном заводе» – филиале ПАО «Корпорация «Иркут». 8 июня 2016 года в Иркутске прошла торжественная церемония, посвященная выкатке первого экземпляра нового пассажирского самолета MS-21-300.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКОВОГО КРЫЛА САМОЛЕТА МС-21

Гайданский А. И.

АО «АэроКомпозит», г. Москва, Россия

В 2008 году в структуре «Объединенной авиастроительной корпорации» (ПАО «ОАК») появилась компания «АэроКомпозит», основной целью которой стало проектирование и изготовление композитных конструкций воздушных судов гражданского назначения. В рамках кооперации по проекту нового самолета МС-21 (головной разработчик ПАО «Корпорация «Иркут») АО «АэроКомпозит» приступило к работам по созданию композитного крыла нового лайнера. Для реализации поставленных задач данного проекта требовалось построить технологический процесс с чистого листа, разработать технологию производства абсолютно нового продукта, так называемого «крыла большого удлинения», уникального по своим техническим характеристикам.

Хотя в России и в странах бывшего СССР был накоплен значительный опыт создания конструкций из композиционных материалов, использовать традиционную технологию с применением препрега (пропитанного углеродного материала) оказалось нецелесообразно. Дело в том, что работа с препрегом требует применения крупногабаритного специализированного оборудования и осложняется жесткими требованиями к жизненному циклу материала. К примеру, срок хранения современных препрегов в холодильной камере составляет 12 месяцев при условии герметичной упаковки и строгом соблюдении температурного режима. А после вскрытия упаковки препрег «живет» всего 20-30 дней.



Рис. 1. Технологический процесс создания композитных элементов конструкций методом вакуумной инфузии

Специалисты «АэроКомпозита» пошли по иному пути, применив инфузионную технологию, одной из особенностей которой является работа с сухим углеродным материалом. Это стало одним из главных преимуществ для создания длинномерных конструкций, обеспечившим свободу технологического манёвра за счёт продления времени, в течение которого материал можно обрабатывать.

В результате исследований была создана преформа – заготовка конструкции, которая может храниться длительное время, не теряя своих качеств. А после ее пропитки достигаются те же параметры, что и при работе с препрегом. В результате можно создавать значительные заделы заготовок (преформ), хранящихся неограниченное время, а затем по мере надобности пропитывать и обрабатывать их, изготавливая конструкцию.

Было принято решение изготавливать на основе данной технологии силовые элементы консолей крыла лайнера, такие как панели консоли, лонжероны, дренажные короба, а также панели центроплана.

Первостепенной задачей стало изучение мирового опыта применения композитов и современных технологий в авиастроении. Затем проведение исследований свойств материалов и рассмотрение возможности создания конструкции на элементарных конструктивно-подобных образцах. Для проведения испытаний на базе ФГУП «ЦАГИ» было изготовлено 4 композитных прототипа кессона крыла – два для статических и два для ресурсных испытаний. Первый этап испытаний завершили в конце 2011 года. По результатам этих испытаний было принято решение по технологии изготовления элементов конструкций и о применении материала для этих элементов конструкции. Специалисты АО «АэроКомпозит» получили подтверждение, что полномасштабные силовые конструкции, получаемые методом вакуумной инфузии, не хуже, чем автоклавные, с точки зрения прочности и точности геометрии.

Под реализацию проекта создания композитного крыла МС-21 в 2011 году в Москве была создана Опытная лаборатория технологий и конструкций из полимерных композиционных материалов, а спустя год началось строительство двух производственных площадок в Казани и Ульяновске.

Лабораторное оборудование позволяло моделировать технологию и отрабатывать её на элементарных образцах разной толщины, от плоских и стрингерных панелей до демонстраторов панелей крыла. Необходимо было выяснить экспериментально, какая конструкция панели может отвечать всем прочностным требованиям. Помимо изготовления опытных образцов в лаборатории отрабатывались все стадии технологического процесса: входной контроль исходных материалов, раскрой армирующих материалов с использованием лазерного оборудования, выкладка на оснастку, формирование вакуумного мешка и сам процесс инфузии.

Летом 2013 года в Казани была запущена первая очередь завода «КАПО-Композит», задачей которого стало изготовление композитных агрегатов механизации крыла и хвостового оперения лайнера методом автоклавного формования.

В 2014 году состоялся ввод в эксплуатацию первой очереди завода «АэроКомпозит-Ульяновск», разместившегося на площади свыше 9 гектаров. Впервые в мировом авиастроении на производственных участках завода ведется реализация инфузионной технологии с применением автоматизированного оборудования: автоматических порталных выкладочных машин, роботизированных установок, термоинфузионных автоматизированных центров длиной 22 м и шириной 6 м.

Процесс создания силовых изделий методом вакуумной инфузии начинается с автоматической выкладки преформ деталей из сухой углеродной ленты, так называемых сухих заготовок. Далее происходит выкладка этих преформ в оснастку, где впоследствии производится пропитка. Преформы фиксируются оснасткой в нужную геометрию, укрываются вакуумным мешком, куда подводится связующее вещество. После пропитки связующим производится формование конструкции в автоматизированном термоинфузионном центре. Далее полученная отверждённая деталь проходит неразрушающий контроль, механическую обработку, убираются излишки материала, идёт грунтовка, покраска и деталь подаётся на сборку.

Сегодня это единственное в России предприятие по производству силовых композитных конструкций для авиации, включающее полную линию сборки крыла. Продукция завода: верхние и нижние панели кессона крыла, передние и задние лонжероны, стрингеры, дренажные короба, панели центроплана. Готовые технологические единицы: левая и правая отъёмная часть крыла, а также центроплан.

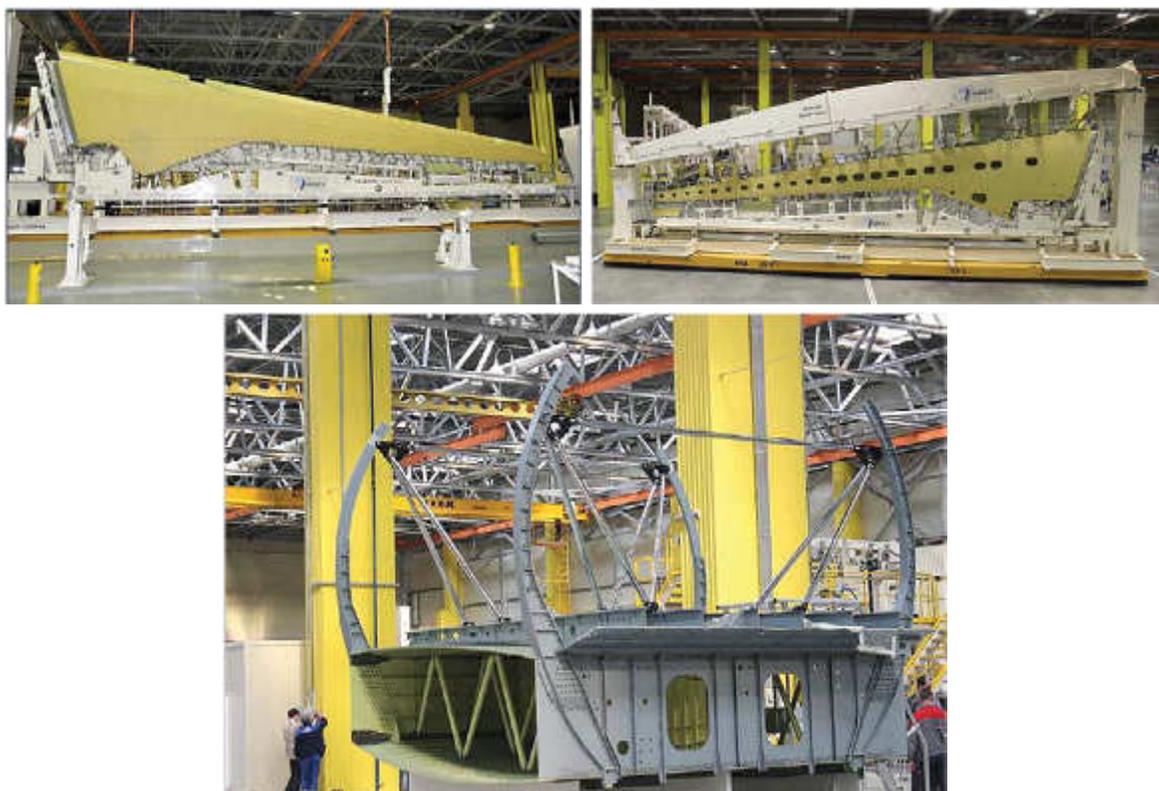


Рис. 2. Производственный участок сборки консолей крыла и центроплана

Летом текущего года в Иркутске состоялась торжественная выкатка первого лётного самолета МС-21 с композитным крылом.

В настоящее время на базе ФГУП «ЦАГИ» в обеспечение первого вылета проводятся испытания полноразмерного композитного кессона крыла лайнера, изготовленного на заводе в Ульяновске. Подобная конструкция испытывается в России впервые. А также продолжают работы по самолету II и III.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ХВОСТОВОГО ОПЕРЕНИЯ МС-21-300

Комиссар О. Н., Мухин Н. В., Выморков Н. В., Свиридов А. Г.
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Коллективом специалистов Государственного научного центра Российской Федерации АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» впервые в отечественной практике разработана технология изготовления крупногабаритных интегральных панелей подкрепленного типа кессона кия и стабилизатора для самолета МС-21 (рис. 1).



Рис. 1. Интегральная панель из углепластика кия самолета МС-21-300

Впервые подобная технология была промышленно применена нашим предприятием для цилиндрических переходных отсеков из углепластика ракеты-носителя «Протон-М», которые начали эксплуатироваться в составе модернизированного ракеты-носителя с 2004 года.

В соответствии с принятой кооперацией при разработке деталей хвостового оперения из ПКМ самолета МС-21 Инженерный центр ПАО «Корпорация «Иркут» выполнял проектирование конструкции деталей кессона кия и стабилизатора, а также разработку конструкторской документации в электронном виде на базе программного обеспечения «FiberSim».

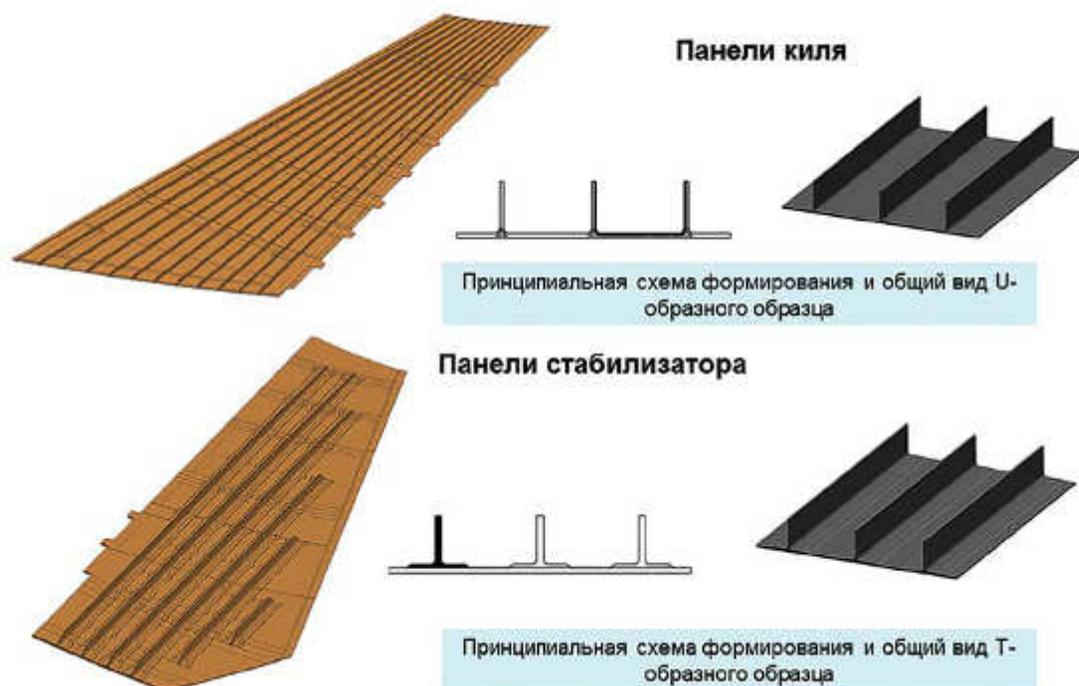


Рис. 2. Конструктивные особенности панелей кия и стабилизатора самолета МС-21-300

Компания «Hexcel» изготавливала и поставляла препреги на основе углеродных волокон для ручной и автоматизированной выкладки марок HexPly M21/UD/IMA, HexPly M21/UD194/IMA/ATL и HexPly M21/T2/AS4C.

ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» разрабатывало технологии изготовления деталей кессонов кия и стабилизатора из ПКМ, проводило работы по подготовке производства, изготавливало опытные образцы, фрагменты и натурные конструкции панелей кессонов кия и стабилизатора из ПКМ для обеспечения комплекса наземных и летных конструкторских испытаний.

В рамках программы самолета МС-21 по углепластиковым интегральным панелям со стрингерным подкреплением были решены следующие задачи:

- разработана конструкция и технология изготовления крупногабаритных мастер-моделей и формообразующей углепластиковой оснастки методом вакуумной инфузии;

- отработаны технологии, изготовлены и поставлены более 4000 стандартных и конструктивно-подобных образцов и фрагментов для проведения испытаний;

- для информационного обеспечения технологических операций проектирования технологий, автоматизированный раскрой материалов, автоматизированная выкладка материалов, лазерное проецирование контуров укладки слоев материала и неразрушающего контроля качества отработано и внедрено в производство программное обеспечение FiberSim, позволившее реализовать взаимодействие этапов «Проектирование» - «Анализ» - «Производство» без применения бумажных носителей.

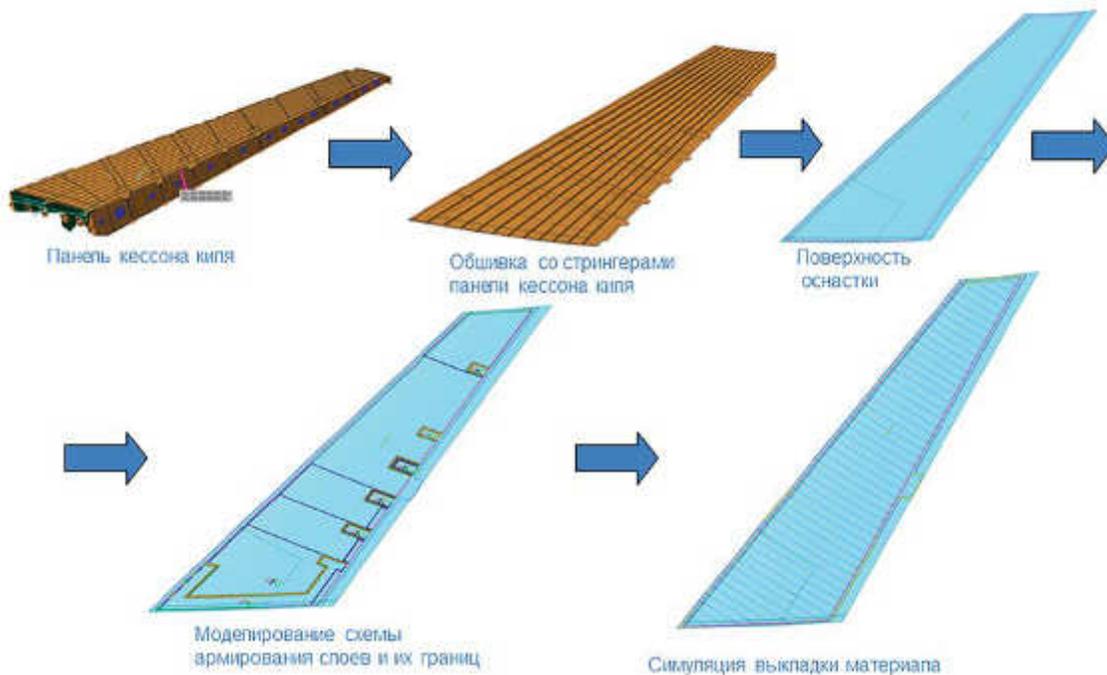
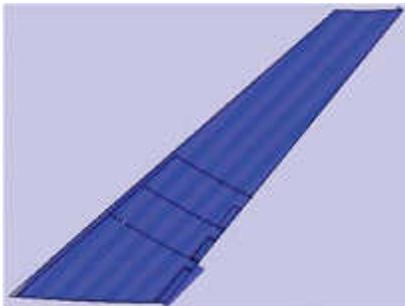


Рис. 3. Схема технологической подготовки производства интегральных панелей киля самолета MC-21 с применением программного комплекса «FiberSim»

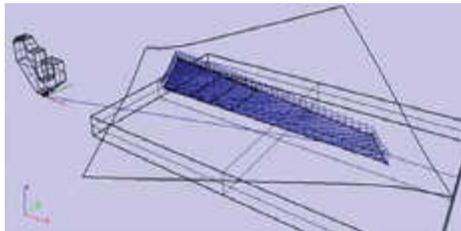
За счет автоматизированной выкладки слоев препрега можно решить следующие важные задачи по сравнению с традиционной ручной выкладкой:

- 1) сокращение трудоемкости выкладки с целью снижения стоимости изделия;
- 2) увеличение коэффициента использования материала;
- 3) сокращение технологического цикла с учетом ограниченной жизнеспособности препрега;
- 4) увеличение производительности участка для обеспечения требуемой серийности выпуска изделий;
- 5) повышение точности укладки слоев препрега: угол, зазор/нахлест, складки, силы натяжения слоев;
- 6) повышение степени уплотнения слоев препрега в «сыром» пакете: пористость, толщина и физико-механические характеристики конечного изделия, исключение подпрессовок пакета для толстостенных (более 10 мм) конструкций;
- 7) обеспечение высокой степени повторяемости качества операций выкладки (Рис. 4).

В рамках работы проведены исследования влияния величины зазора при автоматизированной выкладке лент препрега на физико-механические свойства углепластика, на основании которых были выбраны оптимальные параметры процесса автоматизированной выкладки. Следует отметить, что ГНЦ РФ АО «ОНИИП «Технология» им. А. Г. Ромашина» почти сорокалетний опыт работ в области технологий автоматизированной выкладки препрегов и интегральных конструкций. Первая выкладочная машина консольного типа ОТА-101 была разработана и изготовлена специалистами предприятия в 1982 году для отечественного углепластика КМУ-4Э/001.



Слой в ПО Mikro Place



Машинная траектория
в ПО Mikro Place



Автоматизированная выкладка

Рис. 4. Схема подготовки управляющих программ для автоматизированной выкладки интегральных панелей с применением программного обеспечения «MikroPlace»



Рис. 5. Автоматизированная скоростная выкладка слоев препрега обшивки интегральной панели стабилизатора самолета МС-21-300



Рис. 6. Углепластиковый кессон киля самолета МС-21-300

Изготовленные натурные углепластиковые конструкции успешно прошли комплекс наземных испытаний в составе кессона киля и кессона стабилизатора.

Интегральные панели киля МС-21 в 2014 году демонстрировались на зарубежных специализированных выставках «Farnborough-2014» и «JEC Composite Show 2014» в Великобритании и Франции и получили высокую оценку зарубежных специалистов.

На основе проделанной работы можно сформулировать следующие перспективные задачи для повышения эффективности автоматизированной выкладки слоев препрега при производстве интегральных палелей хвостового оперения самолета МС-21:

- увеличение скорости и производительности автоматизированной выкладка обшивочной части панелей кессона киля и стабилизатора;
- применение автоматизированной технологии выкладки заготовок стрингеров, нервюр и лонжеронов;
- применение автоматизированной выкладки и ультразвуковой резки вкладышей подкрепленных стрингерных панелей плоских заготовок для зон интегрального соединения стрингера и обшивки;
- использование новых технологий безавтоклавного формования «Quickstep», обладающих меньшим расходом энергии и коротким технологическим циклом.

РАЗРАБОТКА МОНО– И ГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИЙ АВИАЦИОННОГО ОСТЕКЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАРБОНАТА И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Самсонов В. И., Хмельницкий А. К., Силкин А. Н.

ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Одной из основных задач авиационного материаловедения является обеспечение повышения эксплуатационной надежности авиационной техники, а также их тактико-технических характеристик. Применяющиеся долгое время композиции авиационного остекления на основе органического стекла (полиметилакрилата) и силикатные триплексы на основе натрийкальцийсиликатного стекла поставили естественную границу их применения в современной авиационной технике. Их использование для остекления современных сверхзвуковых летательных аппаратов достигло своего технического предела и становится проблематичным в основном из-за низких прочностных характеристик данных материалов.

Перспективным материалом, который взят за основу при разработке нового типа гетерогенного авиационного остекления для современных летательных аппаратов, является монолитный поликарбонат. Его ударная прочность (более 120 КДж/м²) в 200 раз превышает ударную прочность обычного силикатного стекла и почти в 10 раз – ударную прочность органического стекла.

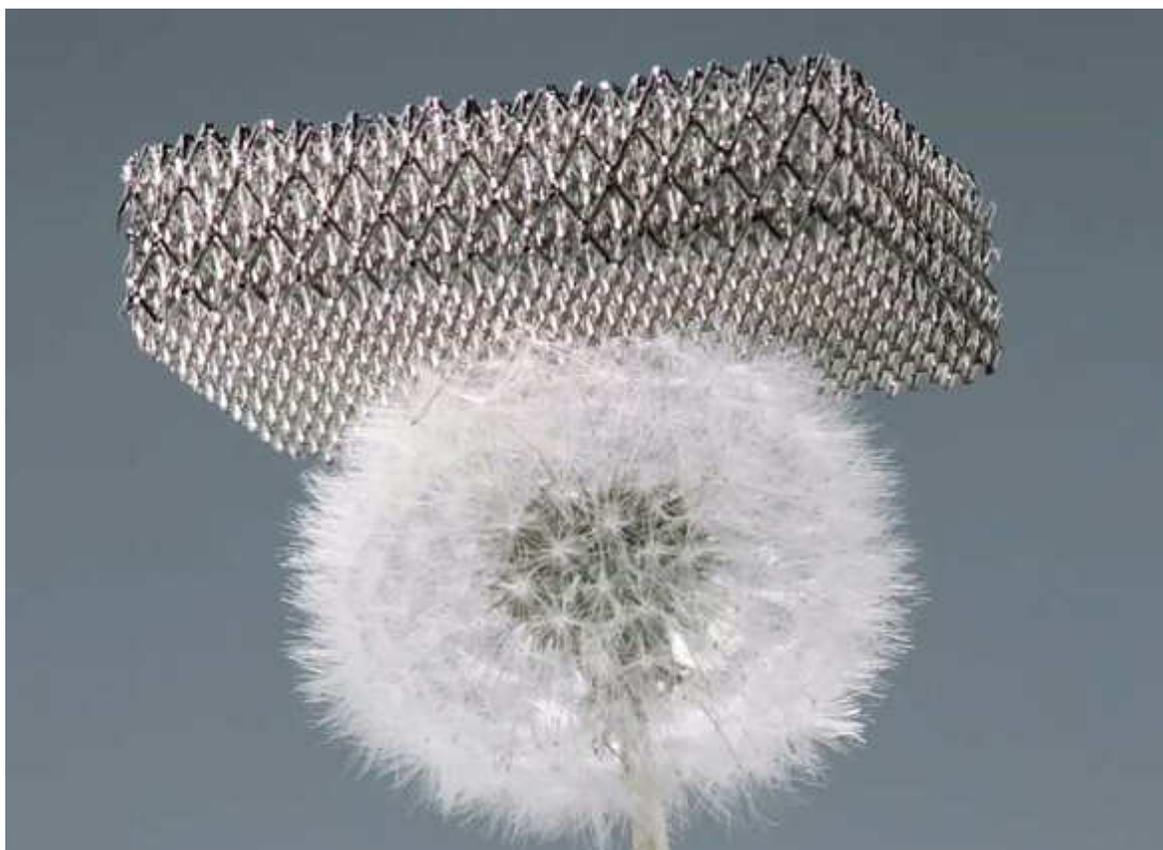
Результаты совместной работы АО «ОНПП «Технология» и АО «Камов» показывают, что созданное органо-органическое остекление для нового многоцелевого вертолета Ка-62 выдерживает динамическое воздействие (удар птицей массой 1 кг) при скорости 290 км/час. При этом масса изделия в два раза меньше аналогичного птицестойкого аналога из силикатного стекла. Немаловажным фактором является также то, что органо-органическое остекление после удара птицей практически не оставляет мелких трещин (что характерно для силикатного стекла), тем самым сохраняя видимость для пилота.

Активно ведутся работы с ПАО «Компания «Сухой» по остеклению самолета Т-50 на основе монолитного поликарбоната. Получены положительные результаты в технологии формования из монолитного поликарбоната сдвижной части фонаря 3D формы. Изделия поставлены на несколько машин и проходят стадию летных испытаний.

Данный тип остекления привлекателен и для других секторов экономики, в частности для остекления локомотивов скоростных поездов, создания вандалоустойчивых конструкций.



Гетерогенное птицестойкое остекление для вертолетов



Аддитивные технологии вкупе с роботизацией и цифровизацией входят в перечень основного инструментария четвертой мировой промышленной революции. Сегодня перед странами стоит амбициозная задача активного формирования отраслей аддитивных технологий для обеспечения стратегического технологического суверенитета и превосходства в будущем.

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

Часть 2. Новые тенденции в прорывных технологиях неметаллических материалов



Начальник сектора НПК «РПО»
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина»,
канд. физ.-мат. наук
А. О. Забежайлов



Главный научный сотрудник
Института проблем химической физики РАН
д-р техн. наук, профессор
Р. А. Андриевский



Директор НИВЦ
МГУ им. М. В. Ломоносова,
д-р физ.-мат. наук, профессор
А. В. Тихонравов



Генеральный директор АО «АИРКО»
канд. техн. наук, доцент
А. А. Сотников

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ КЕРАМИКИ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Русин М. Ю., Забейжайлов А. О.

ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Представлены перспективные направления развития керамики для специальных применений, в частности, при создании новых образцов авиационной, космической и военной техники. На примере этих направлений показана важность и сложность стоящих перед исследователями и разработчиками задач в области специальной керамики.

Радиопрозрачная керамика для головных антенных обтекателей высокоскоростных ракет

Возрастающая роль ракетного оружия различных классов, непрерывный рост скорости и маневренности ракет, требований по точности наведения и дальности поражения цели определяют необходимость постоянного совершенствования радиопрозрачных керамических материалов. Для перспективных разработок высокоскоростных ракет нового поколения актуальной задачей является создание радиопрозрачной керамики, работоспособной при температурах более 1700 °С.

На сегодняшний день для создания обтекателей ракет, работающих на скоростях более 5 М, применяется кварцевая керамика. Однако при температурах более 1300 °С происходит изменение агрегатного состояния кварцевой керамики. Хотя экспериментально показано, что в конструкции антенных обтекателей материал за счёт низкой теплопроводности и высокой термостойкости может кратковременно выдерживать тепловое воздействие до 1700 – 2000 °С, но при этом происходит абляция материала.

Высокотемпературные материалы на основе нитрида кремния, обладая хорошими диэлектрическими характеристиками, высокой прочностью, стойкостью к окислению, низким температурным коэффициентом линейного расширения, являются одними из наиболее перспективных материалов антенных обтекателей высокоскоростных ракет.

Оптически прозрачная керамика

В настоящее время повышенный интерес вызывает прозрачная керамика из алюмомагниевого шпинели (АМШ) и оксинитрида алюминия как высокотемпературных материалов. Благодаря сочетанию высоких прочностных, диэлектрических и оптических характеристик они перспективны для создания совмещенных радио-, оптически- и ИК прозрачных конструкций современных систем наведения летательных аппаратов, а также бронезащитных конструкций.

Технология получения прозрачной АМШ – технически сложная и дорогостоящая. Она предполагает использование высокочистых нанодисперсных порошков и мощного высокотемпературного оборудования: горячих прессов, газостатов или установок искрового плазменного спекания.

В результате совместной работы трех организаций (АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск; Института химии высокочистых веществ им. Г.Г.Девятовых РАН, г. Нижний Новгород; ФГУП «Центр Келдыша», г. Москва) были получены образцы оптически прозрачной керамики диаметром до 30 мм и толщиной до 3 мм с уровнем пропускания в видимой и ИК-области спектра 80 %.

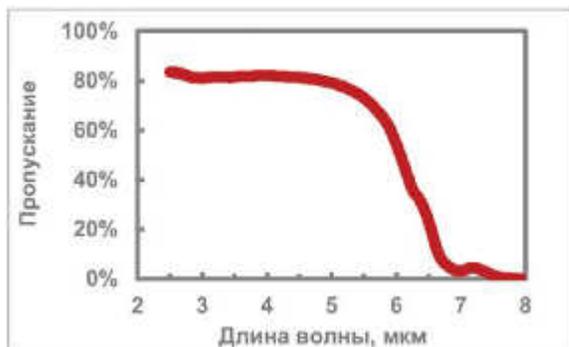


Рис. 1. Спектр пропускания оптически прозрачной керамики на основе алюмомагниево-шпинели

Керамические материалы в газотурбинных двигателях

Применение керамических материалов в газотурбинных двигателях (ГТД) связано с заменой элементов, изготавливаемых в настоящее время из высокотемпературных металлических сплавов: элементы камеры сгорания, надпорторные вставки, рабочие и сопловые лопатки. Такая модернизация позволит улучшить термодинамический цикл двигателя, повысить его эффективность, надежность, ресурс и снизить массу двигателя.

В СССР в 1970-1980-е годы проводились комплексные работы по созданию ГТД с керамическими элементами. Была разработана серия материалов и изделий, преимущественно на основе нитрида кремния, проводились стендовые испытания изделий. Но в 1990-х годах в связи с прекращением финансирования работы были остановлены.

На западе исследования по созданию ГТД с керамическими элементами не прерывались и на сегодняшний день достигли уровня сертификации двигателя с керамическими узлами для гражданской авиации. Они пошли по пути использования керамических композиционных материалов на основе SiC/SiC_f (керамические волокна SiC_f в матрице из SiC). Это позволило уйти от основных недостатков монолитной керамики – низких значений трещиностойкости и ударной вязкости.



Рис. 2. Керамические элементы из нитрида кремния для ГТД – разработки ОНПП «Технология»

Сверхвысокотемпературная керамика

Сверхвысокотемпературная керамика – перспективный класс неорганических конструкционных материалов, предназначенных для длительной эксплуатации в максимально жестких условиях. Обычно это бинарные соединения переходных металлов (цирконий, гафний, тантал) и легкого неметалла (бор, углерод, азот, кремний). Особое место в этом классе материалов занимают дибориды циркония и гафния.

Широкий интерес к этому классу материалов обусловлен перспективой их применения в конструкции гиперзвуковых летательных аппаратов, температура на поверхности которых может достигать более 2000 °С и традиционные тугоплавкие материалы неприменимы.

В АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» ведутся работы по получению и исследованию свойств сверхвысокотемпературной керамики на основе ZrB_2 и HfB_2 , полученной методом горячего прессования.

Таблица

Свойства сверхвысокотемпературной керамики на основе ZrB_2 и HfB_2

Параметры	ZrB_2 -SiC	HfB_2 -SiC
$\sigma_{изг}$ МПа	400-600	300-700
K_{Ic} МПа·м ^{1/2}	5,9	5,9
H_V ГПа	15,3	20
Теплопроводность Вт/м·К	~ 83	—

Аддитивные технологии – 3D печать

Интенсивно развивающаяся последние два десятилетия область – технология 3D печати. Первыми для печати были применены полимеры, затем металлы. Технология печати из этих материалов уже прошла стадию прототипирования и достигла уровня промышленного изготовления изделий. Печать керамики пока ещё не достигла такой степени развития, но уже получен ряд впечатляющих результатов.

Что же может дать 3D печать по сравнению с традиционными в керамике технологиями? Помимо широко известных преимуществ, таких как сокращение времени на освоение новой продукции, уменьшение стоимости изготовления единичных и мелкосерийных изделий, отсутствие необходимости в механической обработке, высокая точность изготовления деталей и многих других, можно выделить еще одно очень важное: используя 3D печать, можно создавать структуры уникальной формы с высоким разрешением, которые невозможно получить никакими традиционными методами. Это открывает возможность, используя вполне традиционные материалы, путем направленного моделирования внутренней геометрии изделий получать совершенно новые свойства.

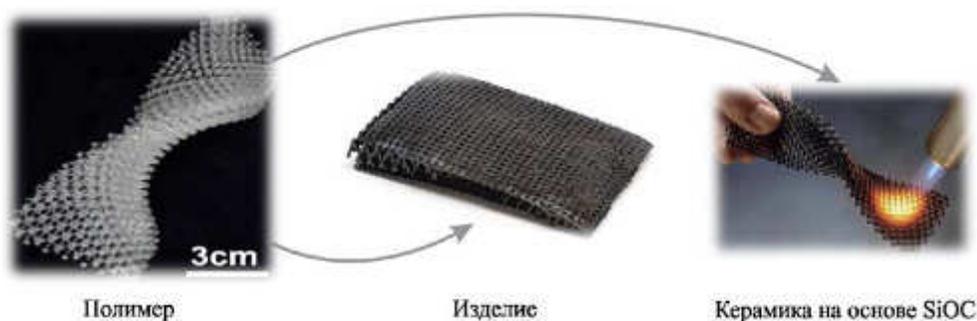


Рис. 3. Возможности 3D печати

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Андреевский Р. А.

Институт проблем химической физики РАН,
г. Черноголовка, Россия

Будучи по природе неравновесными, наноматериалы весьма чувствительны к влиянию высоких температур, воздействию облучения, деформационных нагрузок и коррозионной атмосферы. В этих, по существу, экстремальных условиях наноструктура может претерпевать необратимые изменения, превращаясь в обычную крупнозернистую структуру с неизбежной потерей высокого уровня физико-химических и механических свойств, первоначально присущих наноматериалам. В этой связи проблема их стабильности в экстремальных условиях имеет первостепенное значение. На примере наноматериалов на основе металлов, сплавов и тугоплавких соединений описано современное состояние экспериментальных и теоретических исследований в этой области [1,2]. Особый интерес в последнее время вызывают наноматериалы с двойниковой и градиентной структурой. Имеется много положительных примеров высокой устойчивости этих объектов воздействию экстремальных деформационных, температурных, радиационных и коррозионных воздействий, причем не только в изолированном виде, но и для комбинированных нагрузок типа температура + деформация или деформация + облучение. В докладе описываются лишь некоторые примеры поведения наноматериалов в условиях циклических нагрузок и других воздействий.

Целесообразно отметить очень важное качество двойниковых структур – с уменьшением величины зерна и ширины двойниковых ламелей повышается не только прочность, но и пластичность.

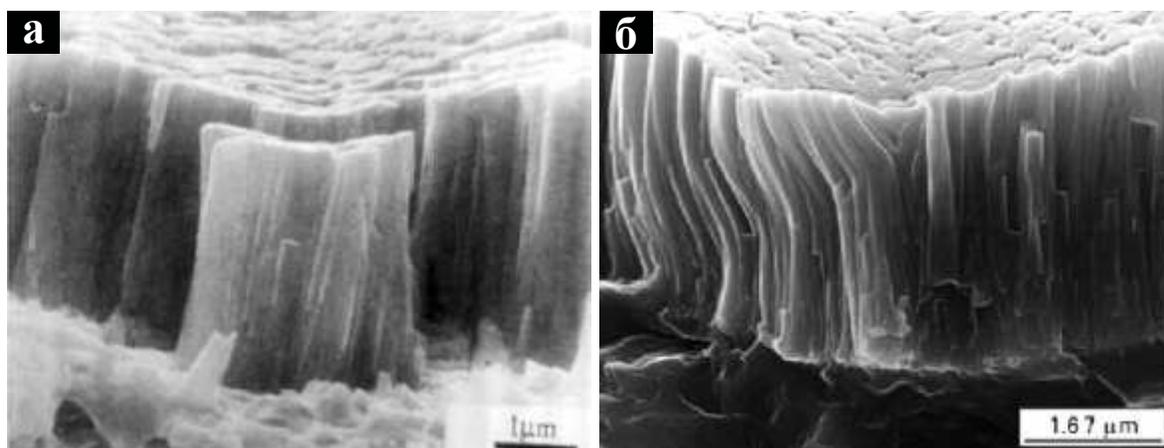
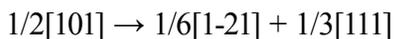


Рис. 1. Фрактограммы изломов пленки TiN со столбчатой структурой после индентирования: а) хрупкое разрушение; б) остаточная пластическая деформация

В отличие от взаимодействия дислокаций с большеугловыми границами зерен, когда на последних происходит нагромождение дислокаций, на границах типа матрица–двойник (МД) предполагается расщепление матричных краевых дислокаций по реакции типа:



с образованием частичных дислокаций Шокли с вектором Бюргерса $1/6$, скользящих по границам МД, и дислокаций Франка с вектором Бюргерса $1/3$, которые пересекают эти границы. Эта ситуация обеспечивает повышение и прочности, и пластичности с уменьшением размера структурных элементов, когда скользящие дислокации Шокли ответственны за пластичность, а пересекающие дислокации Франка ответственны за прочность.

Характерно также отличие в поведении наноматериалов, полученных методом равноканального углового прессования (РКУП) и измельчением поверхности с помощью давящего наконечника с образованием градиентной двойниковой структуры. Если положительная роль измельчения структуры на усталостные характеристики отмечается для обоих методов получения наноматериалов, то деградация повышения амплитуды напряжений с ростом количества циклов весьма заметна в случае образцов, изготовленных РКУП [3], и практически отсутствует для объектов с градиентной структурой [4].

Аналогичное влияние поверхностного измельчения структуры на усталостные характеристики наблюдается также для нержавеющей стали [5,6], однако ситуация в случае гигацикловой усталости, когда накопление дефектов на многочисленных межзеренных границах может приводить к интенсивному образованию трещин и разрушению, нуждается в дополнительном детальном изучении.

Обратим внимание на стабильность поверхностей раздела в образцах, которые получены методом многократной пакетной прокатки. Полосчатая структура этих наноккомпозитов с шириной слоев около 20 нм может противостоять высоким нагрузкам с величиной истинных деформаций более 12, а также нагреву до температур более $0,45T_{пл}$ и быть радиационно стойкой при облучении ионами He (поток 10^{17} ионов/см²) [7].

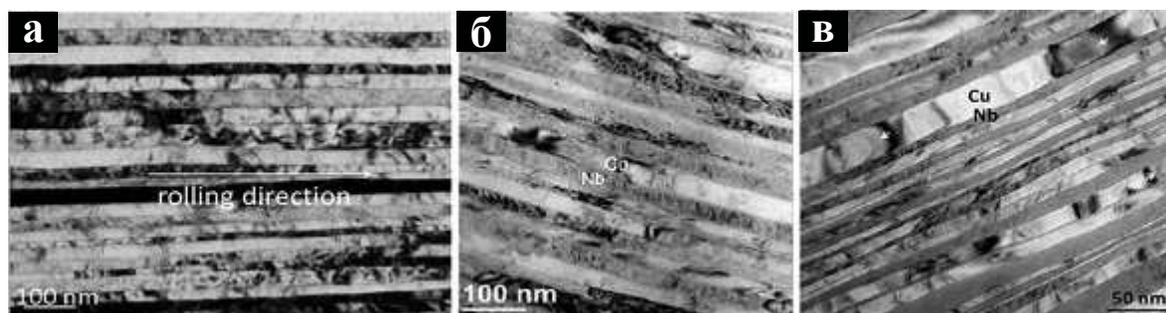


Рис. 2. Свойства многослойных наноккомпозитов Cu/Nb (h-20 nm), полученных совместной прокаткой, после деформации (а), отжига при 500 °С (б) и облучения ионами He (в)

В заключение интересно отметить, что положительное влияние двойниковой структуры наблюдается не только для металлов, но также и в случае типичных сверхтвердых материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора, для которых зафик-

сировано повышение твердости, вязкости разрушения и температуры начала окисления при переходе от обычной нанокристаллической структуры к нанодвойниковой [8,9].

Таким образом, имеется немало примеров применения наноматериалов с двойниковой и градиентной структурой в экстремальных условиях. Это делает актуальными дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования в особенности для длительной эксплуатации.

Литература

1. R.A. Andrievski, A.V. Khatchoyan. *Nanomaterials in Extreme Environments. Fundamentals and Applications*. Springer International Publishing.– Switzerland, 2016.– 107 p.
2. Андриевский Р.А. *Наноматериалы металлического типа в экстремальных условиях*.– М.: Лаборатория знаний, 2016.– 102 с.
3. R.H. Li, Z.I. Zhang, P. Zhang, Z.F. Zhang // *Acta Mater.*– 2013.– № 61.– P.2857.
4. L. Yang, N.R. Tao, K. Lu, L. Lu // *Scr. Mater.*– 2013.– № 68.– P.801.
5. Добаткин С.В., Терентьев В.Ф., Скродцки В., Рыбальченко О.В. // *Металлы*.– 2012.–№ 6.– С.45.
6. H.W. Huang, Z.B. Wang, J. Lu, K. Lu // *Acta Mater.*– 2015.– № 87.– P.150.
7. I.J. Beyerlein, J.R. Mayeur, S. Zheng, N.A. Mara, J. Wang, A. Misra // *Proc. NAS.*– 2014.– № 111.– P.4386.
8. Y. Tian, B. Xu, D. Yu, Y. Ma, Y. Wang, Y. Jiang, W. Hu, C. Tang, Y. Gao // *Nature.*– 2013.– № 493.– P.385.
9. Q. Huang, D. Yu, B. Hu, W. Hu, Y. Ma, Y. Wang, Zh. Zhao, B.Wen, J. He // *Nature.*– 2014.– № 510.– P.250.

МНОГОСЛОЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ – КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Тихонравов А. В.

НИВЦ МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Области применения многослойных оптических покрытий охватывают практически все спектральные диапазоны: от рентгеновского диапазона до ИК. История развития оптических покрытий насчитывает уже более 80 лет, начиная с первых просветляющих покрытий для фотоаппаратов (Smakula, 1935; W. Geffcken, German Patent 742 463, 1942). Следует отметить, что первая монография на эту тему была издана в СССР (Просветление оптики, 1946). В настоящее время оптические покрытия – это тысячи компаний и объемы производства в миллиарды долларов. Они являются ключевыми элементами многих современных технологий: лазерная и рентгеновская литография, солнечные батареи, передача информации (WDM, Blue ray технологии), космические телескопы и т.д. Оптические покрытия имеют широчайший спектр применений и в повседневной жизни. История развития технологий напыления покрытий началась с простейших стеклянных вакуумных камер с термическим испарением материалов и вышла в последние годы на уровень, при котором используются десятки новых высокоэнергетических процессов напыления (например, технологии магнетронного распыления, позволяющие создавать зеркала для лазеров с рекордно короткими длительностями импульсов). Наша страна занимает ведущее положение в мире по разработке методов проектирования оптических покрытий и всего комплекса программного обеспечения, необходимого для практической реализации разработанных конструкций покрытий на современных напылительных установках. Начало работ в этом направлении инициировали выдающиеся ученые, академики – Андрей Николаевич Тихонов и Рем Викторович Хохлов. В нашей стране разработан основной современный метод проектирования покрытий - метод игольчатых вариаций, позволяющий рассчитывать покрытия любой сложности для всех современных приложений. Проводимые российскими специалистами в настоящее время исследования позволяют ожидать в ближайшие годы дальнейшего значительного прогресса в области оптических покрытий, в частности, за счет разработки и внедрения новых методов оптического контроля процессов напыления покрытий.

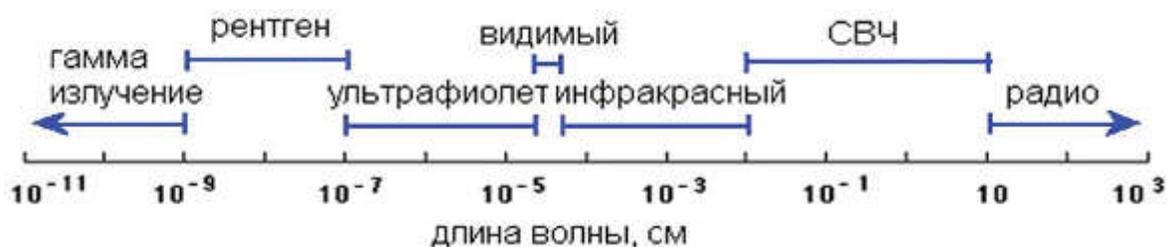


Рис. 1. Спектральные диапазоны области применения многослойных оптических покрытий: от рентгеновских лучей до ИК



Рис. 2. Спектр применения многослойных оптических покрытий

КЛАСТЕРНАЯ ПОЛИТИКА КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ. ПРАКТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ФОРМИРОВАНИЯ КЛАСТЕРА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Сотников А. А.

АО «АИРКО», г. Обнинск, Россия

К факторам успеха территорий инновационного развития можно отнести следующие:

- способность генерировать новые знания и технологии и готовить квалифицированные исследовательские, инженерные и управленческие кадры;
- наличие успешных бизнесов, присутствие транснациональных корпораций, обеспечивающих экономическую устойчивость территории;
- эффективные механизмы кредитования бизнеса, венчурного финансирования, финансовой поддержки зарождающегося бизнеса;
- благоприятные условия для зарождения, выживания и развития малого и инновационного бизнеса;
- экономика кластерного типа с фокусированием на наиболее перспективных отраслях;
- нематериальный фактор (комфортная среда для проживания);
- «Тройная спираль» эффективного взаимодействия власти, образования и науки, бизнеса;

Для постиндустриальной сетевой экономики, характеризующейся суперконкурентной рыночной средой, наиболее эффективны инновационные кластеры с матрицей тройной спирали, поскольку они дают синергетические эффекты инновативности (рис.1).

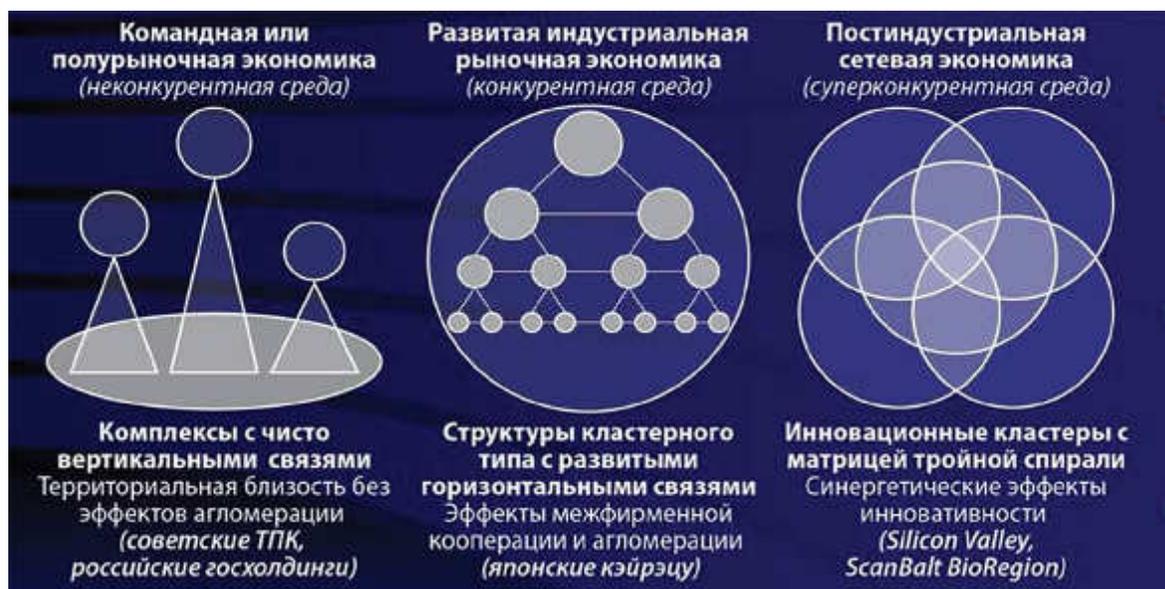


Рис. 1. Типовые модели сетевых структур

Целью создания кластеров является стремление обеспечить свою стратегическую устойчивость и повысить конкурентоспособность посредством получения синергетических эффектов от определенной координации юридически самостоятельной деятельности и интеграции части ресурсных и инфраструктурных возможностей. Координация и интеграция требуют создания соответствующих организационно-структурных решений, которые используются, в том числе, для выражения и лоббирования интересов кластера во взаимоотношениях с властью, крупным бизнесом, инвесторами. Кластеру становится доступным большой масштаб деятельности, «выращивание» у себя новых проектов или интеграция с крупным бизнесом.

В Калужской области успешно функционирует несколько региональных институтов развития. Государственным оператором по созданию и развитию промышленных парков и инженерной инфраструктуры является Корпорация развития Калужской области. Агентство инновационного развития – центр кластерного развития Калужской области выступает в качестве государственного оператора по развитию инновационного и высокотехнологичного сектора экономики. В задачи АИРКО входит:

1. Представление и защита интересов участников в федеральных и региональных органах власти;
2. Наличие единой и понятной для всех участников стратегии развития до 2020 года;
3. Совместное решение вопросов подготовки и переподготовки кадров;
4. Создание и развитие общих сервисных компетенций.

В регионе создано несколько территориальных кластеров, в том числе: автомобильный, фармацевтический, информационно-коммуникационных технологий, агро-промышленный, композитный, туристско-рекреационный. Планируется создание ядерного и образовательного кластеров.

«Кластер авиационно-космических технологий полимерных композиционных материалов и конструкций Калужской области» (АКОТЕХ) был создан в 2014 году в условиях острой необходимости возрождения отечественной индустрии композиционных материалов на базе Государственного научного центра Российской Федерации «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» при активной поддержке АИРКО. Стратегическая цель создания кластера - содействие его участникам в формировании на территории Калужской области высокотехнологичного комплекса взаимосвязанных производств и объектов региональной инфраструктуры для проведения совместных научных исследований и разработок и инновационных проектов с целью производства гражданской продукции широкого применения из композиционных материалов с использованием высоких уникальных авиационно-космических технологий.

Сегодня в кластер входит 20 организаций, работающих в производственной, научной и образовательных сферах, а также инфраструктурные организации поддержки инновационной деятельности.

Благоприятный инновационный климат Калужской области, удачное географическое положение, наличие в составе кластера ведущего инновационного предприятия композитной отрасли России, поддержка со стороны высшего руководства Региона, продуманная стратегия, понимание перспектив и востребованность рынка в инновационной продукции, позволяют с уверенностью говорить, что Кластер авиационно-космических технологий полимерных композиционных материалов и конструкций Калужской области – это новый центр компетенций композитной отрасли, с большим потенциалом.







Секция 1. ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КОМПОЗИТНЫХ АГРЕГАТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Гайдачук В. Е.¹, Кондратьев А. В.¹, Чесноков А. В.²

¹ Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков, Украина;

² ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта», г. Калининград, Россия

Опыт ведущих мировых исследовательских центров и фирм, занимающихся разработкой и эксплуатацией объектов авиационной и ракетно-космической техники (РКТ), показывает, что создание современных, конкурентоспособных образцов летательных аппаратов невозможно без все более широкого применения композиционных материалов. Однако для успешной реализации потенциальных возможностей этих материалов требуется разработка новых подходов к созданию эффективных конструктивно-силовых схем (КСС) и конструктивно-технологических решений (КТР) с повышенными требованиями к их несущей способности и жесткости для всего спектра внешних воздействий.

Доклад посвящен изложению некоторых основных результатов, полученных к настоящему моменту времени коллективом авторов.

Представлены результаты анализа современного состояния применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в существующих агрегатах РКТ. Проанализировано состояние комплексной проблемы создания эффективных конструкций РКТ.

Разработана концепция оптимизации и реализующий ее проектный комплекс выбора рациональных конструктивно-технологических параметров агрегатов РКТ из ПКМ, подверженных разнородному нагружению, что позволило решить комплекс задач обоснованного выбора конструкционных материалов и взаимосвязанных с ним задач синтеза КСС агрегатов и КТР узлов, деталей и соединений с учетом ограничений существующего уровня их производства.

Применительно к объектам РКТ синтезирован классификатор показателей качества, обоснованы математические модели их квалитетических характеристик и методы их определения. Раскрыты фундаментальные характеристики полимерных композитов и их роль в обеспечении интегрального показателя качества изделия. Получены количественные зависимости приращений показателей качества всех иерархических уровней, использование которых после установления экспертным путем их весовых коэффициентов позволит прогнозировать эффективность синтезирующих решений для типовых элементов конструкций РКТ из ПКМ. Предложена многоуровневая классификация технологических дефектов, возникающих в процессе производства конструкций РКТ из ПКМ, позволяющая

с достаточной для практики точностью выявлять и систематизировать средства и способность их нейтрализации или снижения в производстве путем реализации существующих математических моделей и основанных на них методик анализа количественных характеристик индивидуального и интегрального влияния типовых дефектов.

Проведены исследования технологических дефектов в агрегатах РКТ из ПКМ геометрического вида, относящихся к классу нарушений сплошности в дискретных объемах структур ПКМ, что позволило установить допуски на физико-механические характеристики (ФМХ) композита, связанные с наличием в нем пористости, трещиностойкости и усталости, а также локальными поводками изделия и соответствующей им напряженностью термонеравновесных структур. Установлен иерархический порядок трехуровневой системы обнаружения дефектов структуры ПКМ, возникающих в процессе подготовки и производства изделий из композитов. Проведен анализ причин возникновения и типовых видов дефектов сплошности ПКМ, являющихся первопричиной снижения эксплуатационного качества элементов композитных конструкций и их ресурса. Предложена схема обнаружения трех уровней дефектов структуры ПКМ прямыми и опосредствованными методами контроля степени дефектности материала.

Разработана система научно-технического обеспечения стабилизации и повышения функциональных характеристик композитных заполнителей, широко применяемых в сэндвичевых агрегатах РКТ. В ее рамках реализован подход к получению величин приведенных характеристик различных типов композитных заполнителей сэндвичевых конструкций, в основе которого лежит методология информационной поддержки, позволяющая выявить предельно возможный уровень их характеристик без проведения дорогостоящих натурных испытаний реальных опытных образцов. Приведены примеры практической реализации предложенной методологии применительно к сотовому, трубчатому, гофрированному и складчатому заполнителям. Разработаны теоретические основы общего метода корректировки математических моделей свойств физических объектов с использованием экспериментальных данных, на базе которых предложен и реализован частный метод целенаправленной корректировки ФМХ композитных заполнителей наложением их матриц, построенных с учетом ограничений на входящие в них параметры.

Предложен комплексный подход к оптимальному проектированию несущих отсеков головного блока ракеты-носителя различных КСС, отличительной чертой которого является возможность многофакторной оптимизации параметров агрегатов рассматриваемого класса при обеспечении регламентированной несущей способности при одновременном силовом и тепловом нагружении с учетом технологических ограничений, соответствующих существующему уровню их производства. Реализация предложенного подхода при оптимизации параметров сэндвичевой КСС головного обтекателя ракеты-носителя космического назначения позволила обеспечить снижение его массы более чем на 20 %.

Разработан концептуальный подход к синтезу рациональных параметров композитных каркасов панелей солнечных батарей различной КСС космического назначения, позволивший обеспечить принципиальную возможность реализации их поверхностной массы в пределах 0,55–0,6 кг/м².

Разработан и реализован алгоритм определения рациональной структуры пакета полимерного композита, обеспечивающий компромиссное сочетание абсолютных величин коэффициентов линейного термического расширения для максимальной прецизионности изделий космического назначения.

Проанализирована концептуальная возможность создания конструкций космического назначения из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), позволяющих существенно увеличить их прецизионность. Синтезированы приближенные зависимости ФМХ и прочностных свойств получаемого УУКМ на основе теории армирования в механике полимерных композитов, с помощью которых проведен анализ степени и характера изменения терморазмеростабильности структуры полимерного композита после ее карбонизации и превращения в УУКМ. С помощью приближенных критериев оптимизации структуры УУКМ, обеспечивающих ее максимальную прецизионность при различных коэффициентах приоритетности ее направления, исследован пакет с ориентацией группы термонеровесных слоев в сравнении с аналогами из ПКМ. Проведен анализ преднапряженности, термонеровесности и формостабильности обшивок панелей из УУКМ в сравнении с аналогами из ПКМ. Приведен пример оптимального проектирования прецизионной конструкции космического назначения – монолитного углепластикового корпуса сканера высокой разрешающей способности в составе космического аппарата.

В заключение доклада изложены основные результаты научного обеспечения и сопровождения производства опытных композитных агрегатов РКТ в ряде организаций авиационного и ракетно-космического профиля. Показано, что полученные результаты позволили обеспечить существенное повышение их массовой эффективности.

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АНТЕННЫХ РЕФЛЕКТОРОВ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Биткин В. Е.¹, Гаврилова Е. А.¹, Ерёмин С. А.¹, Гордеев С. А.¹,
Альшина С. А.¹, Зайченко А. С.¹, Шлаферов А. Л.², Тихонов А. А.²*

¹ ООО «СКТБ «Пластик», г. Сызрань, Россия;

² ФГУП «РНИИРС», г. Ростов-на-Дону, Россия

Рассмотрены вопросы проектирования и расчёта оболочек вращения как составных элементов параболических антенн, выполненных из композиционного материала (КМ) – углепластика.

За критерий проектирования принята стабильность геометрической формы. Любые случайные и периодические ошибки в изготовлении профиля рабочей поверхности в совокупности приводят к уменьшению коэффициента усиления антенны. При этом важным вопросом является выбор материала конструкции с малым температурным коэффициентом линейного расширения, малой плотностью, высокими жёсткостью и прочностью.

Из многообразия внешних факторов, влияющих на формостабильность и размерную устойчивость, выделено температурное поле. Проанализировано динамическое поведение конструкции в части анализа собственных частот и форм колебаний.

Проведён анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований размерной стабильности конструкций односторонне подкреплённых рефлекторов. Изучены методы управления деформативностью оболочек на базе выбора наилучшей расчётной модели [1] с использованием программного комплекса метода конечных элементов «NASTRAN» [2].

В качестве конструкции зеркальной антенны рассмотрено антенное зеркало, рабочая поверхность которого – это эллиптическая вырезка из параболоида вращения с габаритным размером по длине, равным 1,4 метра. Проведён сравнительный анализ результатов конечно-элементного анализа антенного зеркала для двух типов углепластиков:

1) низкомодульного на основе углеродной ленты ЛУ-П/0,1 и полимерной матрицы эпоксидного типа;

2) высокомодульного на основе препрега М55J/НИИКАМ-РС.

На рис. 1 представлен вид рабочей поверхности зеркала.

За основу технологии изготовления антенного зеркала предложен принцип совмещённого во времени формования всех элементов конструкции. Основной особенностью данного способа изготовления является применение термокомпрессионного метода в комбинации с автоклавным формованием изделий из КМ. Принцип такой комбинации заключается в том, что формование пакета препрегов во взаимно перпендикулярных плоскостях осуществляется избыточным давлением в автоклаве и упругой деформацией терморасширяющихся оправок, помещённых во внутренних полостях заготовки [3]. Для создания радиоотражающего покрытия методом магнетронного напыления на рабочую поверхность зеркала было нанесено двухслойное покрытие, состоящее из слоёв алюминия и стали (для защиты от коррозии), толщиной 3-5 мкм.

В качестве расчётной модели конструкции антенного зеркала с эксцентричным дискретным подкреплением предлагается схематизация пространственной тонкостенной системы в виде конструктивно-анизотропной модели. При проектировании конструкции при выборе схемы армирования и структуры стрингерного набора учтена вероятность появления коробления изготовленного изделия в процессе температурного формования в виде деформаций изгиба и закручивания в форме пропеллера [4, 5]. Рассмотрено несколько вариантов силовых каркасов подкрепления тонкой оболочки зеркала, исследовано поведение конструкций силовых каркасов на изгибную и крутильную нагрузки.

На основании проведённого сравнительного анализа выбрана схема подкрепления оболочки, содержащая центральные осевые, окружные и диагональные ребра. В качестве основного варианта армирования композита рекомендовано использовать квазиизотропную структуру $(0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ)_{2n}$, удовлетворяющую требованиям по осевой и сдвиговой жесткости.



Рис. 1. Вид рабочей поверхности антенного зеркала



Рис. 2. Конечно-элементная модель зеркала. Фрагмент готового изделия

На рис. 2 приведена конечно-элементная модель конструкции зеркала, выполненная с использованием двумерных конечных элементов, и фрагмент сформованного изделия из углепластика на основе углеленты ЛУ-П/0,1 и связующего ЭНФБ. Готовое изделие выполнено со среднеквадратическим отклонением рабочей поверхности зеркала от теоретической поверхности, равным 0,15 мм.

Предложенный подход к проектированию односторонне подкреплённой размеростабильной конструкции зеркальной антенны параболического типа из композиционного материала позволяет обеспечить достаточную жёсткость и прочность (с коэффициентом запаса по прочности $\geq 1,5$) в условиях эксплуатации при минимальной массе. Относительные расчётные деформации конструкции зеркала по отношению к габаритным размерам не превышают значения $1,0 \times 10^{-4}$. Собственные частоты колебаний конструкции зеркала превышают 70 Гц независимо от материала углепластика.

При применении высокомодульного материала деформации конструкции зеркала уменьшаются на 55 %, величина первой собственной частоты увеличивается в 1,5 раза.

Погрешность моделирования конструкции с применением метода конечных элементов в сравнении с экспериментальными данными – порядка 12 %. Данная погрешность объясняется и технологией формования, и погрешностью самого метода конечных элементов.

Литература

1. Алфутов Н.А. Расчёт многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Попов.– М.: Машиностроение, 1984.– 264 с.: ил.
2. Рычков С.П. MSC.visualNASTRAN для Windows / С.П. Рычков.– М.: НТ Пресс, 2004.– 552 с.: ил. (Проектирование и моделирование).
3. Биткин В.Е. Апробирование технологического комплекса изготовления силовых и высокоточных размеростабильных элементов конструкций интегрального типа из волокнистых композиционных материалов / В.Е. Биткин [и др.] // Известия Самарского научного центра РАН.– 2014.– Т.16, № 1(5).– С.1320-1327.
4. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988.– 272 с.
5. Молодцов Г.А. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов, Ф.Ф. Урмансов. – М.: Машиностроение, 2000.– 323 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОЙ АНТЕННОЙ ПЛАТФОРМЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Климакова Л. А., Кореванов Р. В.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Одним из важнейших направлений развития современной космической техники является создание крупногабаритных антенных систем внешнего размещения для космических аппаратов (КА) связи и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Вследствие функционирования в широких диапазонах изменения температуры при эксплуатации на орбите, ввиду больших габаритов, а также из-за дополнительного нагружения инерционно-массовыми силами при консольной навеске к корпусу КА раскрываемые платформы внешнего размещения отличаются повышенными требованиями к жесткости и термической стабильности. По этим причинам они выполняются в виде корпусных конструкций из полимерных углепластиков (рис. 1).

Исследование и оценка осевой термостабильности антенной платформы выполнялись двумя способами: конечно-элементным моделированием деформационного поведения конструкции и прямым измерением ее осевых перемещений в ходе термовакуумных испытаний.

Конечно-элементное моделирование проводилось в программной среде NASTRAN при температурном нагружении, соответствующем штатному режиму эксплуатации на орбите антенной платформы в составе КА (от -45 до $+45$ °С). Тон-

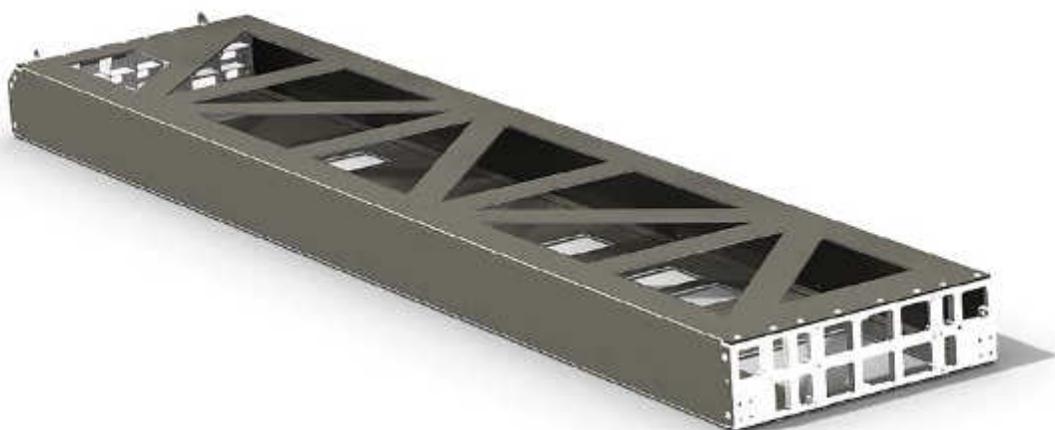


Рис. 1. Углепластиковая антенная платформа КА ДЗЗ с металлическими торцевыми фланцами

костенные углепластиковые детали конструкции (нижняя и верхняя панели, две боковые стенки) моделировались четырёхугольными оболочечными элементами типа Plate, а торцевые металлические фланцы – объемными элементами Solid. Клеевые и механические соединения между деталями платформы образованы путем слияния общих узлов смежных конечных элементов. Консольная заделка платформы на корпусе КА моделировалась закреплением по узлам навески переднего фланца.

В качестве термоупругих характеристик углепластиковых элементов платформы в конечно-элементной модели принимались фактические показатели, полученные при испытании образцов-фрагментов натурной конструкции.

Термовакуумные испытания натурной антенной платформы проводились при рабочем давлении $6 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-6}$ мм рт. ст. в камере, оснащенной инфракрасными излучателями (ИКИ) и имитаторами солнечного излучения (ИСИ). При этом имитировалась тепловая нагрузка, соответствующая режиму переходной орбиты КА и максимально приближенная к условиям штатного функционирования изделия.

Антенная панель устанавливалась на поворотном столе вертикально под определенным углом к ИКИ и ИСИ и была оборудована макетами приборов, идентичными по теплофизическим характеристикам штатным устройствам. На поверхности платформы размещались температурные датчики и тарировочные метки, по которым с помощью лазерного трекера, установленного за пределами камеры, определялись их координаты. Предельная погрешность измерения температуры и линейных смещений составляла $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ и 15 мкм , соответственно.

Съем показаний температурных датчиков и координат положения меток платформы производился в режиме реального времени после достижения всеми элементами конструкции квазистационарной температуры. Средняя температура платформы при испытании находилась в диапазоне от -25 до $+25 \text{ } ^\circ\text{C}$, при этом вследствие неоднородности теплового поля для отдельных сечений конструкции перепад температуры составил от -40 до $+30 \text{ } ^\circ\text{C}$.

В таблице представлены фактические характеристики термостабильности (осевое перемещение и осевой термический коэффициент линейного расширения) антенной платформы, а также расчетные значения, полученные при конечно-элементном моделировании. Анализ данных позволяет сделать вывод о достоверности примененного метода прогнозирования термодформационного поведения антенной платформы на основе фактических свойств ее элементов.

Таблица

Параметр	Расчет	Испытания	
	от -45 до $+45 \text{ } ^\circ\text{C}$	от -25 до $+25 \text{ } ^\circ\text{C}$	от -40 до $+30 \text{ } ^\circ\text{C}$
Осевое перемещение, мм	0,19 (на базе 3,5 м)	0,11 (на базе 3,4 м)	0,15 (на базе 3,4 м)
Осевой термический коэффициент линейного расширения, $\times 10^{-6} \text{ 1/ } ^\circ\text{C}$	+0,60	+0,62	+0,65

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАЗМЕРОСТАБИЛЬНОЙ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПКМ

Кравченко Е. А., Богданова О. С., Серезин С. С.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

На протяжении нескольких десятилетий в изделиях ракетно-космической техники проводится замещение легких металлических сплавов полимерными композиционными материалами (ПКМ), что является неотъемлемой частью усовершенствований, связанных с возрастающими требованиями к агрегатам космического назначения. Помимо удельных упругих и прочностных характеристик, в несколько раз превышающих характеристики традиционных материалов, ПКМ обладают низкими значениями термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР), позволяя изготавливать размеростабильные конструкции высокой массовой эффективности. В составе космических систем, где на качество работы системы влияет стабильность геометрической формы и размеров, определяющих взаимное расположение приборов при эксплуатации, данные свойства ПКМ играют ключевую роль.

В работе представлены основные аспекты изготовления размеростабильной несущей конструкции из ПКМ на примере одной из его деталей, представленной на рисунке; описаны основные этапы производства; показана двухстадийная технология изготовления изделия интегрального типа со множеством внутренних ребер и опоясывающим фланцем по контуру.

В ходе конструктивно-технической проработки рассматриваемой детали был решен целый комплекс задач, основными из которых являлись:

- повышение технологичности изготовления путем уменьшения количества ребер силового набора без потери требуемой жесткости детали;

- разработка схемы армирования, способной обеспечить изделие необходимыми физико-механическими характеристиками;

- разработка технологической концепции изготовления детали;

- проведение комплекса работ по изготовлению сложной оснастки для формования детали.

Особенность данной детали состоит в том, что помимо коробчатых элементов 1, 2, 3, 4, из которых она состоит, изделие по контуру имеет опорный фланец 5. Коробчатые элементы соединяются с образованием ребер 6 толщиной до 4 мм, а стенки детали составляют от 6 до 8 мм в различных зонах.

Для обеспечения одинакового ТКЛР во всех элементах детали была выбрана схема армирования, предполагавшая набор толщины изделия из пакетов с углами армирования 0° , 90° , $+45^\circ$, -45° , -45° , $+45^\circ$, 90° , 0° . Проведенный предварительный анализ вы-

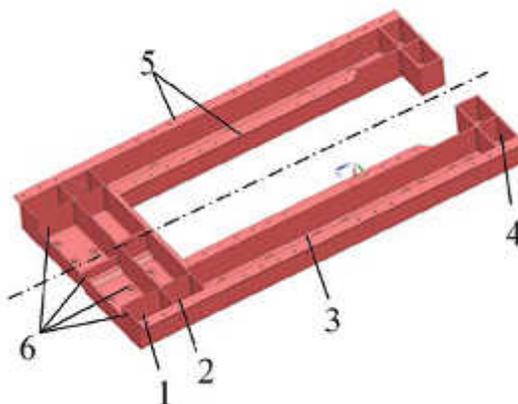


Рис. 3D модель детали

бранной схемы армирования в программном приложении «Композит» подтвердил соответствие физико-механическим характеристикам пакета заявленным в КД требованиям.

Конструктивные особенности детали требовали нестандартных подходов при проектировании технологии ее изготовления. Для оформления внутренних ребер была предложена блочная технология, предполагающая формирование детали из отдельных блоков и сборка их между собой на этапе выкладки материала. Также была разработана схема укладки слоев, учитывающая разнотолщинность стенок и ребер изделия, пространственные переходы пакетов от одной поверхности к другой. Однако рассмотрение процесса формования изделия за один переход в динамике обозначил ряд проблем, которые ухудшали качество изделия.

После анализа проблемных моментов формования была принята следующая концепция изготовления. Деталь изготавливалась в две стадии. Первая заключалась в следующих операциях:

- формирование блоков - выкладка материала на жесткие оправки;
- сборка блоков между собой с обеспечением подвижности в направлении упрессовки внутренних ребер;
- формование заготовки - полимеризация материала блоков с образованием внутренних ребер и части слоев наружного контура.

На второй стадии производились операции:

- выкладка клея на заготовку, полученную на первой стадии;
- выкладка материала, перекрывающего блоки, с формированием фланцев;
- формование детали.

В ходе проведенной работы получены следующие основные результаты:

- оптимизирована конструкция силового подкрепления детали, чем повышена технологичность изготовления;
- проведен анализ формования блоков, учитывающий упрессовку материала в зоне внутренних ребер детали, позволивший внести корректировку схем выкладки сложного многореберного изделия и способа его изготовления;
- предложена концепция технологии изготовления интегральной композитной структуры, имеющей внутренние ребра и предполагающей формование от внутреннего контура из ПКМ на основе препрега;
- разработана разборная технологическая оснастка для двухстадийного формования изделия, при котором формирующей поверхностью на второй стадии выступает заготовка изделия, полученная на первой стадии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРОВ ТРДД ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Афанасьев Д. В., Каримбаев Т. Д., Луппов А. А.

ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», г. Москва, Россия

На базе доступной литературы выполнен анализ 50-летней истории создания ведущими двигателестроительными фирмами мира (Дженерал Электрик, Роллс-Ройс, Пратт Уитни, Снекма) рабочих лопаток вентиляторов ТРДД из углепластиков. Такие качества лопаток из углепластика, как низкая масса, управляемые характеристики

прочности, жесткости, внутреннего сопротивления, снижение затрат на техническое обслуживание и даже на изготовление делают их безальтернативными для применения в вентиляторах ТРДД большой степени двухконтурности.

Опыт показывает, что одной из ключевых проблем при создании рабочих лопаток вентиляторов из ПКМ является обеспечение их стойкости к удару посторонними предметами и, прежде всего, удару птицы. Фирмы решают проблему в основном за счет применения компонентов ПКМ с соответствующими характеристиками и некоторых технологических инновационных решений. Но даже с лучшими в мире характеристиками ПКМ им приходилось создавать лопатки из углепластика более толстыми, чем металлические лопатки, использовать их при относительно меньших окружных скоростях, что, безусловно, сказывается на характеристиках современных вентиляторов.

С учетом зарубежных достижений, совершенствования отечественных материалов и возможностей в ЦИАМ формируется производственный облик рабочих лопаток вентиляторов ТРДД. На основе разработки, изготовления и испытаний как материалов лопаток, так и экспериментальных, в том числе полноразмерных лопаток в размерности изделий ПС-12, ПД-14 создан комплекс технологических мер, позволяющий обеспечить повышенную технологическую готовность рабочих лопаток вентиляторов ТРДД большой степени двухконтурности.

НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА – ЛАЗЕРНАЯ ГАЗОПОРОШКОВАЯ НАПЛАВКА

Жобер Б.

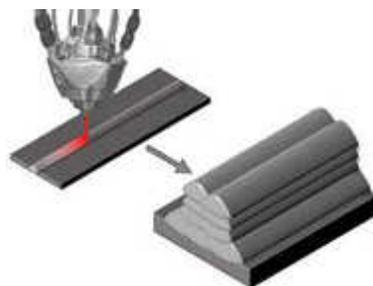
Компания «Fives», г. Париж, Франция

Наше предприятие

Первый европейский производитель станков аддитивного производства с использованием технологии LMD. Молодое, быстро развивающееся предприятие в г. Страсбурге, Франция. Предприятие, отделившееся от Французского Научно-Исследовательского Института Лазерных Технологий IRE PA, обладающего 15-летним опытом работы в области применения технологии LMD.

Прямая лазерная газопорошковая наплавка - LMD.

Laser Metal Deposition, или *DED - Direct Energy Deposition*. Металлический порошок наплавляется при помощи лазера и наносится слой за слоем, в точности соблюдая размеры и качество материала при создании формы благодаря системе ЧПУ.



Инновационные применения

Прямое 3D-изготовление



Добавление форм



Ремонт



Интеграция систем контроля. Последовательное/постепенное использование разных материалов

Конкретный пример: снижение затрат при ремонте критических деталей турбины авиационного двигателя

LMD – это зрелая технология (TRL9), которая отвечает самым высоким стандартам качества. Установки VeAM получили наивысшую авиационную квалификацию для ремонта деталей из титана и сплавов на основе никеля с использованием технологии LMD.

Стабильность и надежность: более 800 отремонтированных деталей повторно введены в эксплуатацию на воздушных судах.

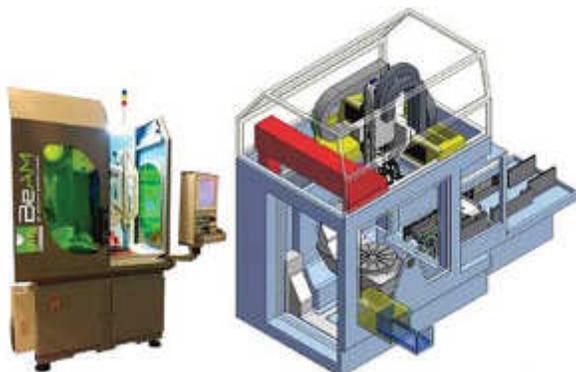
Весомые преимущества с точки зрения логистики: возможность проведения ремонта на месте, вместо длительных сроков и дорогой поставки запчастей.

Широкий спектр используемых материалов: Титан. Стали и нержавеющей стали. Сплавы на основе никеля. Сплавы на основе кобальта. Другие.

Совместная инновация «Открытая инновация»

Чтобы сохранить наше технологическое лидерство мы сотрудничаем с научно-исследовательскими институтами и университетами. Мы предлагаем осуществить полную передачу ноу-хау данным организациям для создания местных экспертных центров технологии LMD.

Модельный ряд промышленных станков



MODULO 400x400x400 мм

MODULO 2.0 1200x800x800 мм

Станки, разработанные с нашим промышленным партнером, компанией Fives, специально для применения технологии LMD:

- 5-координатная непрерывная обработка
- Высокая точность траекторий.
- Модульные установки с потенциалом модернизации
- Широкий спектр используемых порошков
- Камера с контролируемой атмосферой

Мы предлагаем широкий выбор дополнительных опций и можем разработать специальные станки в соответствии с требованиями Заказчика.

Программное обеспечение ВеАМ.

Программное обеспечение разработано компанией ВеАМ на базе пакета ПО DELCAM и специально предназначено для технологии LMD.

Это удобное в эксплуатации ПО, очень эффективное для программирования оптимизированных траекторий нанесения.



Сопла нанесения для любых промышленных потребностей



Стандартные сопла с шириной нанесения от 0,8 до 5 мм.

Возможность разработки и изготовления специальных сопел нанесения.

Волоконный лазерный источник ф. IPG мощностью от 500 до 4000 Вт.

Глобальная поддержка всех наших Заказчиков.

ВеАМ является экспертом в области технологии LMD, в производстве станков с ЧПУ и в разработке программного обеспечения. Мы осуществляем поддержку Заказчика начиная с проведения анализа осуществимости и заканчивая пилотным производством с целью минимизации промышленных, экономических и технологических рисков.

Обучение на заводе Заказчика. Сеть круглосуточных сервисных центров. Непрерывная техническая поддержка.

ОПЫТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ КА ИЗ ПКМ

Белоглазов А. П., Матюшкин С. Э., Сорокин В. Н.

ООО «Ниагара», г. Москва, Россия

Применение более совершенных материалов, оптимизация конструкций и сочетание различных технологических приёмов при изготовлении являются основными направлениями повышения удельных характеристик элементов конструкций КА.

В качестве примера применения такого комплексного подхода приводится опыт разработки и изготовления винтового движителя (часть привода механизма развёртывания панелей солнечных батарей (БС)) и сетчатых (изогридных) труб треугольного сечения (элемента силового каркаса панелей БС).

Двухзаходный винт движителя (наружный диаметр 50 мм, длина 3800 мм, масса 1600 г) конструктивно выполнен из силовой внутренней углепластиковой трубы (в основе - высокомодульное волокно) и винтовой оболочки (из плетёного углеродного рукава). Пространство между силовой внутренней трубой и винтовой оболочкой заполнено вспененным составом. В комплект входят две гайки из углепластика (рис.1).



Рис. 1 Двухзаходный винт движителя

Расчёты показывают, что замена круглых труб силового каркаса БС на трубы треугольного сечения приводит к снижению массы конструкции (до 20 %) при сохранении жесткостных и прочностных показателей. Экспериментальным путем отработывались технологии изготовления сплошной трубы из плетёного/тканого рукава и трубы сетчатой (изогридной) структуры. Программируемая автоматизированная намотка сетчатых труб на специально изготовленном оборудовании позволила расположить высокомодульное углеродное волокно по рёбрам, а высокопрочное волокно - по граням, обеспечив при этом общую целостность конструкции. При этом количество жгутов, уложенных вдоль ребер и обеспечивающих жесткость, было в 3 раза выше, чем в гранях (рис. 2).



Рис. 2 Внешний вид труб: сплошной и сетчатой структуры

Данные работы выполнялись по заказу и на основании технического задания АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва». Результаты работ защищены тремя патентами РФ и могут быть использованы для решения схожих конструкторских задач.

СИЛОВОЙ СТЕРЖЕНЬ ИЗ ВЫСОКОМОДУЛЬНОГО УГЛЕПЛАСТИКА ДЛЯ ФЕРМЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Аккуратов И. Л., Копыл Н. И., Алямовский А. И.

ОАО «РКК «Энергия» им. С. П. Королева», г. Королёв, Россия

Стержни из композиционных материалов на основе углеродных волокон являются конструктивным элементом ферменных конструкций и широко используемыми в космической технике. Как правило, стержни ферменных конструкций работают в условиях одноосного растяжения и сжатия, что хорошо согласуется со структурными особенностями волокнистых композиционных материалов, обладающих максимальной жесткостью и прочностью в направлении армирования. При изготовлении стержни обычно армируются и в поперечном направлении. Таким образом, типовая структура стержня фермы образуется из системы продольных или с некоторым углом армирующих слоёв в поперечном направлении.

В данной работе рассматривается конструкция и технология изготовления стержневого элемента ферменной конструкции космического аппарата. Стержневой элемент трубчатой формы сечением 64x2 мм и длиной 1130 мм, к которому предъявляются требования максимальной жесткости в осевом направлении и передаче сжимающих и растягивающих усилий не менее 12000 кгс.

Исходя из исходных требований, для отработки технологии и изготовления образцов стержня был выбран углепластик на основе высокомодульной углеродной ленты Кулон-П.

Проведённым расчётом определена схема армирования, обеспечивающая устойчивость стержня ($90^{\circ}_1/+7^{\circ}_1/-7^{\circ}_1/0^{\circ}_8// -7^{\circ}_1/+7^{\circ}_1/90^{\circ}_1$).

Изготовление стержня велось методом выкладки на металлическую оправку слоёв препрега на основе ленты Кулон-П с промежуточным уплотнением выкладываемых слоёв. При этом поперечное армирование (слои 90°) выполнялось намоткой углеродного жгута УКН-П-5000, пропитанного эпоксифенольным связующим. Для усиления зоны установки законцовок слои углеродного препрега чередовались слоями клеевого препрега на основе стеклоткани.

Законцовки из алюминиевого сплава охватывали стержень по внутреннему и наружному диаметру и устанавливались на клею холодного отверждения.

Применённые технологические приёмы с высокой точностью обеспечили оптимальный зазор между элементами законцовки и стержня, что позволило максимально реализовать сдвиговые свойства клея.

Проведённые испытания стержней на растяжение и сжатие, в том числе циклические, подтвердили правильность выбранных конструктивно-технологических приёмов, обеспечивших выполнение требований к несущей способности стержней.

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ПРИБОРНЫХ РАМ

Алямовский А. И., Копыл Н. И., Аккуратов И. Л., Давыдов Д. Я.
ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева», г. Королёв, Россия

В докладе представлены два варианта технологий соединения углепластиковых стержневых элементов в пространственную приборную раму. Приведена оценка стабильности технологии соединений, затрат на оснастку и трудоемкости изготовления самой рамы.

В конструкции изделий ракетно-космической техники очень часто для компактного размещения приборов используются пространственные рамы, которые традиционно изготавливают из металлического сортамента. Соединения элементов рамы: – стержней, фитингов, кронштейнов – выполняют методом сварки (рис. 1).

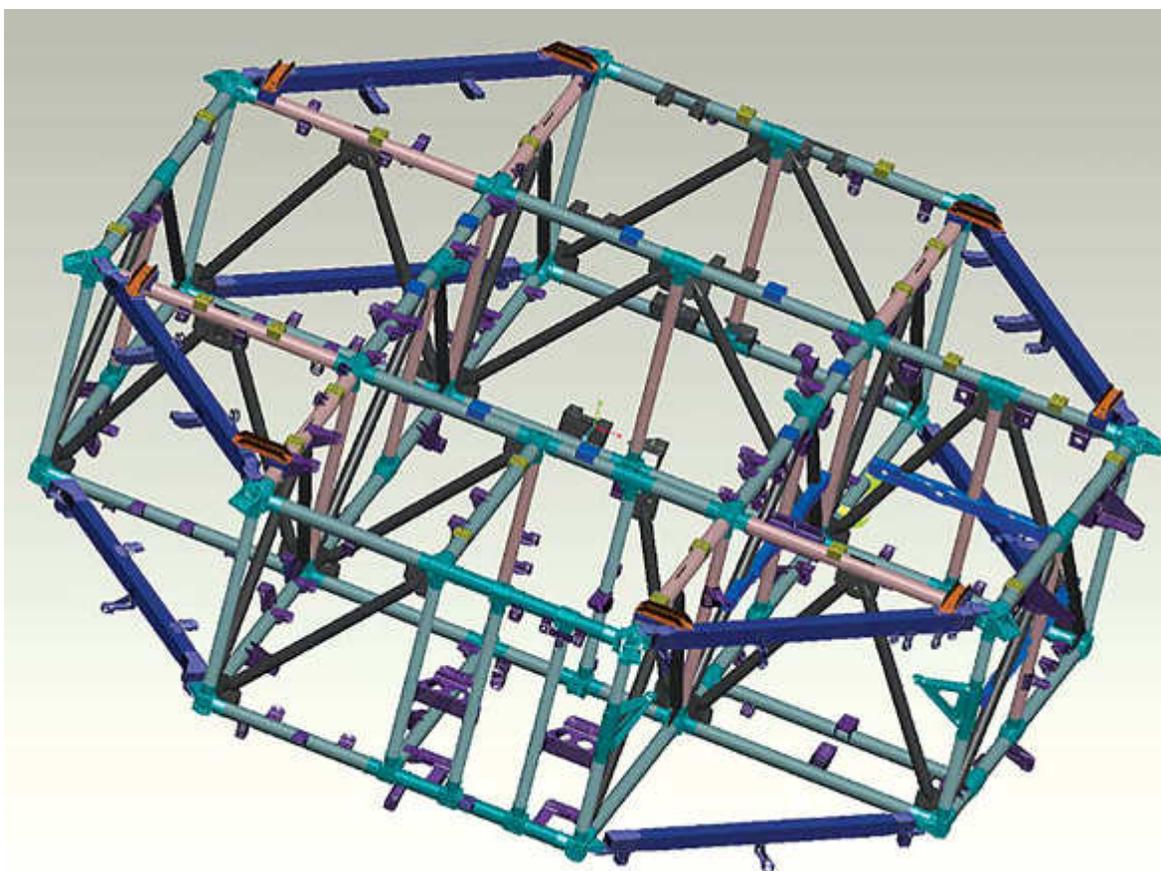


Рис. 1. Общий вид приборной рамы

В данной работе приводится опыт создания полностью композитной рамы по имеющемуся аналогу алюминиевой приборной рамы транспортного грузового корабля «Прогресс». При этом ставились следующие задачи:

- обеспечить снижение массы до 20 %;
- обеспечить жёсткость и несущую способность конструкции рамы на прежнем уровне;
- снизить затраты на изготовление рамы;
- сократить производственный цикл изготовления.

Были изготовлены две экспериментальные рамы, отличающиеся друг от друга способом соединения стержневых элементов в узлах.

Каждый из вариантов имеет свои преимущества и недостатки, которые влияют в первую очередь на качество изготовления приборных рам (воспроизводимость), на возможность контроля выполняемых соединений методами неразрушающего контроля, потребности в специализированной оснастке и оборудовании.

Для обеих рам стержневые элементы изготавливались из препрега методом автоклавного формования. Это позволяет обеспечить высокое давление формования стенок стержней и позволяет максимально реализовать прочностные характеристики препрега.

На первой экспериментальной раме стержневые элементы соединялись друг с другом методом аппликации узлов раскроями углеродного препрега с последующими местной герметизацией этих зон и автоклавным формованием.

Формование узлов происходит в автоклаве при давлении 5-7 кгс/см², что обеспечивает качественное соединение и проформовку материала. Однако выполнение этой операции продолжительно по времени из-за большого объема ручного труда и во многом зависит от квалификации исполнителя. Большое количество герметизирующих швов вакуумной плёнки, штуцеров и шлангов снижает надёжность обеспечения герметичности при автоклавном формовании и повышает степень риска получения практически неисправимых дефектов.

Кроме этого, указанный способ требует изготовления дорогостоящей углепластиковой оснастки для фиксации элементов рамы при термообработке в автоклаве.

На второй экспериментальной раме соединение стержневых элементов осуществлялось при помощи предварительно отформованных углепластиковых полуоболочек, устанавливаемых на клею холодного отверждения.

Второй вариант предусматривает поэтапную сборку рамы по плоским поясам (нижний, верхний) при помощи полуоболочек с последующей сборкой в пространственную раму, используя оставшиеся готовые полуоболочки.

Применение полуоболочек требует большой номенклатуры дополнительной оснастки и индивидуальных режимов формования. При этом имеется возможность проведения поэтапного контроля качества сборки.

Склеивание выполняется клеем холодного отверждения, что позволяет воспользоваться стационарным стапелем из алюминиевого профиля. Для увеличения местной жёсткости в узлах соединений в конструкцию полуоболочек введены дополнительные элементы жесткости.

Недостатком также является большое количество клеевых соединений, в которых сложно обеспечить необходимые клеевые зазоры и давление при склеивании.

Проблемой для обоих вариантов является контроль качества склейки и проформовки узлов соединения, особенно в переходных зонах.

Выводы:

1. Применение современных углепластиковых материалов позволило снизить массу конструкции приборной рамы на 25 % с обеспечением исходных требований по жёсткости и несущей способности.

2. Трудоёмкость изготовления и временной производственный цикл изготовления углепластиковых рам более чем в 2 раза ниже и короче, чем у алюминиевого аналога.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Степанов П. А., Атрощенко И. Г., Никулина О. В., Мельников Д. А., Строева О. А.
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В настоящее время наблюдается тенденция к увеличению тактико-технических показателей летательных аппаратов, возникающая в результате жесткой конкуренции среди производителей самолетной и ракетной техники на общемировом рынке. Это неизбежно влечет за собой непрекращающееся повышение требований, предъявляемых к элементам конструкций летательного аппарата, и, соответственно, к материалам: необходимо получить максимально высокие физико-технические характеристики при относительно невысоких затратах.

Многослойные конструкции позволяют эффективно решать проблему весового совершенства конструкций многофункционального назначения, прежде всего силовых и теплозащитных конструкций. Чаще всего они являются 3-слойными (для решения специальных задач, например, в радиопрозрачных антенных обтекателях они могут быть 3-, 5-, 7-слойными) и состоят из оболочек и расположенных между ними заполнителей.

В ходе работ в ОНПП «Технология» было разработано несколько различных видов трехслойных термостойких конструкций.

Первый вариант многослойной конструкции представлял собой опытный образец, обшивки которого были выполнены из материала ХАФСкв, а средний слой – из стеклосотопласта типа ССП (на основе электроизоляционной стеклоткани и бакелитового лака) с высокопористым наполнителем на основе неорганического связующего, модифицированного микросферами или другими микродисперсными порошками.

Вторым вариантом конструкции была модель, обшивки которой были выполнены из материала марки ХАФСкв, а в качестве среднего слоя использовался теплоизоляционный материал на основе кремнеземных или базальтовых волокон марки АТМ или ВР.

В ходе проведенных испытаний, приближенных к условиям эксплуатации изделий, удалось снизить температуру внутри конструкции до 100 °С при температуре фронтальной поверхности порядка 1200 °С.

Полученные многослойные КМ могут быть использованы в теплонагруженных изделиях и конструкциях радиотехнического назначения, в теплоизоляционных изделиях, работающих при температурах от минус 60 до плюс 800 °С длительно и до 1200 °С кратковременно, в авиационной, космической и других областях специального машиностроения.

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПУЛТРУЗИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Сафонов А. А.¹, Саратов А. А.², Бондарчук Д. А.¹

¹ АНОО ВО «Сколковский институт науки и технологии», д. Сколково, МО, Россия

² ООО «Датадванс», г. Москва, Россия

Аннотация

Целью данного исследования является разработка методов оптимизации и численного анализа чувствительности параметров процесса пултрузии, прогнозирование изменения остаточных деформаций в изделии с течением времени на примере швеллера и влияния их на собираемость конечной конструкции.

Ключевые слова: пултрузия, оптимизация технологических параметров, прогнозирование изменения остаточных деформаций во времени, Abaqus, pSeven.

Описание процесса моделирования

Для того, чтобы адекватно описать изменения, происходящие в заготовке в процессе пултрузии, следует принимать во внимание такие явления, как передача тепла в композиционном материале, химическая реакция отверждения, внутреннее высвобождение энергии в ходе химической реакции, температурные и химические деформации внутри заготовки, тепловой и механический контакт с поверхностью фильеры, изменения термических и механических свойств композиционного материала в результате фазовых превращений в смоле.

Математическая модель, учитывающая данные явления, была реализована в среде ABAQUS с помощью механизма подпрограммы пользователя [1]. Моделирование осуществлялось с использованием неявного решателя ABAQUS Standard. Уравнения теплопроводности решались с помощью стандартных инструментов ABAQUS. Для интегрирования уравнения кинетики отверждения использовался неявный двухступенчатый метод Эйлера – Коши. Результат моделирования – распределение перемещений, представлен на рис. 1а. На рис. 1б. показана форма швеллера после остывания. Для наглядности реальные перемещения увеличены в 20 раз.

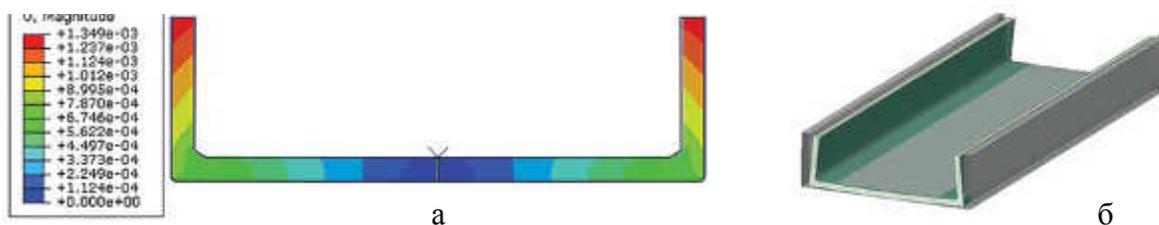


Рис. 1. Деформированный швеллер после полимеризации в фильере (а) и остывания (б)

Анализ влияния остаточных напряжений и деформаций в швеллерах на собираемость конструкции моста проведен при помощи программ ABAQUS и SOLIDWORKS.

Оптимизация и анализ чувствительности процесса пултрузии

Основной задачей оптимизации параметров технологического процесса является максимизация скорости вытяжки с целью повышения производительности процесса при соблюдении ограничений по температуре, деформации и качеству изделия.

В качестве ограничений, рассматриваемых в данном исследовании, используются поперечное напряжение в изготавливаемом профиле, максимальная температура материала и минимальная степень отверждения на выходе из формообразующего блока (фильеры). Для контроля деформации профиля используется максимальный угол пружинных деформаций.

Исследование выполнялось в два этапа: для изучения поведения модели и анализа чувствительности был выбран равномерный план экспериментов; для построения фронта Парето в координатах скорость / деформация решалась задача двухкритериальной оптимизации. С целью автоматизации исследований модели в программном пакете pSeven была создана расчетная цепочка оптимизации [2].

Целью двухкритериальной оптимизации является минимизация угла пружинных деформаций и максимизация скорости вытяжки. Для решения задачи применялся алгоритм многокритериальной суррогатной оптимизации (Multi-Objective Surrogate-Based Optimization, MOSBO).

Сравнение начальной и оптимальной конфигураций (включая максимальную скорость вытяжки) представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение начальной и оптимальной конфигураций

Параметры и критерии	Начальная конфигурация	Оптимальная конфигурация
T0, °C	50	44
T1, °C	150	160
T2, °C	190	168
U, мм/с	1	1,18
Угол пружинных деформаций, град.	0,24	0,13
Ограничения		
Tmax, °C	195	189
Степень отверждения	0,99	0,96
Напряжение на внутренней стороне, МПа	11	11
Напряжение на внешней стороне, МПа	9	8
Зеленый — граничные значения параметра, желтый — нарушение ограничений, серый — границы ограничений. Сравнение показывает, что значительное увеличение скорости вытяжки было достигнуто при соблюдении температурных ограничений.		

Выводы

Был представлен метод численной оптимизации и анализа чувствительности параметров процесса пултрузии. Математическая модель процесса была создана для описания распределения температурного поля, степени отверждения и напряженно-деформированного состояния в изделии в течение процесса пултрузии, а также для определения изменения деформаций в изделии (после изготовления) с течением времени. Проведен анализ влияния технологических приспособлений на угол пружинных деформаций и оценено влияние остаточных напряжений в изделии на собираемость конечной конструкции.

Для численной оптимизации и анализа чувствительности параметров процесса автоматизированной схемы моделирования была разработана pSeven DSX. В общей сложности для нахождения фронта Парето было выполнено 80 оценок. В итоге максимальная скорость вытяжки, удовлетворяющая всем ограничениям, на 18 % превышает начальную скорость.

Литература

1. ABAQUS PDF Documentation, Abaqus User's Manual Part I-VII. DS Simulia, 2013.
2. pSeven Core documentation 2016, Surrogate-Based Optimization.

URL: <https://www.datadvance.net/product/macros/manual/5.2/guide/gtopt/sbo.html>.

ТЕКУЩАЯ СИТУАЦИЯ И ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ КИТАЙСКИХ АРАМИДНЫХ СОТ

СУЙ Гуанчжун, СЮЙ Мэн

Aramicore Composite Co., Ltd., г. Сучжоу, Китай

Арамидные соты являются чрезвычайно легким, высокопрочным, неметаллическим продуктом, изготовленным из арамидной бумаги, пропитанной фенольной смолой. Этот наполнитель обладает уникальным сочетанием свойств, которые очень высоко ценятся в аэрокосмической, оборонной, железнодорожной и судостроительной сферах.

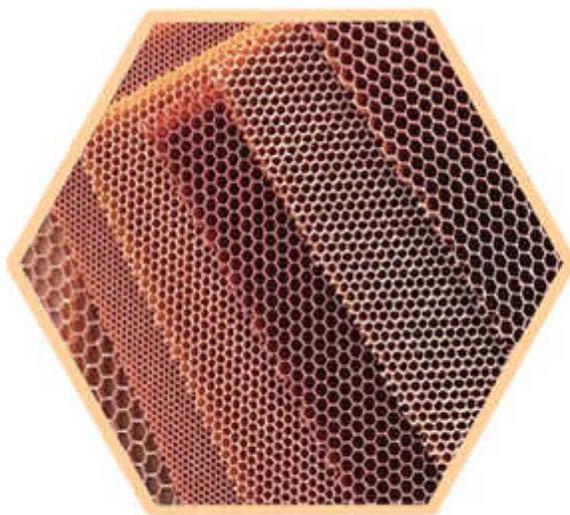
В Китае разработка и производство арамидных сот начались в конце 80-ых годов прошлого века. Тогда AVIC HAIG, позаимствовав авторское право французского вертолета SA365N1 Dauphin, начали производить вертолет HАМС Z-5/Harbin Z-5, в конструкции которого на 80 % использовались композиционные материалы. Потребности в арамидных сотах – 260 квадратных метров на один вертолет. С 1988 года начинается процесс отечественной разработки и производства данного вертолета.



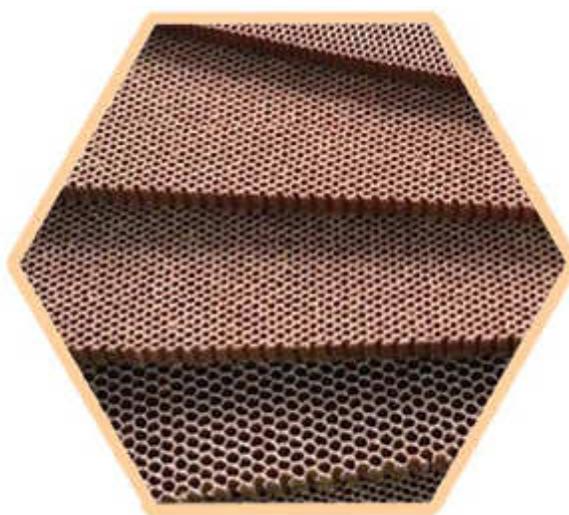
С 1990 года профессор Пекинского аэрокосмического университета Го Чжонсинь и его магистр Суй Гуанчжун, потратив три года, успешно разработали первую китайскую машину для поперечного нанесения клея на бумаге Nomex. Размер ячейки измеряется в дюймовой системе, и размер сот после растяжения составляет 1100 x 2500 мм. Соты соответствуют французским DHS142-115FS и DHS142-115ST стандартам, и это заложено в основу оборудования для производства китайских арамидных сот.

В 2008 году к Олимпиаде, проводившейся в Пекине, на участке Пекин-Тяньцзинь использовались высокоскоростные поезда CRH5, в то же время начались разработка и изготовление китайского узкофюзеляжного самолета C919. Широкое применение арамидных сот в этих объектах продвигало процесс разработки китайской отечественной арамидной бумаги. В настоящее время китайские Metastar, Longpont и несколько других предприятий уже разработали и освоили серийные ключевые технологии в производстве арамидной бумаги и успешно изготовили УТ серии мета-арамидной бумаги и НКД серии пара-арамидной бумаги. Это обеспечило самостоятельную поставку сырья для производства.

В 2010 году Суй Гуанчжун создал компанию Aramicore, а затем и первую линию для производства сотоблока высотой 914 мм в Китае и стал единственным производителем в мире, который на 100 % использует отечественные арамидные бумаги для производства сот, в том числе и АС-НН мета-арамидные соты и АС-КН пара-арамидные соты.



АС-НН Meta-aramid Honeycomb



АС-КН Para-aramid Honeycomb

На сегодняшний день китайские отечественные арамидные соты уже привлекли внимание и заслужили признание всемирных известных авиастроительных компаний. Получены хорошие результаты испытаний в международной авиационной сфере. С непрерывным расширением и развитием международного рынка, китайские отечественные арамидные соты могут прервать монополию за рубежом и более широко будут использоваться в разных сферах.

РАЗРАБОТКА НОВОГО ОБЛЕГЧЕННОГО СТЕКЛОСОТОПЛАСТА ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Волков В. С., Крюков А. М., Кулагина И. В., Садикова Н. А., Шуль Г. С.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Благодаря своим свойствам стеклопластиковые сотовые наполнители – стекло-сотопласты (ССП) широко применяются в современной авиакосмической технике в качестве наполнителей трехслойных сотовых конструкций (ТСК).

В крупногабаритных трехслойных конструкциях производства Ракетно-космического центра «Прогресс», г. Самара, используются стекло-сотопласты марки ССП-1Э на основе стеклоткани Э3/1-100 с размером грани ячеек 2,5 мм, ТУ 7554-477-05761784-2005, производства ОАО «Владимирский химический завод». Для данных сотопанелей показатель прочности при сжатии составляет $\sigma_{сж} \geq 2,94$ МПа при плотности 80-100 кг/м³. Современные требования РКЦ «Прогресс» для ССП-1Э направлены на повышение прочностных характеристик применяемого стекло-сотопласта. Для выполнения этих требований завод-изготовитель увеличивает массовую долю связующего в ССП до 50 % вместо 25-40 %, при этом плотность может достигать 150 кг/м³. Это приводит к утяжелению трехслойных конструкций в изделиях РКЦ «Прогресс».

АО РКЦ «Прогресс» поставил перед нами задачу по разработке нового стекло-сотопласта ССП-1Э с прочностью $\geq 3,0$ МПа при плотности 75 ± 5 кг/м³ для применения в головных обтекателях ракет.

Данная работа направлена на разработку технологии изготовления облегченного стеклопластикового сотового наполнителя с размером грани ячеек 2,5 мм, плотностью $\gamma \leq 80$ кг/м³ и повышенными прочностными характеристиками $\sigma_{сж} \geq 3,0$ МПа для силовых трехслойных конструкций космических аппаратов типа «Союз».

Для решения поставленной задачи были проведены поисковые исследования по выбору специальной облегченной стеклоткани, отработаны технологические режимы нанесения клеевых полос на выбранную стеклоткань, разработаны режимы прессования стекло-сотопакетов, определены технологические параметры процесса пропитки сотоблоков.

В ходе поиска отечественных электроизоляционных стеклотканей, обладающих пониженной поверхностной плотностью и высокими прочностными характеристиками, было установлено, что наиболее перспективной является электроизоляционная стеклоткань марки Э2-62.

Исследовано влияние технологических факторов и режимов получения на всех стадиях изготовления облегченного стекло-сотопласта с повышенными прочностными характеристиками (стекло-сотопласт марки ССП-1Э с размером граней ячеек 2,5 мм). Определены оптимальные технологические показатели клея БФ-2 и режимы нанесения клеевых полос на тонкую стеклоткань Э2-62, обеспечивающие отсутствие сквозного проникновения клея на обратную сторону стеклоткани. Найдены оптимальные режимы прессования сотопакетов, обеспечивающие их бездефектное растяжение в сотоблоки с образованием правильных шестигранных ячеек. Установлены оптимальные технологические показатели лака ЛБС-1 при пропитке

сотоблоков и параметры процесса пропитки, а также определены технологические режимы термообработки пропитанных сотоблоков из стеклоткани Э2-62.

Были изготовлены экспериментальные сотоблоки с размером граней ячеек 2,5 мм и проведены испытания по следующим показателям: плотность и прочность при сжатии.

Таблица

Результат испытаний экспериментальных образцов

Расположение сотопанелей в сотоблоке	Сотоблок №1		Сотоблок №2		Сотоблок №3	
	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
верх	70,5	3,1	73,7	3,4	72,1	3,2
середина	76,4	3,7	78,3	3,9	75,7	3,5
низ	78,7	4,0	79,2	4,1	77,6	3,8
среднее значение по блоку	75, 2	3,6	76,3	3,8	75,1	3,5
Требования ТД: плотность – 75±5 кг/м ³ ; прочность при сжатии – ≥ 30 кгс/см ² (3,0 МПа)						

Сравнительные данные показывают, что разработанный стеклосотопласт марки ССП 1Э с размером ячейки 2,5 мм превосходит аналоги по показателям прочности в 1,5 раза.

По результатам технологических испытаний опытных партий ССП-1Э разработана техдокументация с литерой «О₁» на производство стеклосотопласта ССП-1Э (ТУ 1-596-510-2013 и ТИ 596.25000.1463), а образцы ССП-1Э были испытаны с положительными результатами в РКЦ «Прогресс».

Таким образом, нами разработан состав и технология изготовления облегченного стеклосотопласта ССП-1Э повышенной прочности.

Получено заключение о целесообразности использования разработанного материала в трехслойных конструкциях новых космических кораблей типа «Союз».

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМОСТОЙКОСТИ ПОЛИИМИДНЫХ СТЕКЛОСОТОПЛАСТОВ

Корнейчук А. Н., Волков В. С., Чугунов С. А., Рыбакова Н. В., Шуль Г. С., Денисова Е. В.
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Одной из важнейших задач современного авиа- и ракетостроения является снижение массы узлов и агрегатов летательных аппаратов, чему в значительной мере способствует применение стеклосотопластов (ССП), которые отличаются от

их металлических аналогов высокими значениями удельной прочности и жесткости, а также возможностями регулирования таких свойств, как вибростойкость, звуко- и теплоизоляция, радиопрозрачность в широком диапазоне длин волн.

Технологичность сотопластов и уровень их физико-механических свойств во многом определяет полимерное связующее. Для высокотемпературных сотопластов используют термостойкие связующие различной природы. Но в современных конструкциях летательных аппаратов наибольшее применение нашли имидные связующие. Актуальной проблемой сетчатых полиимидов для таких конструкций является повышение их термостойкости в воздушных средах до 600 °С.

В настоящей работе выбраны связующие в виде раствора имидообразующих мономеров: ароматических диаминов и кислых эфиров многоосновных ароматических кислот, что позволяет использовать принцип PMR в технологии получения имидсотопластов. Благодаря тому, что синтез линейного и сетчатого полиимида происходит на поверхности волокнистого наполнителя при различных температурно-временных условиях, удастся синхронизировать стадии получения полуфабриката сотопластов и формования изделия. Подобные связующие разработаны и использованы в практике российских и зарубежных машиностроителей. К ним относятся СП-97, АПИ (Россия) и PMR-15, LARC (США).

В качестве армирующего наполнителя для получения термостойких и прочных ССП была выбрана кварцевая стеклоткань марки ТК-3.

Повышение термостойкости полимера возможно или путем создания новых связующих, или модифицированием уже известных связующих добавками, меняющими их свойства в нужном направлении.

Наиболее перспективными представителями соединений, применяющихся в качестве добавок для повышения термостойкости полимеров являются борсодержащие и карборансодержащие соединения.

В ходе литературного поиска были выбраны полиметилен-п-трифениловый эфир борной кислоты (ТФБ) и орто-карборан (Д-9-о).

Методом термогравиметрического анализа определялись весовые потери в процессе динамического нагрева образцов кварцевой стеклоткани, пропитанной модифицированным связующим СП-97К (добавки ТФБ и Д-9-о).

Было установлено, что введение выбранных добавок в состав полиимидного связующего СП-97К повышает его термостойкость. Показано, что потеря 10 % массы модифицированного связующего наблюдается при 520–530 °С по сравнению с 300–320 °С у немодифицированного связующего. При этом наиболее перспективной модифицирующей добавкой является Д-9-о.

Методом ИК-спектроскопии исследовали структурно-групповые изменения, происходящие в модифицированном полиимидном связующем в процессе отверждения. Результаты исследований показали, что модифицирующие добавки не влияют на процесс отверждения исходного полиимидного связующего. То есть структура композиции представляет собой взаимопроникающие трехмерные структуры полиимидного связующего и модифицирующей добавки.

Представлялось целесообразным проверить эффект модификации связующего СП 97К на образцах стеклотопластов при повышенных температурах. Для этого были изготовлены экспериментальные сотоблоки с размером грани ячейки 4,2 мм

на основе стеклоткани марки ТК-3 и связующего СП-97К, модифицированного орто-карбораном (Д-9-о).

Для изучения упруго-прочностных свойств полученных образцов ССП проводили испытания на определение предела прочности при сжатии. Испытания проводились при температурах 20 и 500 °С (выдержка при температуре 10 мин.). Также проводили испытания при кратковременном воздействии (в течение 1 мин) температуры 600 °С. Результаты испытаний сравнивали со свойствами стеклосотопласта марки ССП-7-4,2 на основе немодифицированного связующего СП-97К.

Испытания при 20 °С показали, что образцы ССП на основе модифицированного связующего обладают более высокими прочностными характеристиками по сравнению с образцами на основе чистого СП-97К. Температурные испытания образцов ССП показали сохранение при 500 °С 30 % от исходной прочности и 20 % при 600 °С после кратковременного воздействия.

Таким образом, предложенный способ повышения термостойкости полиимидного связующего представляется перспективным для получения ССП на рабочую температуру до 500–600 °С.

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПОСОБА РЕМОНТА УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ ПКМ

Вермель В. Д., Калитин Е. И., Олейников А. И.

ФГУП «ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского», г. Жуковский, Россия

Предложена и обоснована приближенная расчетная схема слоистых композитных пластин и оболочек, в которых основным элементом структуры является монослой – слой, армированный однонаправленными непрерывными волокнами. Получены формулы и разработан алгоритм расчета напряжений в каждом слое, позволяющие производить аналитические оценки прочности образца исходной, поврежденной и отремонтированной панели. Исследуется влияние жесткостных свойств ремонтной вставки и условий ее контактного взаимодействия с неповрежденным композитом на восстановление прочности элемента конструкции.

В результате создана компьютерная программа расчета напряжений в каждом монослое в направлении волокон, вызванных внешним нагружением элемента конструкции. Приведены данные по оценке остаточной прочности после ударного повреждения и восстановленной прочности после ремонта, с учетом размеров зоны повреждения, жесткостных и геометрических параметров вставки, натяга и адгезии.

Дан пример расчета рациональных способов и параметров ремонта поврежденного элемента конструкции.

Результаты работы могут быть использованы для разработки методических материалов и рекомендаций по проведению ремонта элементов конструкций ВВСТ из ПКМ.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫЕ УГЛЕПЛАСТИКИ ДЛЯ АВИАЦИИ И КОСМОСА: НОВАЯ КЛЮЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КОМПЕТЕНЦИЯ В МИРЕ И В РОССИИ

Зеркаев А. И., Фролов М. А.

ООО «Тейджин Рус», г. Москва, Россия

С 2010-х годов наблюдается качественное изменение спроса на рынке конструкционных композитов для авиации и космоса:

- ускоренный рост объема мировых авиаперевозок и одновременное ужесточение требований по топливной эффективности;
- облегчение конструкции, улучшение аэродинамических характеристик за счет применения углеволоконных композитов в высоконагруженных и особо ответственных элементах конструкции;
- переход к применению углеволоконных композитов в качестве основного конструкционного материала в массовых, серийно производимых изделиях авиационной и космической техники.

При выборе углекомпозитных материалов и технологий на первый план выходят требования по обеспечению высокой эффективности серийного промышленного производства:

- снижение полной (конечной) себестоимости производства композитных изделий;
- применение массовых, поточных технологий производства;
- хорошая воспроизводимость по качеству в крупносерийном масштабе;
- минимизация времени от конструкторской разработки до серийного производства.

В авиакосмической отрасли происходит активная экспансия специальных термопластичных углепластиков:

- соответствие новым, изменившимся требованиям рынка;
- накоплена критическая масса знаний и опыта по переработке и применению;
- вытеснение терморепрочных углепластиков и металла в сегментах, где термопластичные материалы дают преимущество по полной себестоимости производства;
- грядущее значительное расширение области применения – вместе с внедрением термопластической сварки (сборки) интегральных компонентов и узлов конструкции авиакосмической техники.

Освоение термоуглепластиковых технологий становится фактором сохранения позиций на рынке производства элементов конструкций авиакосмической техники:

- технологическое лидерство небольшой группы компаний, исторически работавших в области авиакосмических термопластичных углепластиков;
- появление независимых предложений полного технологического пакета по внедрению термопластичных углепластиков;
- активные усилия по внедрению термопластичных углеволоконных материалов основными производителями авиакосмических композитов в целях сохранения ведущих позиций на рынке;
- актуальность риска потери конкурентоспособности по себестоимости в случае неиспользования термопластичных углепластиковых материалов в ряде сегментов рынка.

Успех в освоении технологий термопластичных углепластиков зависит от выбора оптимального технологического пакета и плановой реализации долгосрочной технологической стратегии:

- нацеленность на существенное снижение себестоимости за счет применения поточного, автоматизированного производства элементарных компонентов и последующего соединения термопластической сваркой (сборкой);
- подбор и комбинирование технологии производства элементарных компонентов с точки зрения минимизации конечной себестоимости;
- выбор и оптимизация артикула материала, исходя из применяемой технологии переработки и в тесной кооперации с его производителем; использование материала с высокой заводской готовностью и полной проверкой неразрушающим контролем;
- активная разработка оптимальных технологий термопластической сборки; ожидающийся их допуск в серийные летные изделия по мере накопления достаточного массива эксплуатационных показателей, подтверждающих надежность.

Активное применение термопластичных углепластиков становится необходимым условием для сохранения позиций российских производителей композитных компонентов для авиакосмической техники:

- неизбежность использования термопластичных углеволоконных материалов для продолжения конкурентоспособного производства на мировом уровне;
- начало опытных работ по внедрению термопластичных углепластиков в российской авиакосмической отрасли; необходимость кардинального расширения и ускорения этих работ;
- значительная перспектива развития данной области в России – Тохо Тенакс приглашает к сотрудничеству.

ПЕРЕДОВЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Богданоски Димитар, Ристеска Светлана

Компания MIKROSAM A.D., г. Прилеп, Республика Македония

Ожидается, что термопластичные композиционные материалы будут переживать существенный рост в течение последующих 10-20 лет. Основными их преимуществами по сравнению с терморезактивными композитами являются быстротекущий процесс, пониженное содержание летучих более совершенный процесс повторного использования и переработки, и в ряде случаев - уменьшенная стоимость материалов. При использовании термопластичных матриц может обеспечиваться высокая производительность. Эти материалы являются привлекательными для авиационно-космической и оборонной отраслей промышленности благодаря своей высокой жесткости, вязкости разрушения, прочности при сжатии, стойкости к удару, усталостной прочности и химической стойкости. И особое положение здесь занимают перспективные термопластичные матрицы авиакосмического назначения. Они обладают высокой термической, износо- и химической стойкостью, малым весом и т.д. В эту группу входят ПТФЭ, полифениленсульфиды, полиимиды, полисульфоны, полиэфиримиды и т.п.

Еще одним преимуществом термопластичной матрицы является ее способность к повторному расплавлению, что расширяет конструктивные и технологические возможности при создании продукции и обязательно должно сопровождаться разработкой инновационных технологий.

Компания MIKROSAM A.D. предлагает производимые по специальному заказу установки для производства композитов различного назначения, которые обеспечивают необходимый объем производства и вместе с тем гибкость для НИОКР при разработке нового продукта и создании опытного образца. Компания MIKROSAM A.D. предлагает установки для пропитки, продольной резки препрега и автоматизированной выкладки жгутов и лент препрега. Получение хороших механических свойств при отверждении термопластов на месте изготовления по технологии автоматизированной выкладки является очень непростой задачей. Совместно с Институтом перспективных композитов и робототехники Македонии компания MIKROSAM A.D. не только разрабатывает конструкцию установки, но и обеспечивает полную поддержку при разработке и изготовлении композитного изделия. Так, установки MIKROSAM для производства препрега – это высокосложное оборудование с автоматизированным управлением, обеспечивающее получение термопластичного препрега с высоким качеством пропитки, низким содержанием пор и равномерным распределением термопластичной матрицы.

Установки для продольной резки препрега приобретают популярность, поскольку потребность в разрезанном на ленты препреге для технологии автоматизированной выкладки жгутов и лент растет применительно к авиакосмической отрасли, автомобилестроению, ветроэнергетике и многим другим отраслям. Полная линия со всеми единицами оборудования и программным обеспечением от одного источника экономит время, упрощает процесс и предоставляет уникальную возможность для установления реального контроля за качеством на любом этапе процесса производства. Кроме того, для усовершенствования процесса в оборудовании используется система ЧПУ с улучшенным и более простым для пользователя интерфейсом, которая специально разработана компанией MIKROSAM. Что касается установок для автоматизированной выкладки волокна, то компания MIKROSAM может поставить своим клиентам установки различной конфигурации с точки зрения конструкции (портал, колонна, роботизация), числа головок и инструментов, координатных осей, типа материалов, ширины лент (75 мм / 3 дюйма, 150 мм / 6 дюймов, 300 мм / 12 дюймов или по требованию заказчика), размеров установки, резов сложной формы и т.д.

В настоящее время соединение конструкций из термопластичных композитов приобретает все большую значимость, т.к. эти материалы быстро приходят на смену аналогам из металла и терморепактивного композита, чтобы лучше противостоять характерным статическим и усталостным нагрузкам, воздействующим на авиационно-космические ЛА. Однако методы соединения путем сплавления имеют недостатки, такие как концентрация напряжений вследствие сверления отверстий при использовании механических соединений или чрезмерной подготовки поверхности при склеивании. Фактически все методы производства термопластичных композитов включают циклы нагрева и охлаждения. В процессе отверждения на месте процессы расплавления и схватывания происходят за несколько секунд, и соответствующая термическая предыстория многослойного материала является достаточно сложной. Хорошо известно, что механические свойства отвержденных элементов зависят от их термической

предыстории в процессе изготовления, поэтому необходимо определить динамику теплопереноса для исследования изменения температуры во времени.

Были проведены экспериментальные исследования с использованием переменных параметров и математических моделей. Исследовались оптимальные технологические режимы, обеспечивающие получение максимального уровня механических свойств композитов. Достаточно высокий уровень этих свойств позволяет использовать композиты в качестве конструкционных материалов в различных конструкциях. Будущее термопластичных композитов будет связано с расширением областей их применения в качестве конструкционных материалов за счет использования различных технологичных термопластичных полимеров в комбинации со стеклянными, углеродными и синтетическими волокнами. Высокая эффективность термопластичных композитов, свойства которых определяются армирующими волокнами, – это возможность снижения стоимости, улучшение рабочих характеристик, сокращение продолжительности циклов, возможность переработки для повторного использования.

ТЕРМОСТОЙКИЕ ПОЛИМЕРЫ ДЛЯ КОМПОЗИТОВ

Мухаметов Р. Р.

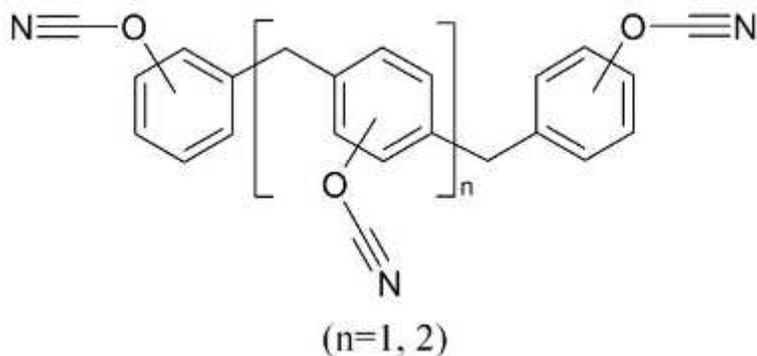
ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия

В настоящее время одним из наиболее перспективных направлений развития авиационного материаловедения является разработка конструкционных пластиков, предназначенных для длительной эксплуатации в условиях воздействия высоких температур. Это требует создания новых видов термоустойчивых полимерных связующих, способных удовлетворять неуклонно возрастающие требования по тепло-, термо- и огнестойкости, механическим характеристикам и технологичности.

Цианат-эфирные связующие

Одним из перспективных классов термореактивных связующих, обеспечивающих высокие технологические и эксплуатационные свойства, являются циановые эфиры. Доступность исходного сырья, безопасность работы с ним, относительно низкая температура плавления делает циановые эфиры перспективным классом для создания конструкционных ПКМ.

Разработан метод получения цианат-эфирных связующих, который заключается в оптимизации условий частичной циклотримеризации исходного арилдицианата с целью получения олигоцианурата (цианат-эфирного связующего) с заданным уровнем технологических свойств (жизнеспособность, липкость, вязкость, соотношение мономер-олигомерной смеси, содержание реакционных групп и т. п.). Разработанный синтез арилдицианата позволил получать его в виде смол с различной вязкостью, растворов в органических легколетучих растворителях, в виде пленки и пасты. Разработана серия связующих (ВСТ-1210, ВСТ-1208, ВСЦ-14 и др.), перерабатываемых по современным и традиционным технологиям. Углепластик на цианат-эфирном связующем используется для изготовления пылезащитного устройства и переходного канала вертолетного двигателя, деталей входного направляющего аппарата компрессора авиационного газотурбинного двигателя.



Использование полифункционального цианового эфира позволило получать пластики с температурой стеклования до 400 °С. Введение в его состав полифункционального термореактивного олигомера или линейного термопласта позволяет повысить трещиностойкость и получать материал в любом агрегатном состоянии (от текучей смолы до твердого продукта).

На основе цианового эфира разработан сферопластик (заполнитель) для интегральных конструкций с удельным весом и пленочный клей с температурой эксплуатации до 200 °С.

Прочностные свойства на уровне лучших эпоксидов в сочетании с высокой температурой стеклования, возможностью получения продукта с заданными технологическими свойствами (вязкость, липкость, текучесть, скорость отверждения и т.п.), низкая усадка, хорошие диэлектрические свойства позволили паспортизовать около 10 марок материалов для авиационной и космической промышленности.

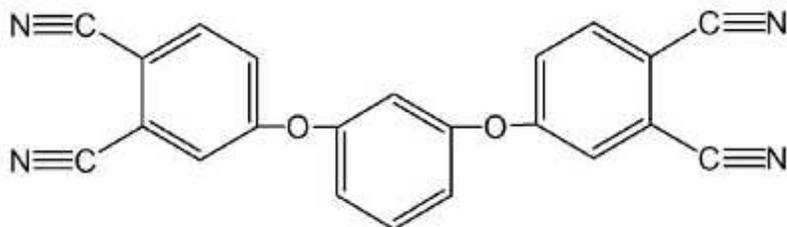
Полиимидные связующие

Проведены исследования по разработке бисмалеимидного (БМИ) связующего II поколения для ПКМ с рабочей температурой до 220 °С. Проведены предварительные испытания полученного БМИ-связующего, представляющего собой смолу с вязкостью и липкостью, необходимой для переработки и получения препрегов по расплавной технологии. Определено оптимальное соотношение отверждающей системы, состоящей из аллильного и пропенильного соединения, обеспечивающих наилучшую устойчивость к влаге и повышенную температуру стеклования (до 290 °С). Проведенные испытания образцов полученных углепластиков, выдержанных в термовлажностной камере в течение 3 мес., показали сохранение исходных физико-механических свойств на уровне 75 % после испытаний при 200 °С (при 220 °С сохранение на уровне 60 %). Разработанный состав, использованный в качестве клея, показал сохранение исходных свойств (прочность при сдвиге 21 МПа) на уровне 95 % при 250 °С и на уровне 60 % при 300 °С.

Фталонитрильные связующие

К наиболее перспективным термостойким материалам с температурой эксплуатации до 350 °С относятся дифталонитрилы, обладающие комплексом уникальных

свойств: высокой термостойкостью, огнестойкостью, низким водопоглощением и технологичностью. Впервые в отечественной практике в качестве дифталонитрила был использован тетранитрил ароматической тетракарбоновой кислоты – 1,3-бис (3,4-дицианофенокси) бензол представляющий из себя мелкодисперсный порошок бежевого цвета с температурой плавления 181–183 °С.



Приготовление композиции (связующего) заключалось в механическом смешении расчетного количества мономера и отвердителя с последующим просеиванием смеси с целью удаления возможных механических примесей и крупных агрегатов. Полученный полупродукт (связующее) может храниться практически неограниченное время. В дальнейшем реакция образования полимера может быть запущена путем нагревания и расплавления связующего. Разработанному фталонитрильному связующему присвоена марка ВСН 31, выпущены ТУ 1-595-12-1376-2013. Хочется отметить, что вплоть до 600 °С не наблюдается интенсивной потери массы, как в случае других термостойких полимеров. Высокотемпературный нагрев отвержденного связующего в атмосфере воздуха приводит к образованию до 70 % кокса. Отверждение полученного связующего протекает без выделения летучих продуктов, что позволяет не только получать монолитную полимерную матрицу, но и реализовать упрощенный технологический способ изготовления ПКМ на ее основе: RTM или VARTM. Разработанные углепластики марки ВКУ-38 применены для изготовления элементов рабочего колеса центробежного компрессора, теплонагруженных деталей и авиационных конструкций.

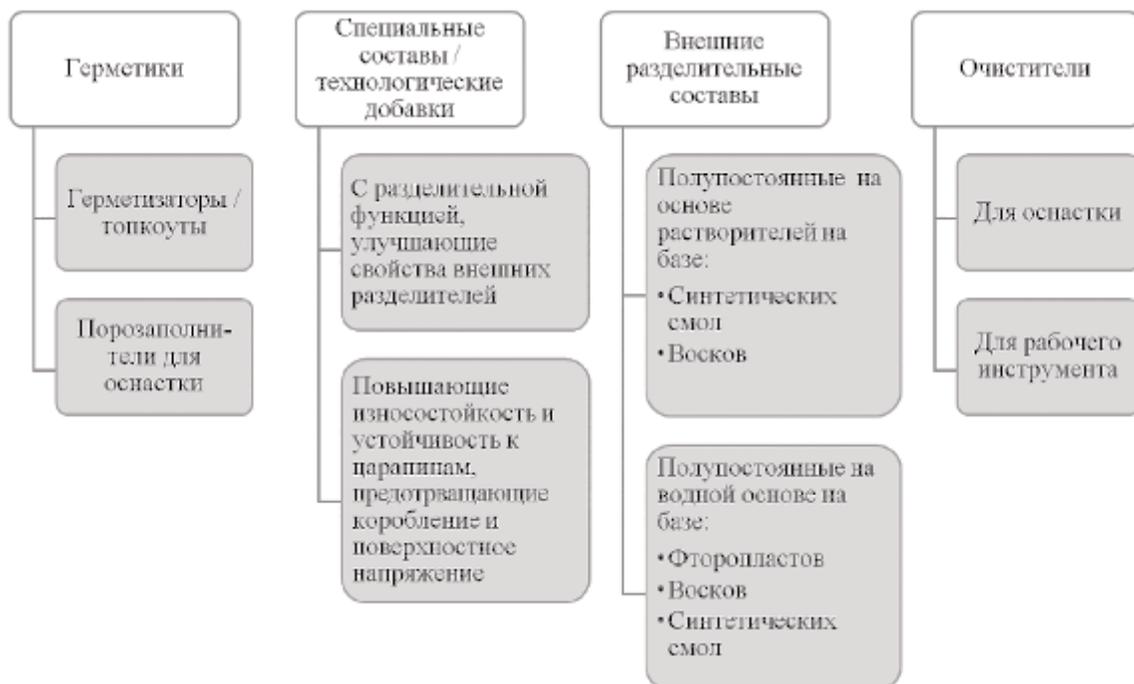
НОВЕЙШИЕ РАЗРАБОТКИ В СФЕРЕ АНТИАДГЕЗИОННЫХ СОСТАВОВ И ПОКРЫТИЙ ДЛЯ МАСТЕР-МОДЕЛЕЙ И ОСНАСТКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Руппель В., Лёба С.

АО «СТЕВИК», г. Сержи, Франция

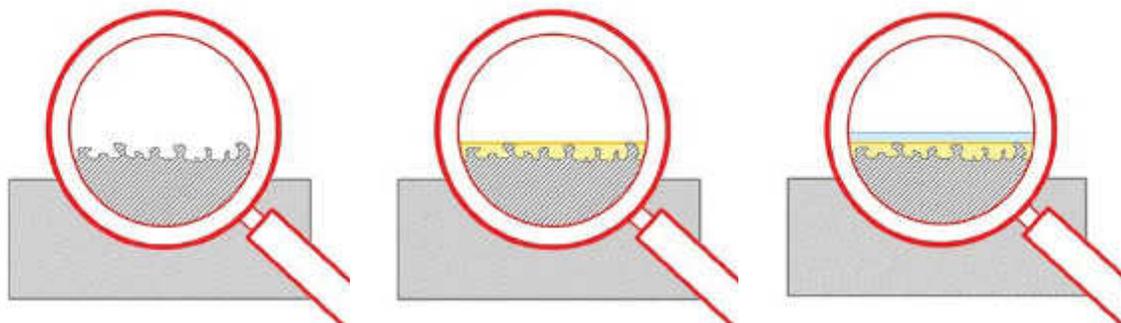
Разделительные составы – незаменимый элемент во многих производственных процессах. Тем не менее их роль часто недооценивается, несмотря на то, что, как вспомогательный продукт, именно они способствуют качественной и количественной эффективности производства. Разделительные составы, когда-то почти не используемые для предотвращения прилипания к оснастке, на сегодняшний день повышают производительность, ускоряют производственный процесс, обеспечивают безупречное качество изделий и увеличивают срок эксплуатации оснастки, с помощью которой эти детали изготавливаются.

Представляемая нашей компанией продукция немецкого производителя Мюнх Хеми Интернешенэл – это инновационные и высококачественные продукты с термостабильностью до 450 °С, сроком хранения до 24 месяцев, в удобной для заказчика упаковке: от 0,5 до 200 л. Линейка представляемых продуктов для производства стекло- и углепластиков содержит широкий спектр герметизаторов, внутренних и внешних разделительных составов, добавок и очистителей.



Одним из важнейших факторов, обеспечивающих высококачественный результат в производстве изделий из ПКМ, является правильная подготовка поверхности оснастки. Только выбор правильных продуктов и соблюдение технологии их нанесения делают возможным получение необходимого результата.

Новая / очищенная оснастка	Герметизированная оснастка	Герметизированная оснастка с нанесённым разделителем
----------------------------	----------------------------	--



Одна из последних разработок компании Мюнх Хеми Интернешенэл для композиционной промышленности - герметизатор / топкоут Mikon® 399 MC. Этот инновационный, простой в нанесении продукт для использования на пористой поверхности мастер-моделей, изготовленных из модельных плит, гарантирует надежность процесса и высокое качество. Продукт поставляется в двух вариантах: бесцветный или черный. При небольшом расходе продукта усилие по его нанесению сведено к минимуму. Это позволяет заказчикам улучшить общую эффективность, снизить трудозатраты и себестоимость изделия.



Достаточно нанести 2-3 слоя продукта Mikon® 399 MC для герметизации всех пор модельного пластика. После просушки при комнатной температуре в течение 5 минут уникальный состав продукта обеспечивает глянцевую поверхность без дополнительной механической обработки и полировки.

Оптимальный результат достигается при использовании герметизатора Mikon® 399 MC с разделительными составами серии Mikon®.

Продукт	Назначение	Температура	Описание
SK2TR450-1 Mikon 399MC	Герметизация мастер-моделей из модельных плит, модельного пластика, а также из плит ДСП и других пористых материалов	Термостабилен до 842 °F (450 °C)	Специально разработанный для пористых поверхностей для создания высокоглянцевого слоя перед последующим нанесением разделительного слоя, доступен в прозрачном или глянцевом черном цветах

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЭПОКСИДНЫХ МАТРИЦ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПОЛИЭФИРИМИДОМ

Корохин Р. А.¹, Солодилов В. И.¹, Зверева У. Г.¹, Соломатин Д. В.¹, Бамборин М. Ю.²

¹ ФГБУН ИХФ им. Н. Н. Семенова РАН, г. Москва, Россия

² ОАО «ИНИИСМ», г. Хотьково, Россия

В настоящее время перед создателями полимерных волокнистых композитов стоит задача повышения их трещиностойкости и стойкости к динамическим нагрузкам. В последнее время для этих целей применяют модифицирование матриц терmostойкими термопластичными полимерами. Цель данной работы – повышение физико-механических свойств углепластиков путем модифицирования эпоксидной матрицы полиэфиримидом.

В работе исследовались композиции на основе эпоксидного олигомера ЭД-20, модифицированного полиэфиримидом (ПЭИ) Ultem-1010. Концентрацию (С) наполнителя варьировали от 0 до 25 % относительно массы смолы. В качестве армирующего наполнителя применяли углеродное волокно УКН-5000 (400 текс).

Исследование реологических характеристик проводили для композиций с отвердителем в осцилляционном режиме при температурах 120-180 °С. Показано, что в начале процесса отверждения вязкость при любой из исследованных температур с ростом концентрации ПЭИ возрастает примерно в 2,5 раза. В точке гелеобразования значения вязкости весьма сильно зависят от температуры, при которой происходит процесс; с ростом температуры вязкость в этой точке уменьшается на несколько порядков (табл.).

Таблица

Вязкость эпоксиполиэфиримидных смесей при различных температурах

T, °C Спэи, мас. %	120	150	180	120	150	180
	η _T при течении, Па*с (при t=30 с)			η ₀ при отверждении, Па*с (в точке гелеобразования)		
0	0,88	0,87	0,85	5,8*10 ³	3,5*10 ³	63
11,5	1,72	1,35	1,01	5,6*10 ⁴	3,7*10 ³	315
25	2,48	2,4	2,3	2,5*10 ⁵	1,7*10 ⁴	351

Трещиностойкость отверждённых матриц G_{IR}^{PM} монотонно увеличивается с ростом концентрации полиэфиримида; зависимость $G_{IR}^{PM} - C$ близка к линейной (рис.1). При содержании 25 % полиэфиримида значения G_{IR}^{PM} достигают 0,9 кДж/м², что в 3,5 раза больше G_{IR}^{PM} для немодифицированной отвержденной смолы.

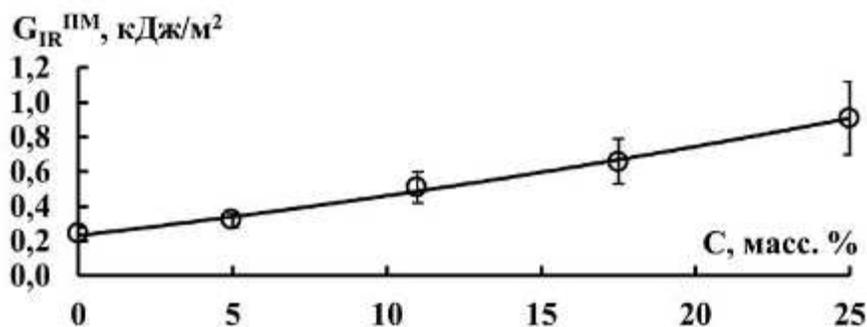


Рис. 1. Зависимость трещиностойкости композиций на основе ЭД-20 от концентрации ПЭИ

Добавление в смолу ЭД-20 полиэфиримида повышает также прочность при ударе с 96 до 160 МПа, т.е. на 70 %. Улучшение стойкости к удару определяется увеличением пластичности матрицы и изменением механизмов процесса разрушения, что связано с изменением структуры отверждённой матрицы при росте концентрации ПЭИ.

Исследование эпоксидного полимера методом ДМА при 3-точечном изгибе показало, что добавление полиэфиримида понижает модуль Юнга на 35 %. При этом температура стеклования увеличивается на ~40 °С.

При исследовании углепластиков были измерены их прочность при сдвиге и трещиностойкость, т.е. те характеристики, на которые существенное влияние оказывают свойства матрицы.

Показано, что введение ПЭИ в матрицу практически не приводит к увеличению прочности намоточного композита при сдвиге ни при квазистатическом, ни при динамическом нагружении.

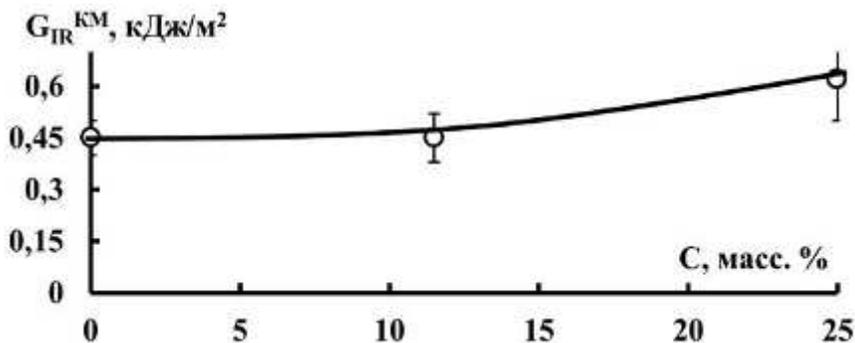


Рис. 2. Концентрационная зависимость трещиностойкости углепластиков на основе модифицированных эпоксидных матриц

Трещиностойкость (G_{IR}^{KM}) однонаправленных углепластиков при модифицировании монотонно увеличивается (рис. 2); максимальный рост составляет 40 %, что связано с изменением фазовой структуры матрицы в процессе отверждения. Значения G_{IR}^{KM} и G_{IR}^{PM} меняются симбатно (рис. 3). Рост трещиностойкости углепластика с ростом трещиностойкости матрицы при введении в эпоксидную матрицу терmostойкого термопласта явление достаточно общее. Ранее оно наблюдалось при модифицировании матриц однонаправленных композитов полисульфоном (рис. 3).

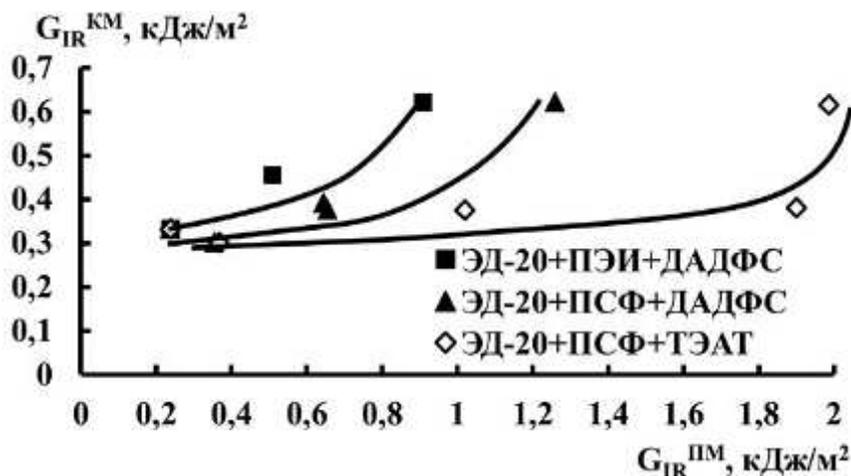


Рис. 3. Корреляция между значениями G_{IR}^{KM} и G_{IR}^{PM} для углепластиков на основе эпоксидных матриц, модифицированных термопластами

Таким образом, эпоксиполиэфиримидные смолы обладают рядом существенных преимуществ: у них более высокая температура стеклования, в несколько раз более высокая трещиностойкость и прочность при ударе, у углепластиков на их основе более высокая удельная вязкость разрушения. Увеличение физико-механических характеристик матриц и композитов при модифицировании эпоксидной смолы полиэфиримидом связано с изменением фазовой структуры матриц при увеличении в них концентрации термопласта.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФУЛЛЕРЕНОВ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПКМ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Портнова Я. М., Мазур В. В., Войлочников А. И., Плясункова Л. А.
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина, г. Обнинск, Россия

Активное внедрение в различные области техники полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных армирующих наполнителей и полимерной матрицы требует расширения температурной области эксплуатации. Особенный интерес вызывают ПКМ, способные длительно и стабильно работать не только в обычных условиях, но и при температурах 230-250 °С. При этом, в первую очередь, речь идет о повышении теплостойкости именно полимерной матрицы, которая во много раз ниже теплостойкости армирующих наполнителей, особенно углеродных.

В то же время использование традиционных полимерных матриц не позволяет в полной мере реализовать высокие упруго-прочностные показатели наполнителей нового поколения.

Для получения теплостойких, технологичных и относительно дешевых связующих используют бисмалеимиды (БМИ).

После отверждения при 200-300 °С БМИ образуют хрупкие сшитые системы, способные к эксплуатации до 230-250 °С. К недостаткам этих связующих могут быть отнесены повышенная хрупкость, разрушение при низких деформациях и недостаточная пластическая деформация.

Цель данной работы заключалась в создании путем наномодификации таких связующих, которые способны повысить прочностные характеристики ПКМ, в частности, прочность при сжатии и вязкость разрушения. В то же время модификация не должна приводить к усложнению технологического процесса изготовления деталей из ПКМ.

Эксплуатационные свойства ПКМ регулируют как изменением природы армирующих волокон и типов их укладки, так и введением в матрицу различных модификаторов, в том числе мелкодисперсных наполнителей. Среди последних все более широкое применение находят углеродные нанотрубки, фуллерены, графен. Эти материалы обладают уникальными упруго-прочностными свойствами и используются в качестве модификаторов для изменения физико-механических характеристик ПКМ.

Используемое в данной работе высокотемпературное связующее, является модификацией состава бисмалеимидного связующего Comprimide фирмы Evonic Degussa и предназначено для производства конструкционных углепластиков, работающих при

повышенных температурах до 250 °С в средне- и высоконагруженных деталях авиационной техники.

Углепластики на основе модифицированного фуллеренами и немодифицированного бисмалеимидного связующего были изготовлены методом автоклавного формования и дополнительной термообработкой при 250 °С в течение 6 часов. Была проведена оценка влияния фуллеренов на вязкоупругие характеристики, такие как модуль и тангенс угла механических потерь углепластика.

Показано, что в модифицированном углепластике наблюдается увеличение пика модуля потерь, что приводит к снижению вероятности образования хрупкой трещины в матрице, таким образом, повышается прочность и вязкость разрушения (рис.).

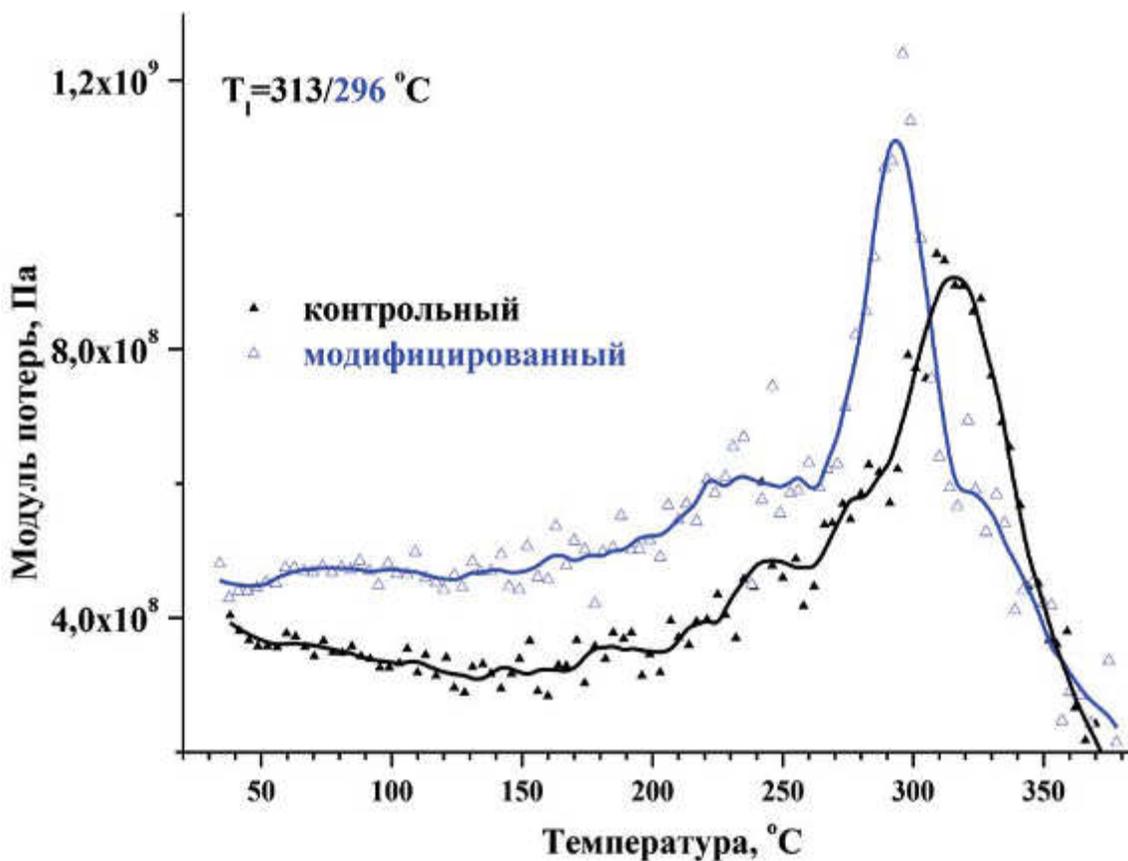


Рис. Зависимость модуля потерь, углепластика БМИ-3/3692 от температуры

Экспериментальным путем установлено, что введение фуллеренов оказывает существенное влияние на кинетику отверждения связующего. В ходе реакции отверждения в модифицированном препреге происходит увеличение теплового эффекта реакции отверждения, что свидетельствует о большей конверсии реакционноспособных групп (табл.). Это подтверждается увеличением предела прочности при сжатии более чем на 20 % по сравнению с контрольными образцами углепластика.

Тепловые эффекты реакции отверждения связующего БМИ-3
и препрега на его основе

	Температура пика ДСК, °С			Тепловой эффект реакции, ΔH, Дж/г
	T _о	T _м	T _к	
Связующее БМИ-3				
исходное	117	242	312	312
модифицир.фуллеренами	117	242	344	350
Препрег БМИ-3/3692				
исходное	153	221	316	98,9
модифицир.фуллеренами	160	225	327	138,6

Примечание: T_о – температура начала реакции отверждения; T_м – температура максимальной скорости реакции отверждения; T_к – температура завершения реакции отверждения.

Превышение показателя прочности при межслоевом сдвиге модифицированных образцов углепластика составило 10 % при комнатной температуре и 12 % при 250 °С по сравнению с контрольными.

Анализ фотографий микроструктуры поверхности излома модифицированных и немодифицированных образцов углепластика наглядно отражает изменения в характере разрушения. Более развитая поверхность микроструктуры излома модифицированного образца углепластика указывает на увеличение вязкости разрушения, что приводит к комплексному увеличению прочностных характеристик композита в целом.

ПЕРЕХОДНЫЕ ЗОНЫ В АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АРАМИДНОЕ ВОЛОКНО – ЭПОКСИДНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ

Чалых А. Е.¹, Будылин Н. Ю.¹, Алиев А. Д.¹, Пахомов К. С.², Антипов Ю. В.²

¹ Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН,
г. Москва, Россия;

² ОАО «ЦНИИСМ», МО, Сергиево-Посадский район, г. Хотьково, Россия.

Методами рентгеновского микроанализа, сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии исследованы закономерности формирования переходных зон в системах арамидные волокна марок Русар-НТ, Русар-С-600, Руслан-ВМ-600 – эпоксидное связующее ЭФА-Б. Структуру переходных зон и распределение связующего определяли на поперечных срезах микропластиков, сформированных после отверждения связующего по ступенчатому режиму отверждения при температурах 100/2; 130/3; 160/5 °С/ч.

Установлено, что в процессе формирования зоны контакта волокон со связующим на начальной стадии самопроизвольно образуется диффузионная область, соответствующая миграции эпоксидного олигомера в объем волокон и миграция макромолекул волокон в матрицу связующего. Протяженность зон взаимодиффузии составляет от 1 до 3 микрометров и зависит от температурно-временных условий формирования. Две диффузионные зоны разделены межфазной границей, на которой происходит скачок концентрации, соответствующий составам сосуществующих фаз.

Показано, что отверждение связующих не сказывается на характере распределения состава и протяженности концентрационных профилей. Однако в зоне растворения ароматических полимеров в связующем при отверждении последнего наблюдается фазовый распад, связанный с формированием пространственно-сшитых структур и снижением взаимной растворимости компонентов. Установлено, что деформации разрушения переходных зон в микропластиках происходят вблизи межфазной границы. Предложен механизм формирования «слабой зоны» в адгезионном соединении арамидных волокон - эпоксидное связующее.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-03-00390).

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ИСХОДЯ ИЗ АНАЛИЗА ТГ-КРИВЫХ И АНАЛИЗА ЕГО ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ

Якушкин П. Ю., Кордо М. Н., Забейжайлов М. О., Ланин А. В.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В работе рассмотрены вопросы определения энергии активации герметика Виксинт У-2-28, использующегося в конструкциях высокотеплонагруженных элементов летательных аппаратов. Расчет величины энергии активации герметика в данной работе проводился исходя из анализа деградации его решающего свойства – прочности на сдвиг – при высокотемпературном воздействии, а также из анализа ТГ-кривых. Для этих целей был использован разработанный метод определения механических характеристик герметика при высокоинтенсивном нагреве на образцах металл-металл, склеенных герметиком Виксинт У-2-28 [1].

С помощью данного метода были определены прочностные характеристики материала в зависимости от времени выдержки при заданной температуре. Полученные данные были приведены к виду, изображенному на рисунке, путем интерполяции полиномом третьей степени и нормировкой на 100 % при $t=0$. Методом нелинейной регрессии при помощи программного обеспечения NETZSCH Thermokinetics 3 были определены параметры энергии активации первой, второй и третьей стадий для трехстадийной модели и всех экспериментальных данных: 1) $30,8 \pm 3,9$ кДж/моль, 2) $145,5 \pm 8,2$ кДж/моль, 3) $179,2 \pm 10,6$ кДж/моль.

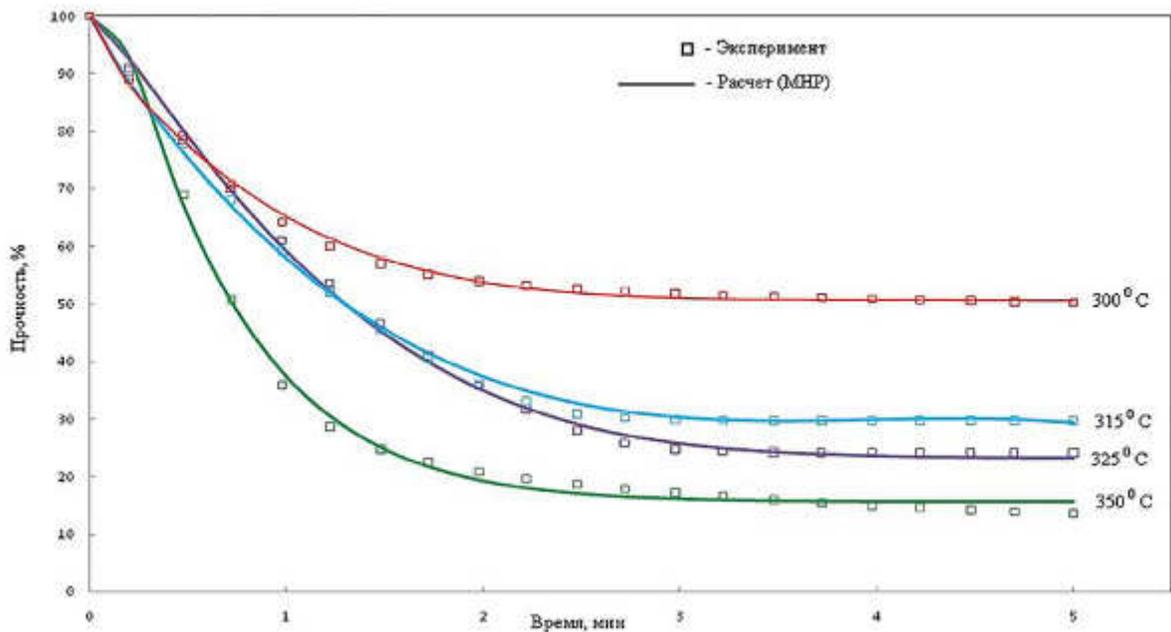


Рис. Кинетический анализ при испытаниях на сдвиг

Данные по величине энергии активации, рассчитанные исходя из деградации прочностных свойств, были сопоставлены с данными оценки величины энергии активации исходя из потери массы герметиком при проведении термогравиметрического анализа. Энергия активации термодеструкции также оценивалась с помощью программного обеспечения NETZSCH Thermokinetics 3. Установлено, что в данном герметике процесс термодегradации происходит в две стадии. Энергия активации первой и второй стадий для двухстадийной модели и всех экспериментальных данных: 1) $53,9 \pm 2,9$ и 2) $93,2 \pm 2,6$ кДж/моль, соответственно. Известно [2], что энергия активации деструкции очищенного материала равна $\approx 160-180$ кДж/моль.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод о том, что метод определения величины энергии активации процесса термодеструкции, основанный на изменении прочностных свойств, показывает более точный механизм разрушения (деструкции) материала, хотя и является наиболее трудозатратным.

Литература

1. Якушкин П. Ю., Забейайлов М. О., Рогов Д. А., Миронова Е. В. Разработка методов исследования механических свойств полимерных и полимерных композиционных материалов в условиях высокоинтенсивного нагрева // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: сб. тез. докл. XX Междунар. науч.-техн. конф.- Обнинск, 2013.– С. 106-108.
2. Брык М. Т. Деструкция наполненных полимеров.– М.: Химия, 1989.

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗЛИЧНЫМ НЕАВТОКЛАВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ ФОРМОВАНИЯ

Мосиук В. Н., Морозов С. В., Томчани О. В.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Традиционным способом изготовления высококачественных полимерных композиционных материалов является автоклавное формование. Основной недостаток этого метода - высокая стоимость оборудования и, соответственно, всего процесса формования, а также ограничение размеров изготавливаемых изделий габаритами самого автоклава.

Все более активное развитие неавтоклавных технологий формования является результатом стремления получать высококачественные полимерные композиционные материалы (ПКМ) без применения дорогостоящего автоклавного оборудования.

Для каждой технологии изготовления ПКМ характерны свои специфические особенности и, соответственно, свои требования к связующим, прежде всего, их реологическим свойствам. Производители связующих, как правило, разрабатывают их для конкретной технологии формования композиционных материалов. Более перспективным видится создание связующего, позволяющего получать ПКМ высокого качества по различным неавтоклавным методам формования.

Цель настоящей работы - оценка возможности изготовления ПКМ на основе разработанного в АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» расплавленного эпоксиимидного связующего ТЭИС-53 и стеклянной конструкционной ткани Т-10 различными неавтоклавными технологиями формования:

- вакуумной, являющейся наиболее простой и низкочувствительной неавтоклавной технологией (ВФ);
- формованием в двойном вакуумном пакете («Double Vacuum Bag» - DVB или «Double Vacuum Debulking» - DVD, ДВФ);
- пропиткой под давлением в присутствии вакуума (ППД).

Технологии вакуумного и дифференциального вакуумного формования предполагают предварительное изготовление либо препрега, либо армированной пленки связующего (пленки связующего контролируемой толщины, совмещенной с наполнителем без объемной пропитки последнего).

Реологические особенности разработанного связующего ТЭИС-53 (незначительное нарастание вязкости при 80 °С в течение длительного времени) позволяют изготовить качественный препрег. В то же время при 100 °С значение вязкости достаточно низкое, а длительность сохранения удовлетворительных значений достаточна для качественной пропитки наполнителя по технологии пропитки под давлением. Температурный диапазон минимальной вязкости для связующего довольно широк – от 100 до 140 °С, что позволяет варьировать режимы формования для выбора оптимального.

В ходе работы были выбраны технологические режимы формования стеклопластиков, изготовлены и исследованы опытные образцы, проведено сравнение их свойств с зарубежными аналогами.

Значения пористости для всех образцов ниже зачастую предъявляемых к композиционным материалам требований в 1-2 %, а значения прочностных свойств (предел прочности при сжатии и при изгибе) изготовленных ПКМ сравнимы со свойствами зарубежных аналогов (рис.), в том числе и полученных автоклавно (А). Связующее Hexcel F650 представляет собой бисмалеимидное связующее, а связующее Cycom 950-1 является эпоксидным связующим.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования эпоксидбисмалеимидного связующего ТЭИС-53 при получении композиционных материалов конструкционного назначения по всем опробованным технологиям.

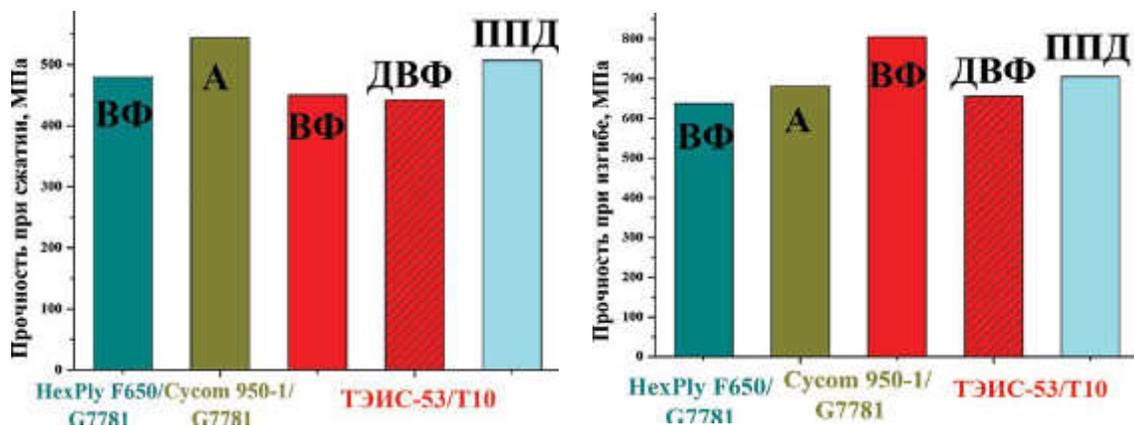


Рис. Сравнение свойств стеклопластиков на основе связующего ТЭИС-53 с зарубежными аналогами фирм Hexcel и Cytec

НИЗКОВЯЗКОЕ ЭПОКСИДНОЕ СВЯЗУЮЩЕЕ, НЕ ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЕ ГОРЕНИЕ, И СТЕКЛОПЛАСТИК НА ЕГО ОСНОВЕ

Ямщикова Г. А.

ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия

С каждым годом объем мирового производства всех видов полимеров возрастает. Среди них особое место занимают эпоксидные полимеры благодаря своим ценным технологическим и эксплуатационным свойствам. Одним из основных недостатков, ограничивающих область применения эпоксидных композиционных материалов, является их пожароопасность.

Разработанное низковязкое эпоксидное связующее ВСЭ-39 может использоваться для изготовления не поддерживающих горение стеклопластиков как методом пултрузии, так и инфузии.

В основном для создания негорючих материалов применяют пассивные (порошкообразные) антипирены, такие как триоксид сурьмы, хлор-, бром-, фосфорсодержащие вещества, а также керамические или стеклянные микросферы. Недостатком такого технического решения повышения огнестойкости является необходимость введения больших

количеств фосфорсодержащих веществ или стеклянных либо керамических микросфер, что приводит к резкому изменению реологических характеристик связующего и к невозможности реализации технологических процессов, обеспечивающих выход высококачественной продукции.

Для создания связующего ВСЭ-39 в качестве основных компонентов были выбраны галогенсодержащие эпоксидные смолы, содержащие в своем составе хлор и бром. Наличие галоидов в композиции приводит к снижению горючести эпоксидного связующего, но не обеспечивает нужной технологичной вязкости, необходимой для описанных выше методов изготовления стеклопластиков.

Для снижения вязкости композиции был использован активный разбавитель ЭС-М (3 глицидоксипропилтриметоксисилан), введение которого не только позволило разбавить систему, но и снизить горючесть отвержденной эпоксидной матрицы. В литературе описаны положительные эффекты использования полисилоксанового олигомера – (поли [метил (3 глицидоксипропил) силоксана]. (J. Appl. Polym. Sci. – 2012. – 124, – №6. – С.4915–4919.) и γ глицидоксипропилтриметоксисилана (Мостовой А. С. Перспективные материалы. – 2016. – №4. – С.60-66.) – в качестве антипиренов в эпоксидных системах.

На основе разработанного связующего методом инфузии были изготовлены стеклопластики, основные характеристики по горючести которых приведены в таблице.

Таблица

Оценка горючести стеклопластиков на эпоксидном связующем ВСЭ-39

Наименование материала	Толщина образца, мм	Продолжительность экспозиции пламенем горелки, с	Продолжительность остаточного горения, с	Длина обугливания, мм	Классификация
Стеклопластик ВПС-61	1,19	60	0 0 0 Ср.: 0	59 67 58 Ср.: 61	Трудно-сгорающий
Стеклопластик ВПС-61	2,22	60	5 4 2 Ср.: 4	63 42 45 Ср.: 50	Самозатухающий
Стеклопластик ВПС-61	19,61	60	3 3 4 Ср.: 3	56 55 53 Ср.: 55	Самозатухающий
<i>Допустимые значения не более:</i>			15	152	По нормам АП-25

Из приведенных экспериментальных данных видно, что предлагаемое связующее, обладая хорошими технологическими характеристиками, позволяет получить самозатухающие пластики и может быть использовано для изготовления композиционных изделий не только методом пултрузии, но и любым известным методом формования: намоткой, инфузией, пропиткой под давлением. Из перечисленных методов пултрузионный является наиболее производительным, не требующий больших трудовых затрат и высокой цены оборудования.

ТЕХНОЛОГИЯ КАПСУЛИРОВАНИЯ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ДИСПЕРСНО НАПОЛНЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВОСПРОИЗВОДИМЫМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

*Данилаев М. П., Богомолова О. Ю., Михайлов С. А.,
Польский Ю. Е., Ценцевицкий А. А.*

ФГБОУ ВО «КНИТУ им. А. Н. Туполева – КАИ», г. Казань, Россия

При создании композиционного материала важным является повышение адгезии частиц наполнителя к полимерной матрице. Один из перспективных, на наш взгляд, методов повышения адгезии основан на формировании сплошной полимерной оболочки на поверхности отдельных частиц наполнителя. Формирование полимерной оболочки вокруг отдельных субмикронных частиц возможно за счет осаждения на их поверхность частиц мономера, при смешении двух многофазных газовых потоков [1], с последующей полимеризацией мономера на поверхности субмикронных частиц [2]. При этом требуемая толщина полимерной оболочки, которую необходимо обеспечить на поверхности субмикронных частиц для различных применений, лежит в пределах от монослойной оболочки, толщиной несколько молекул мономера, до толщин ~100 нм.

Целью данной работы является исследование влияния полимерной оболочки на дисперсных частицах наполнителя полимерного композиционного материала на структуру и механические свойства ДПКМ.

Формирование сплошной полимерной оболочки на поверхности отдельных субмикронных частиц осуществлялось в газовой фазе путем осаждения мелкодисперсных капель мономера на поверхность субмикронных частиц. В основе подхода к формированию сплошной полимерной оболочки на поверхности субмикронных частиц в многофазных газовых потоках лежат три процесса: диспергирование исходных конгломератов субмикронных частиц и капель мономера, находящихся в газовых потоках; осаждение мелкодисперсных капель мономера на поверхность субмикронных частиц; полимеризация мономера на поверхности субмикронных частиц. Диспергирование исходных конгломератов частиц и капель мономера инициируется путем их заряда в поле униполярного коронного разряда атмосферного давления. За счет регулирования величин зарядов контролируются характерные размеры частиц. Для увеличения сечения неупругого столкновения при инициировании процесса осаждения субмикронные частицы и частицы мономера заряжают противоположными по знаку зарядами [3].

В качестве субмикронных частиц использовался порошок оксида цинка (чистый для анализа), средний размер частиц которого, в соответствии с сертификатом на материал, составлял ~100 нм, а в качестве мономера - стирол. Выбор частиц оксида цинка определялся отсутствием в составе примесей углеводородов, инертностью поверхности оксида к углеводородам воздуха и требуемыми размерами. Выбор типа мономера обусловлен высокой эффективностью полимеризации стирола при УФ облучении, а также за счет инициирования реакции полимеризации плазмой: средняя эффективность полимеризации стирола при этих воздействиях составляет ~0,9 [4].

Сплошность полимерной оболочки на поверхности отдельных субмикронных частиц и среднее значение ее толщины установлено методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и оже-спектроскопии на оже-электронном спектрометре JAMP-9500F («JEOL», Япония), а также методом фотонной корреляционной спектроскопии [5]. Среднее значение толщины полимерной (полистирольной) оболочки на поверхности субмикронных частиц (оксид цинка с характерными размерами ~300 нм): ~5 нм, что составляет 1,6 % от характерного размера частиц оксида цинка. Погрешность измерений не превышала 1 %.

Для исследования влияния оболочки на частицах наполнителя на механические свойства дисперсно наполненного полимерного композиционного материала было изготовлено 3 вида образцов (содержание компонентов выражено в массовых долях): образец 1: ЭД-20:М4=100:14; образец 2: ЭД-20:ZnO:М4=100:1:14; образец 3: ЭД-20: ZnO/PS:М4=100:1:14. Соотношение массовых долей обеспечивалось весовым методом с точностью 0,005 г. (максимальная относительная погрешность 8 %). Для сравнительного анализа структуры материалов дополнительно были изготовлены образцы еще двух видов, в которых массовая доля стирола соответствует массовой доле оболочек ZnO/PS в образце 3: образец 4: ЭД-20: стирол:М4=100:0,14:14; образец 5: ЭД-20:ZnO:-стирол: М4=100:0,86:0,14:14. Смешение частиц наполнителя и полимерной матрицы осуществлялось механическим способом. Механическое перемешивание полимера и частиц наполнителя осуществлялось до образования однородной смеси, после чего добавлялся отвердитель. Готовая смесь заливалась в формы, позволяющие получить образцы для исследования структуры и механических свойств.

Введение в полимерную матрицу капсулированных полистиролом субмикронных частиц оксида цинка привело к образованию четко выраженной «чешуйчатой» структуры ПКМ. Следует отметить, что такая структура характерна только для образца 3 и имеет высокую воспроизводимость: исследовались более 30 образцов типа 3. Причем введение соответствующих компонентов (образцы 4 и 5) в полимерную матрицу отдельно не приводило к формированию четкой «чешуйчатой» структуры.

Измерение твердости производилось на ультрамикротестере DУН-211 Shimadzu по ISO14577-1 с использованием индентора Виккерса. Измерения модуля упругости и прочности на сжатие производились по ГОСТ 4651-82 на универсальной настольной испытательной машине для физико-механических испытаний различных материалов Shimadzu A650 kNX при использовании программного обеспечения Shimadzu TrapiZiumx. Параметры испытания: скорость сжатия – 5мм/мин, максимальная нагрузка 50кН. Размер образца ПКМ 8x12x25 мм. Максимальное отклонение ±0,3 мм.

Установлено, что введение капсулированных полистиролом субмикронных частиц оксида цинка в полимерную композицию на основе эпоксидной смолы ЭД-20 позволяет увеличить твердость на 45 % и модуль упругости на 15 % по сравнению с композицией, в которой частицы не капсулированы.

Работа выполнена при поддержке задания № 11.34.214/К на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России, Фонда (Фонд содействия инновациям) содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (конкурс УМНИК-1-13-II, договор № 002218).

Литература

1. Данилаев М.П., Михайлов С. А., Польский Ю. Е., Файзуллин К. В. Сопоставительный анализ камер смешения двух многофазных потоков противоположно заряженных частиц // Изв. вузов. Авиационная техника.– 2012.– № 2.– С.69-71.
2. Пат. 054768 РФ МПК7 C08J3/12, C08J 3/28, C08J 9/14, C08J 9/00, B05D 1/04, B05C 3/00, B82Y 99/00. Способ получения порошка капсулированного полимерного материала (варианты) и устройство для его реализации (варианты) / Богослов Е. А., Данилаев М.П., Ефимов М. В., Михайлов С. А., Польский Ю. Е.; заявитель и патентообладатель КНИТУ им.А.Н.Т уполева. – № 2011136827/04; опубл. 22.06.2012.
3. Данилаев М. П., Богомолова О. Ю., Богослов Е. А., Михайлов С. А., Польский Ю. Е., Пашин Д. М. // Российские нанотехнологии.– 2014.– № 11-12.– С.41.
4. Ясуда Х. Полимеризация в плазме: пер. с англ.– М.: Мир, 1988.– 376 с.
5. B. J. Berne, R. Pecora Dynamic Light Scattering with Applications to Chemistry, Biology and Physics (Wiley-Interscience, N.Y., 1976).

ПРИМЕНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ КАРТ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПКМ В ОПЫТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Волков Д. А., Богданов А. П.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Использование стеклопластиков и углепластиков уже имеет давнюю традицию, однако увеличение доли ПКМ в конструкции самолета и внедрение композитов в ответственные узлы и агрегаты накладывает дополнительные и все более высокие требования к качеству материалов и конечных изделий.

Стандартные приемы контроля качества изделий и материалов не позволяют обеспечивать достаточный уровень надежности производственных процессов, а устранение возникших несоответствий значительно повышает издержки проводимых работ. Особенно это сказывается в условиях опытного производства, когда производственная система оперирует неоптимальными процессами, материалами с неустановившимися характеристиками и теоретически рассчитанными параметрами изделия, установленными в качестве критериев качества.

Применение методов статистического управления процессами открывает широкий горизонт для исполнителей – и, в первую очередь, для инженеров, с точки зрения упорядочивания и структуризации полученной информации и инструментов анализа фиксируемых явлений. Одним из наиболее эффективных инструментов анализа процессов является контрольная карта Шухарта.

На примере исследования причин изменения массы деталей из ПКМ показывается связь между естественной вариацией статистически управляемого процесса, возникновением внешних причин и влиянием этих причин на развитие процесса (рис. 1).

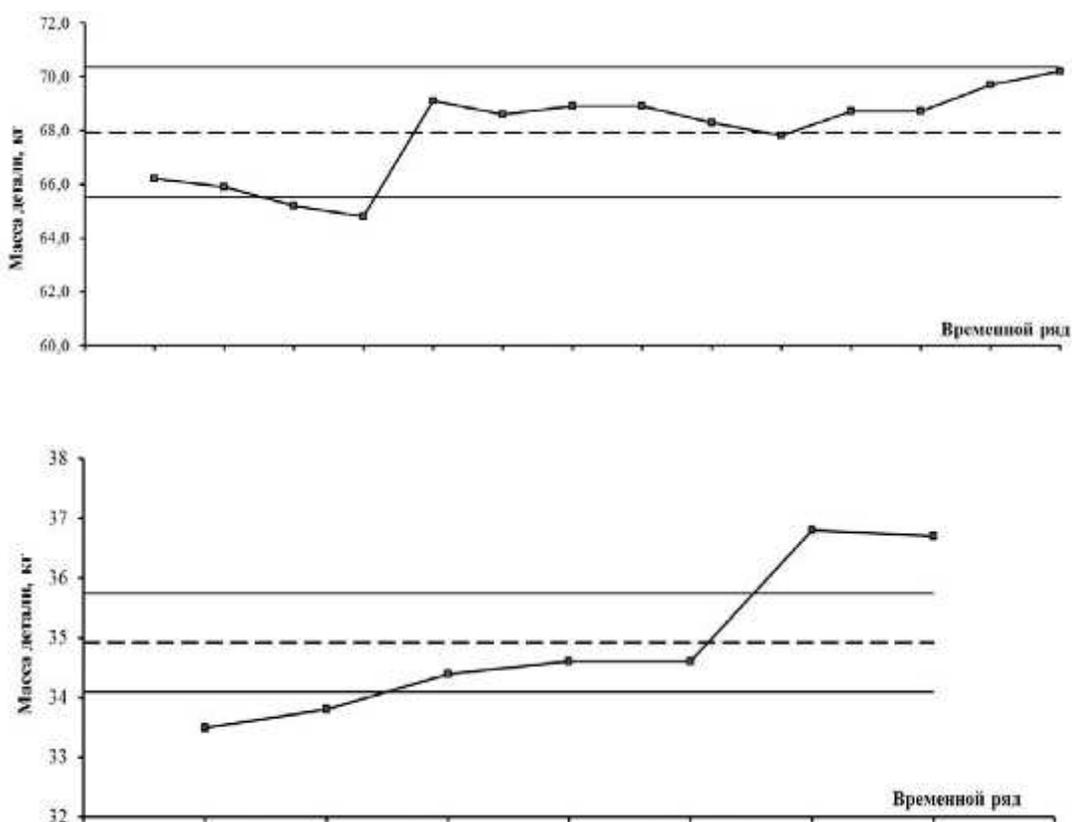


Рис. 1. Контрольные карты массы деталей

Масса любого агрегата самолета является одним из критических параметров. Однако в процессе опытного производства приходится пользоваться нормативом, указанным в конструкторской документации и рассчитанным по теоретическим, зачастую далеким от действительности, свойствам материалов. Это требует от производства постоянного анализа свойств всех материалов и комплектующих, анализа поведения параметра массы от детали к детали и подтверждения достигнутой стабильности технологического процесса.

В условиях отсутствия плановых факторов (изменения материалов, изменение конструкции), воздействующих на технологию изготовления детали, качественный производственный процесс должен демонстрировать признаки устойчивости и воспроизводимости. Наличие значений контролируемого параметра, выходящих за контрольные границы, сигнализирует о необходимости поиска особенной причины, вызвавшей изменение вариации.

В процессе наблюдения за параметрами изделий отмечена тенденция роста массы примерно в один и тот же период времени. При этом на картах нескольких деталей этот рост выглядит как воздействие особенной причины. Для определения этой причины была проведена работа по анализу всех данных, получаемых в процессе изготовления, в том числе результаты входного контроля (рис. 2).

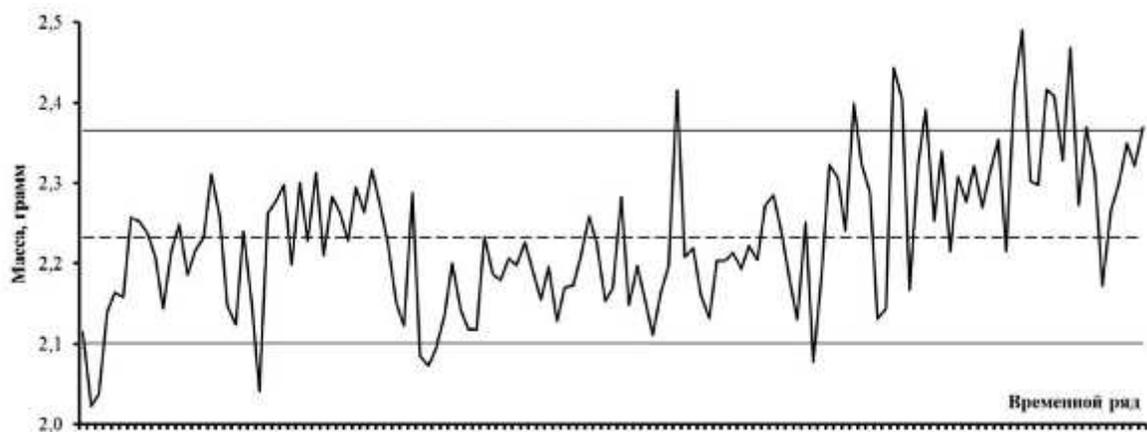


Рис. 2. Контрольная карта веса образцов препрега в поступивших партиях

В результате проведенного анализа были установлены основные причины роста массы деталей. Эти выводы привели к необходимости проработки стратегии взаимодействия с поставщиками и с потребителем.

На результатах проведенного анализа в докладе показывается необходимость работы с поставщиками и потребителями в поле статистически обоснованных критериев качества. Для этого предлагаются основные принципы взаимодействия как с производителем материалов или комплектующих, так и с заказчиком. Выстраивание отношений между всеми частями промышленной цепи «конструирование - производство материалов – изготовление деталей – получение готового изделия» на одном языке – языке статистического управления процессом - позволяет концентрировать усилия на конкретных проблемах и решать их совместно, минимизируя затрачиваемые ресурсы.

РАДИОПРОЗРАЧНЫЕ ИЗДЕЛИЯ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ – ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

Обухова Н. С., Баранов А. А., Ширко А. А., Шуль Г. С.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Радиотехника – это одна из первых областей народного хозяйства, в которой получили широкое применение стеклопластики. Благодаря своим диэлектрическим свойствам, обеспечивающим радиопрозрачность этих композитов, они используются в качестве обтекателей, укрытий, колпаков и т.д., защищающих антенные системы ракет, самолетов, радиолокационных станций (РЛС) наземного стационарного, подвижного и морского базирования. Многолетний отечественный и зарубежный опыт использования стеклопластиковых изделий радиотехнического назначения показывает их высокую надежность и эффективность.

Наше предприятие уже более 20 лет занимается разработкой технологий и выполняет серийные поставки для мобильных РЛС наземного и морского базирования

стеклопластиковых радиопрозрачных антенных укрытий 15 типоразмеров, 10 видов элементов антенных блоков, силовых балок различных габаритов для АФАР, а также воздухопроводов трех типоразмеров для кондиционирования антенн. Для всех поставляемых изделий разработана оснастка, преимущественно из полимерных композиционных материалов (ПКМ), которая успешно эксплуатируется, и в том числе для изготовления крупногабаритных укрытий. Для ряда изделий на композитной оснастке выполнено 50–100 циклов формования изделий при повышенных температурах.

Появление новых материалов и технологий, совершенствование известных, а также анализ опыта успешной эксплуатации используемых композитных форм определяют дальнейшее расширение номенклатуры изделий радиотехнического назначения из стеклопластиков, в том числе для новейших РЛС.

Все более широкое применение находят интегральные формованные и клееные конструкции, обеспечивающие повышение надежности при эксплуатации, снижение массы изделия и трудоемкости изготовления. Примером подобных конструкций является и разрабатываемый в данное время опытный образец крупногабаритного воздуховода (3,8 м) из стеклопластика сложной многоканальной замкнутой формы. Данное изделие должно заменить несколько отдельных деталей в составе антенны, повысив надежность работы, и снизить массу и трудозатраты на их изготовление.

Другим направлением новых разработок является увеличение габаритов, в частности радиопрозрачных укрытий, защищающих антенные системы от воздействия внешних климатических и эксплуатационных факторов. Такие работы требуют обоснованного направленного выбора материалов и технологии как для разрабатываемых изделий, так и для композитной оснастки для их изготовления.

В современных разрабатываемых и проходящих модернизацию радиолокационных станциях можно отметить увеличение объемов применения и номенклатуры изделий из стеклопластиков, наряду с ростом их конструкционной сложности и габаритов. При этом повышение уровня требований к размерной точности исполнения, минимальному отклонению от заданной формы приводит к необходимости оптимизации влияния конструктивно-технологических решений в цепочке изготовления: мастер-модель – композитная оснастка – радиотехническое изделие из ПКМ.

К ВОПРОСУ СНИЖЕНИЯ ОБЪЁМНОЙ ПОРИСТОСТИ ПРИ БЕЗАВТОКЛАВНОМ ФОРМОВАНИИ ПКМ

Вешкин Е. А., Постнов В. И., Плетинь И. И.

УНТЦ ВИАМ, г. Ульяновск, Россия

Увеличение объемов применения ПКМ в авиационной технике представляет собой широкомасштабную и комплексную проблему, связанную с повышением качества изготавливаемых деталей и стабильности свойств ПКМ, для решения которой необходимо разрабатывать современные технологии серийного производства изделий из ПКМ. Если силовые и особо ответственные конструкции необходимо изготавливать в автоклаве, то средне- и малонагруженные конструкции рационально изготавливать

способом вакуумного формования в термопечи или на обогреваемой оснастке. В этой связи широкое распространение при изготовлении слабо- и средненагруженных деталей из ПКМ для ЛА находят безавтоклавные методы формования (out-of-autoclave (OOA)). Процесс формования деталей из ПКМ под вакуумным мешком в термопечи или на обогреваемой оснастке позволяет получать крупногабаритные детали сложной пространственной формы без использования дорогостоящего оборудования, такого, как автоклав. К недостаткам изготавливаемых данным способом деталей из ПКМ на существующих серийных связующих отечественного производства можно отнести более низкие прочностные свойства (до 20 %), ввиду повышенной пористости и толщины монослоя в сравнении с пластиками, полученными вакуум-автоклавным и прессовым способами, где процесс формования ведётся с приложением избыточного давления формования до 0,7 МПа. В зарубежной и отечественной литературе описаны способы снижения пористости в деталях из ПКМ, получаемых с применением вакуумного формования, однако до настоящего времени нет комплексного подхода к решению данной задачи, позволяющего объективно и всесторонне выявить специфику технологических операций на всех стадиях изготовления.

В этой связи в работе авторами предложены подходы для всех стадий изготовления ПКМ, обеспечивающие снижение риска образования объёмной пористости в них.

Для этого:

- разработаны режимы термовакуумной обработки компонентов связующих;
- разработана методика расчёта содержания связующего в беспористом ПКМ;
- выбрана схема укладки слоёв вспомогательных материалов в технологическом пакете;

- разработаны методы выбора температурно-временных и манометрических параметров режима формования.

Применение данных подходов позволило снизить уровень пористости в ПКМ (таблица).

Таблица

Характеристика плит стеклопластика СТ-69НР-14

№ обр	Метод формования	σ_{01} , МПа	σ_{02} , МПа	τ , МПа	Толщина монослоя, мм	Плотность, $\frac{3}{\text{г/см}}$	Пористость, %	Водопоглощение, % (1 сутки)	Содержание связующего, %
1	автоклавный	$\frac{600}{510-625}$	$\frac{970}{940-995}$	$\frac{63}{57-66}$	0,22	1,92	1,3	0,19	33,3
2	прессовый	$\frac{535}{505-570}$	$\frac{920}{855-970}$	$\frac{62}{59-64}$	0,21	1,94	3,7	-	30,0
3	Вакуумный (серийный)	$\frac{450}{420-465}$	$\frac{755}{725-795}$	$\frac{54}{51-56}$	0,23	1,8	7	0,45	32,6
4	Вакуумный (разработан. техн.)	$\frac{540}{530-575}$	$\frac{930}{890-970}$	$\frac{61}{59-62}$	0,24	1,88	1,8	0,2	36,9

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ ТКАНЕЙ И 3D ТКАНЫХ ПРЕФОРМ ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сергеев В. Т.

АО «ТРИ-Д», гп. Андреевка, МО, Россия

В связи с интенсивным развитием авиа- и ракетостроения, атомной энергетики, освоением космоса возникла потребность в новых композиционных материалах, превосходящих по своим свойствам традиционные металлические и неметаллические материалы.

Сегодня находят широкое применение композиционные материалы на основе полимерной матрицы и многослойных тканых армирующих материалов. Для армирования композитов, работающих в наиболее экстремальных условиях – высоких температурах и механических нагрузках, применяются ткани из кремнеземных, кварцевых и углеродных волокон и их комбинации.

Преимущества композиционных материалов, полученных на основе многослойных тканых материалов и 3D тканых преформ, очевидны. Это, прежде всего:

- исключение риска расслоения и локализации трещин в композите;
- высокая стойкость к торцевому удару;
- повышение стойкости материала к деформационным нагрузкам и высокотемпературным воздействиям;
- стойкость к абляции и радиопрозрачность;
- уменьшение стоимости и трудоемкости изготовления высокоэффективных композитов;
- получение формы заготовки, практически соответствующей заданной форме композита, и наличие минимальной обработки после пропитки;
- улучшение воспроизводимости процесса производства композитов.

Области применения данных материалов обширны: ракетно-космическая отрасль, авиационная отрасль, судостроение, металлургия, сварка, термообработка, теплоизоляция и др.

Рассмотрены технологические аспекты и оборудование для производства многослойных тканей и 3D тканых преформ для армирования композиционных материалов.

ОСОБЕННОСТИ ПРОПИТКИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ПРЕФОРМ

Бухаров С. В., Лебедев А. К.

ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», г. Москва, Россия

Доля применения ПКМ в технике постоянно растёт. На сегодняшний день существуют два пути развития технологии конструкционных изделий из ПКМ авиационного и ракетно-космического назначения, актуальных на ближайшие 10 лет:

- пропитка связующим волокнистой предварительно уплотнённой пространственно-армированной преформы и последующее отверждение связующего с одновременным формованием ПКМ и изделия заданной формы;

– формирование пакета-заготовки автоматизированной выкладкой препрега в виде жгутов или лент, в том числе на термопластичной матрице, и последующее формование.

Технологию пропитки волокнистых прошитых преформ целесообразно использовать при изготовлении 50-500 деталей в год для РКТ или 500-50000 деталей в год для общего назначения – автомобилестроения, например.

В данной работе дан анализ технологии получения пространственных волокнистых заготовок и проблемам, возникающим при их пропитке полимерным связующим.

Параметры процесса пропитки взаимосвязаны. На качество изделия влияет совокупность эффектов, проявляющихся в процессе производства изделий. При проектировании определяется расположение мест ввода/отбора связующего, их конфигурация и расчётное время пропитки. При расчёте времени пропитки учитывается изменение вязкости связующего в определённом интервале температур, величина проницаемости каждой зоны преформы, величина краевого угла смачивания выбранным связующим поверхности волокнистого наполнителя, пористость преформы, зависимость распространения фронта пропитки от ориентации армирующего наполнителя, межслоевое взаимодействие (деформация волокон наполнителя при взаимодействии с фронтом), влияние большой или переменной толщины на изменение скорости движения фронта.

Скорость движения фронта пропитки зависит от заданного времени пропитки, которое не может быть меньше определённого значения, определяемого по заполнению микропористости в межволоконном пространстве и, с другой стороны, изменением реологических параметров связующего при заданных условиях (температура/давление). Обычно при сборке пакета-заготовки для последующей пропитки под давлением применяют наполнители с так называемым «биндером» - термопластичным клеем в виде растворимого в связующем порошка, обеспечивающим взаимное положение слоёв на этапе выкладки. При пропитке, которая проходит при температурах выше температуры размягчения «биндера», растворение этого состава происходит практически мгновенно. Это способствует возникновению ситуации, когда в одной области пакета-заготовки возможно взаимное перемещение слоёв из-за отсутствия адгезии при недостаточном трении между ними, а в другой области присутствует некоторое количество адгезива, скрепляющего поверхности соприкасающихся волокон, что препятствует сдвигу в точках соприкосновения и что приводит к дефектам типа нарушения ориентации или возникновению складок.

Межслоевая деформация при пропитке не происходит в случае прошивки слоистых пакетов-заготовок. Технологически реализовать связь между слоями преформы возможно различными методами. От выбранного метода прошивки будут зависеть изменение коэффициента проницаемости пакета, прочность как в плоскости, так и в трансверсальном направлении, изменение теплофизических характеристик материала.

Проницаемость, как правило, определяется экспериментально, при этом используются методы определения линейной и радиальной структуры потока. Другим подходом обеспечения качественной пропитки является расчёт режимов формования на основе моделирования с использованием современных программных методов (ESI Visual RTM, DISTORTION).

Для обеспечения достаточной точности при моделировании технологического процесса пропитки слоистых пакетов нужно вводить поправочные коэффициенты, учитывающие отклонение реальной модели от математической. В частности, чрезвычайно важна зависимость коэффициента проницаемости пакета из известного тканого наполнителя при разном давлении и отклонении схемы армирования.

Так как не существует стандарта на определение коэффициента проницаемости применительно к производителю, то и исследователи собирают установки для определения коэффициента проницаемости самостоятельно. Существует несколько популярных схем таких установок.

Наиболее популярный метод – оптическое наблюдение за распределением фронта в плоскости XY. Обычно определяется зависимость скорости движения фронта (по основе/утку при испытании одного слоя) в зависимости от условий эксперимента: градиент давления, уплотнение, вязкость связующего.

Для определения проницаемости в трансверсальном направлении используют отдельные установки или пористые проставки, позволяющие установить исследуемый пакет поперёк потока, при этом обеспечивается распределение потока. Для этого, например, используют сотоблоки, устанавливая между ними исследуемый пакет и вставляют в экспериментальную установку.

Наиболее явное расхождение в результатах моделирования наблюдается от перехода расчётной модели с микроуровня на макроуровень и наоборот. Исходя из этого, требуется проводить значительное количество экспериментов при разных условиях пропитки волокнистого каркаса с заданной схемой армирования, особенно для толстостенных преформ.

По результатам экспериментальных исследований методом компьютерной томографии определена общая пористость и виды дефектов заготовки. Получены образцы и проведены испытания физико-механических свойств ПКМ. Смоделированы процессы пропитки изготовленных толстостенных преформ плоской и цилиндрической форм.

Литература

1. Бухаров С. В., Зинин А. В., Базаев Е. М., Лебедев А. К. Технология пространственно-армированных полимерных волокнистых композиционных материалов в аэрокосмической технике // *Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники: мат. конф.*– М., 2015. (В рамках Международного авиационно-космического салона «МАКС-2015»).

2. Susanna Laurenzi, Mario Marchetti, «Composites and Their Properties».– InTech, 2012.

3. Душин М. И., Донецкий К. И., Караваев Р. Ю. Установление причин образования пористости при изготовлении ПКМ // *Труды ВИАМ.*– 2016.– № 6(42).

4. Labordus, M. Permeability measurements: in plane and through the thickness. In SG Advani (Ed.), *Flow processes in composite materials* Newark, Delaware, USA: University of Delaware.– 2004.– P.477-481.

5. S. Chatel, S. Maison-le-Poec, F. Trochu, Edu Ruiz, J. Bréard, P. Ouagne A PERMEABILITY MEASUREMENT METHOD DEDICATED TO A COMPOSITE PROCESS FAMILY // *The 9th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, Montréal (Québec), Canada.*– 2008.

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ АРМИРУЮЩИХ КАРКАСОВ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Чесноков А. В.¹, Тимофеев А. Н.², Тимофеев И. А.²

¹ ГБОУ ВО МО «Технологический университет», г. Королев, Россия

² ОАО «Композит», г. Королев, Россия

В Московском областном технологическом университете совместно с ОАО «Композит» создан инжиниринговый центр «Высокотемпературные композиционные материалы». В состав центра входят кафедра «Управление качеством и исследования в области новых материалов и технологий» и две учебно-научные лаборатории: «Лаборатория гетерогенного синтеза перспективных материалов» и «Лаборатория новых способов формообразования тугоплавких материалов и армирующих каркасов».

Наибольшее внимание в работах инжинирингового центра, в том числе в рамках договоров с ОАО «Композит», уделяется разработке технологий получения композиционных материалов на основе высокотемпературного термoplastичного полимера – полиэфирэфиркетона, технологиям контурного плетения, автоматизации процессов стержневой сборки, исследованиям микроструктуры различных композиционных материалов и полуфабрикатов, газофазным технологиям синтеза тугоплавких материалов.

Для исследований и реализации технологий контурного плетения проведен анализ потенциальных объектов производства и определены габаритные и конструктивные их особенности. На основании комплексной характеристики объектов производства сформулированы требования к плетельному оборудованию в виде технического задания и реализовано в виде оборудования поставщиком. Радиально-плетельная машина РП64-1-130 лабораторного класса с расширенными технологическими возможностями имеет по 64 веретена в двух направлениях движения и 64 веретена скелетного армирования. Оборудование позволяет: наносить оплеточный слой со сплошной поверхностной укрывистостью диаметром до 180 мм и более при сетчатой структуре; оплетать изделия длиной до 1500 мм при закреплении на опорах; изготавливать изделия с криволинейной осью за счет подвижных опор. Разъёмная конструкция плетельного модуля позволяет изготавливать изделия замкнутой формы. Имеется возможность плетения лент. Управление плетением и перемещением опор осуществляется по программе.

Разработана и изготовлена собственными силами установка автоматизированной сборки стержневых каркасов. Установка рассчитана на применение углепластиковых стержней диаметром 0,7 мм. Реализуемые на установке структуры армирования – 3D и 4D-л. Возможно изготовление цилиндрических, конических, сплошных или с



отверстием стержневых каркасов. Допускается переналадка оборудования для изготовления каркасов из стержней другого типоразмера.

Ведутся исследования по совершенствованию технологии изготовления изделий из перспективного высокотемпературного композиционного материала армированного полиэфирэфиркетона (ПЭЭК). В лаборатории с использованием высокотемпературного пресса получены образцы ПЭЭК, армированного углеродной тканью. Достигнута равномерность заполнения пор ткани ПЭЭК и получен равнотолщинный листовой материал. С применением высокотемпературного термопластавтомата разработана технология изготовления метизов из угленасыщенного ПЭЭК. Достигнута прочность армированного ПЭЭК в 1,3 раза превосходящая алюминий и в 2 раза его легче. По температурам эксплуатации полностью заменяет алюминий. При серийном производстве детали из армированного ПЭЭК по цене сопоставимы с алюминиевыми.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНЫХ УГЛЕСТЕКЛОПЛАСТИКОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОЙ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ

Ирошников А. И.^{1,2}, Половый А. О.¹, Мартиросян В. С.¹, Шкиркова Л. М.¹

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск;

² ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», г. Москва;

Последние десятилетия доля деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационных конструкциях, космических аппаратах и ракетах-носителях непрерывно растет. Возрастают требования к точности и качеству поверхности этих деталей, вследствие чего всё большее внимание должно уделяться конструкции и технологии изготовления соответствующей формообразующей оснастки.

Идеальная оснастка должна обеспечивать формостабильность при циклических температурных нагрузках автоклавного формования, а также обладать необходимым набором механических характеристик. При этом термического коэффициент линейного расширения материала (ТКЛР) оснастки должен быть близок к ТКЛР материала формуемой детали, а её стоимость должна обеспечивать рентабельность производства.

В связи с этим особый интерес представляет возможность применения в оснастке гибридных ПКМ, сочетающих в себе стеклянные и углеродные волокна, в качестве армирующих наполнителей для изготовления оснастки с теплофизическими характеристиками, максимально приближенными к аналогичным свойствам формуемого материала, что позволит обеспечить требуемые размеры изделий, а также минимизировать остаточные напряжения и коробление в них.

Образцы гибридных материалов были изготовлены методом вакуумной инфузии смолы Araldite 8615 (производство Huntsman). Образцы Г1 – Г4 отличаются количеством и последовательностью укладки слоев стеклянного (стеклоткань Т-10-14) и углеродного (углеродные ткани фирмы Porcher Industries арт. 3692 и арт. 2011) наполнителя. Процентное соотношение армирующих волокон в исследованных гибридных материалах приведено в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Соотношение армирующих волокон стеклянных/углеродных, %
Г1	72/28
Г2	72/28
Г3	45/55
Г4	45/55

- исследование плотности, пористости, компонентного состава образцов гибридных ПКМ;
- исследование теплофизических характеристик образцов гибридных ПКМ для изучения возможности получения на их основе материала с заданным набором свойств;
- исследование физико-механических характеристик (предел прочности при сдвиге, жесткость, предел прочности при сжатии) образцов гибридных ПКМ при комнатной температуре, а также при температуре 180 °С;
- исследование теплофизических и физико-механических характеристик образцов гибридных ПКМ, подвергнутых 25, 50 и 100 циклам автоклавного нагружения, имитирующего процесс формования, для изучения износа материала.

В табл. 2 приведены значения физико-механических и термодформационных свойств для гибридных образцов Г1-Г4. Соотношение армирующих волокон и схема армирования в углестеклопластиках определяют свойства полученных материалов. Результаты испытаний гибридных образцов представлены для исходного материала и после 50 циклов автоклавного нагружения.

Таблица 2

Параметры		Материал			
		Г1	Г2	Г3	Г4
Предел прочности при сжатии, МПа		323	385	327	364
Предел прочности при сдвиге, МПа	исх.	43,7	35,2	37,6	40,9
	50 циклов	42,4	29,9	34	34,3
ТКЛР $\alpha_{20-180} \times 10^6$, 1/°С	исх.	7,7	6,9	5,2	5,7
	50 циклов	7,4	6,8	5,0	5,6

Проведенные исследования свойств гибридных композитов (углестеклопластиков) различной структуры и состава свидетельствуют о возможности применения данных материалов при изготовлении формообразующей оснастки для производства прецизионных деталей из композитов путем максимального приближения термодформационных свойств оснастки и детали. Представлены экспериментальные теплофизические и физико-механические характеристики полученных материалов, а также план дальнейших исследований для определения закономерностей в изменении характеристик гибридных материалов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ ПРИ СКЛЕИВАНИИ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ОБШИВОК

Антошина Ю. Г., Богданова О. С.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Наряду с современными клеевыми композициями в настоящее время большую долю в деталях авиационного и космического назначения занимают проверенные годами клеевые составы. Один из них – широко распространенный эпоксидно-полиамидный клей ВК-9, хорошо зарекомендовавший себя в использовании в клеевых соединениях угле- и стеклопластиковых деталей, а также в соединениях их с металлами. Однако дальнейший рост объемов применения и появление новых композиционных материалов требует дополнительных исследований, в том числе и в области прочности клеевых соединений.

В работе экспериментально исследована прочность клеевого соединения посредством клея ВК-9 углепластиковых обшивок на основе волокна IMS-65.24К, полученных с использованием широко распространенного в изделиях космического назначения связующего ЭНФБ и нового связующего АпАТЭК-КПП-150. Изучалось влияние наиболее вероятных нарушений технологического процесса при склеивании углепластиковых обшивок на прочность клеевого соединения, а также учитывались особенности различных вариантов склейки обшивок без нарушения технологии.

В ходе исследования на образцах были смоделированы два варианта технологического исполнения клеевого соединения тонкостенных обшивок и два случая отступления от технологической документации при изготовлении по первому варианту (табл.).

Таблица

Технологическое исполнение образцов для исследований

№ образцов	Связующее	Технологический вариант	Отклонение от технологии	Характер разрушения
1	АпАТЭК-КПП-150	Клей наносится на обе поверхности сразу после снятия фильтровальной ткани	–	По клею. Клей равномерным слоем (пленкой) остался на одной из поверхностей
2	ЭНФБ	Клей наносится на обе поверхности сразу после снятия фильтровальной ткани	–	Расслоение обшивки. Частичное отслоение одной из обшивок
3	АпАТЭК-КПП-150	–	Клей наносится только на одну поверхность	По клею. Клей остался на обеих поверхностях
4	ЭНФБ	–	Клей наносится только на одну поверхность	По клею. Клей остался на обеих поверхностях
5	АпАТЭК-КПП-150	Клей наносится на обе поверхности после снятия фильтровальной ткани, зашкуривки и обезжиривания поверхностей	–	По клею. Клей остался равномерно на обеих поверхностях
6	АпАТЭК-КПП-150	Клей наносится на обе поверхности сразу после снятия фильтровальной ткани	Нарушение режима выдержки клея перед нанесением	По клею. Клей равномерным слоем (пленкой) остался на одной из поверхностей

Исследования прочности клеевого соединения проводились при испытании образцов на отрыв по ГОСТ 14760-69. Результаты испытаний образцов, указанных в таблице, представлены на рис. 1.

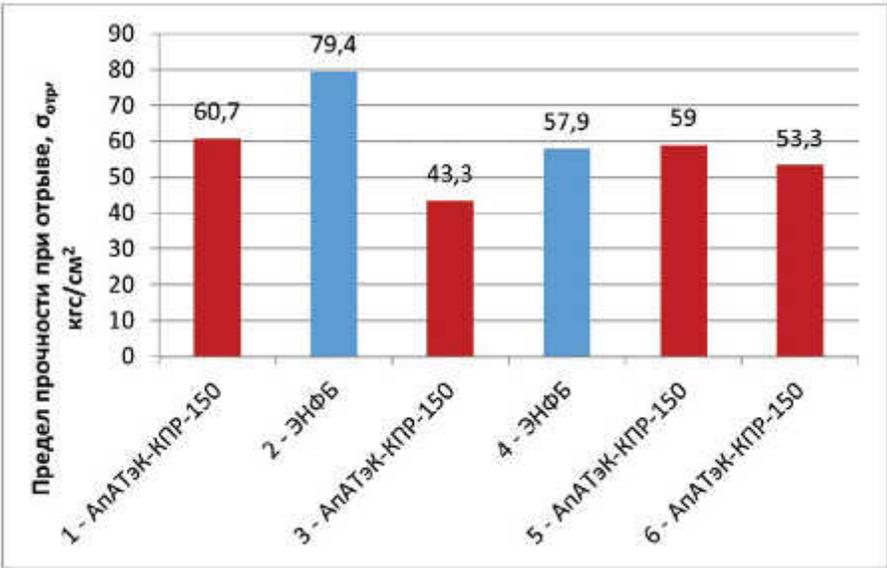


Рис. 1. Прочность клеевого соединения на отрыв

Были также проведены исследования влияния подготовки поверхности под склейку зашкуривкой на прочностные характеристики при сдвиге клеевого соединения образцов углепластика на основе связующего АпАТЭК-КПР-150. Испытания проводились по ASTM D 3528-96. Результаты испытаний представлены на рис. 2.

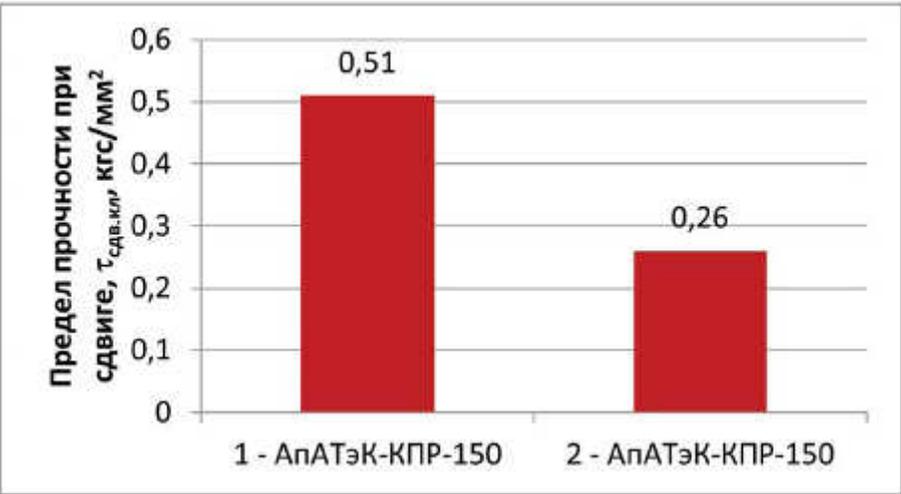


Рис. 2. Прочность клеевого соединения на сдвиг

Проведенные исследования показали следующее:

- прочность клеевого соединения на отрыв углепластиков на основе связующего АпАТЭК-КПР-150 на 23-25 % ниже, чем у углепластиков на основе ЭНФБ;
- зашкуровка поверхностей под склейку углепластиков на основе связующего АпАТЭК КПР-150 приводит к двукратному улучшению прочностных характеристик при сдвиге клеевого соединения;
- нарушение технологии при склеивании приводит к снижению прочности клеевого соединения для углепластиков на 25-30 %.

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ СДВИГЕ В ПЛОСКОСТИ СЛОЯ

Картабаев С. Ж.¹, Русланцев А. Н.^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», г. Москва, Россия;

² ФГБУН ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

Введение

В настоящее время существует ряд методов определения сдвиговой прочности композиционных материалов. Однако они не обеспечивают создание чистого сдвига во всей рабочей зоне образца [1]. Также существенное влияние на характеристики композиционного материала оказывают технологические факторы, поэтому такой материал следует рассматривать как создаваемый одновременно с конструкцией [2]. Следовательно, характеристики материала целесообразно определять на образцах, сходных по методу создания и укладке с конструкцией.

В настоящей работе предлагается методика определения прочности образца при сдвиге в плоскости слоя при испытаниях плоских образцов на растяжение-сжатие.

Критерии прочности

Механизмы разрушения многослойных композитов существенно отличаются от механизмов разрушения металлов. Во время эксплуатации в них возникают дефекты, которые в дальнейшем ведут к расслоению или растрескиванию матрицы. Разрушение композита может происходить постепенно, начиная с потери герметичности или начальной стадии разрушения, расслоения, затем переходя в область больших деформаций и заканчивая полным разрушением. Также имеют место подходы анализа микромеханики материала. Существует ряд феноменологических подходов для оценки предельного состояния композита, или так называемых критериев [2].

Согласно критерию максимальных напряжений, материал разрушается, когда локальное напряжение в одном из главных направлений превышает порог прочности материала. Критерий максимального главного напряжения не учитывает взаимосвязей между различными составляющими напряжения, при этом он учитывает анизотропию материала (пороги прочности в различных направлениях могут отличаться) и различие свойств материала при сжатии и растяжении. Также широко применяется критерий максимальных деформаций [2].

Критерий Цая-Хилла учитывает энергию формоизменения – составляющую общей энергии деформации, которая побуждает изменение формы. Также он учитывает взаимосвязь между компонентами напряжения. Критерий Цая-Ву учитывает полную

энергию деформации: энергию формоизменения и энергию расширения. Он является более полным, чем критерий Цая-Хилла, и способен различать пределы прочности на сжатие и растяжение [2]. Также в инженерной практике применяются и другие критерии.

Предлагаемый подход

В настоящей работе предлагается подход, основанный на следующем предположении: при испытании каждого образца, перед его разрушением возможно определить напряженно-деформированное состояние материала в рабочей зоне образца, и, соответственно, вычислить напряжения в главных осях слоя. Напряжения в главных осях слоя являются одной из точек на поверхности разрушения материала, которая описывается критерием разрушения. Так, поверхность разрушения в пространстве напряжений при использовании критерия максимальных напряжений имеет форму параллелепипеда, а при применении критерия Цая-Хилла – форму эллипсоида. Изменяя схему армирования образцов, направление нагрузки, можно получить несколько точек на поверхности разрушения материала. Далее, задавшись критерием прочности, можно решить задачу оптимизации и определить недостающие параметры, а в данном случае вычислить прочность материала на сдвиг в плоскости слоя. Таким образом, целевую функцию можно записать в следующем виде:

$$\Phi(F_1^+, F_1^-, F_2^+, F_2^-, F_{12}) = (F(F_1^+, F_1^-, F_2^+, F_2^-, F_{12}) - 1)^2 \rightarrow 0,$$

где $F(F_1^+, F_1^-, F_2^+, F_2^-, F_{12}) \geq 1$ – критерии разрушения материала (слоя); F_1^+ – прочность слоя на растяжение вдоль направления армирования; F_1^- – прочность слоя на сжатие вдоль направления армирования; F_2^+ – прочность слоя на растяжение поперек направления армирования; F_2^- – прочность слоя на сжатие поперек направления армирования; F_{12} – прочность слоя на сдвиг.

В настоящей работе прочность вдоль и поперек направления армирования была определена по результатам испытаний однонаправленных образцов, а прочность слоя при сдвиге в плоскости слоя определяется по испытаниям перекрестно армированных образцов со схемой укладки $\pm\theta$.

Данный алгоритм был применен к результатам испытаний углепластика БМИ-3/3692 на основе равнопрочной ткани и бисмалеимидного связующего. Из данного материала была изготовлена 14-слойная пластина, все слои ткани в которой были ориентированы в одном направлении, затем из нее были вырезаны образцы под углами 0° , 90° и 45° . Таким образом были получены образцы с укладками $[0^\circ]$, $[90^\circ]$ и $[\pm 45^\circ]$. Образцы были испытаны на испытательной машине Instron-7709, для регистрации деформаций использовалась тензостанция СИИТ-4. На каждый образец было наклеено 3 тензодатчика: два в продольном направлении и один в поперечном.

По результатам испытаний образцов с укладками $[0^\circ]$ и $[90^\circ]$ были определены прочности на растяжение вдоль и поперек основы ткани: $F_1^+ = 800$ МПа, $F_2^+ = 900$ МПа. Также были определены упругие постоянные материала: $E_1 = 90$ ГПа, $E_2 = 83$ ГПа, $\nu_{12} = 0,04$, $G_{12} = 6,5$ ГПа. При испытаниях образцов с укладкой $[\pm 45^\circ]$ прочность вдоль оси образца составила 200 МПа. При помощи теории слоистых пластин было определено НДС слоя в его главных осях: $\sigma_1 = 106$ МПа, $\sigma_2 = 94$ МПа, $\tau_{12} = 100$ МПа.

Поскольку характер разрушения не учитывался, в качестве критериев разрушения были применены критерий максимальных напряжений и критерий Цая-Хилла. При использовании критерия максимальных напряжений прочность образца на сдвиг составила $F_{12} = 100$ МПа. При применении критерия Цая-Хилла прочность при сдвиге составила

$$F_{12} = \frac{\tau_{12}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_1}{F_1}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_2}{F_2}\right)^2 + \frac{\sigma_1 \sigma_2}{F_1 F_2}}} \approx 99 \text{ МПа.}$$

Выводы

Предложен метод определения прочности углепластика при сдвиге в плоскости слоя, получены результаты для углепластика БМИ-3/3692, показано удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных.

Литература

1. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Мир материалов и технологий. Композитные материалы // Механика и технология.– М.: Техносфера, 2004.– 408 с.
2. Композиционные материалы. Справочник / В. В.Васильев, В. Д., Протасов, В. В. Болотин и др.– М.: Машиностроение, 1990.– 512 с.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Обухова Н. С., Захаров Е. В., Морозова З. В., Шуль Г. С.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Рост объёмов применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), в частности углепластиков, в ответственных нагруженных конструкциях авиационного назначения определяет необходимость контроля не только уровня физико-механических характеристик, но и компонентного состава. При этом в технической документации на композитные изделия предусматриваются требования по значениям плотности материала, объёмного содержания армирующего наполнителя и связующего, а также пористости. Следует отметить жёсткие требования по уровню пористости: 1-2 %, а в ряде случаев – не более 1 %.

В настоящее время известно достаточно много отечественных и зарубежных стандартов и методик отдельных предприятий для оценки плотности и компонентного состава ПКМ [1-7].

Для определения плотности композитов преимущественно используется метод гидростатического взвешивания образцов [1, 3, 4, 6], который достаточно чувствителен к изменению соотношения компонентов в пластике и особенно – к колебаниям пористости. Получение надёжных и воспроизводимых результатов при реализации

таких испытаний может быть обеспечено при выполнении повышенных требований к качеству поверхности исследуемых образцов. Поверхность последних должна быть гладкой, края реза зашлифованы [1, 6].

Однако сейчас при формовании деталей из ПКМ широко применяются вспомогательные «жертвенные ткани», которые после удаления обеспечивают равномерную шероховатость поверхности, необходимую для последующих операций сборки-склейки и окраски изделий. Наличие такой шероховатости требует специальных методических решений при испытаниях, так как плотность образцов с различной шероховатостью может отличаться на 2–5 %, соответственно пористость будет изменяться при этом от 0,5 до 3 %.

Массовое содержание связующего с последующим расчётом содержания волокна и пористости оценивается по потере массы связующего при прокаливании (выжигании) или растворении в среде окислителей [2, 5, 7]. Следует отметить, что получение надёжных и воспроизводимых данных при таких испытаниях требует направленной предварительной оптимизации режимов выжигания, концентрации растворов окислителей и длительности процессов для ПКМ с конкретными наполнителем и связующим. В противном случае зачастую в результате длительного эксперимента и последующих расчётов получается отрицательное значение пористости и необходим повтор трудозатратных испытаний.

Другие методы определения объёмного содержания волокна в пластике [5] используют данные поверхностной плотности углеродного наполнителя, допустимые значения которой согласно паспортным характеристикам могут изменяться на 10 %. Допуски в широких пределах на габариты образцов для этих испытаний также приводят к разбросу результатов определения и объёмного содержания волокна, особенно пористости.

В АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» разработана и уже более 15 лет успешно применяется методика определения плотности и компонентного состава ПКМ различной природы [3]. В её основе лежит экспериментальное определение двух значений плотности композита, измеренных методом гелиевой пикнометрии (эффективная, близкая к теоретической плотность – $\rho_{эф}$), и методом гидростатического взвешивания (кажущаяся плотность – ρ_k). Кроме того, на гелиевом пикнометре определяются значения плотности связующего и армирующего наполнителя.

Определение пористости при этом сводится к экспериментальному определению указанных плотностей и расчёту по формуле:

$$П = \left(1 - \frac{\rho_k}{\rho_{эф}}\right) \times 100 \%$$

Малая погрешность используемых экспериментальных методов измерения плотности определяет высокую точность и воспроизводимость рассчитываемых данных по компонентному составу ПКМ.

Сравнительный анализ данных по компонентному составу ПКМ на основе эпоксидных и полиимидных связующих с углеродными наполнителями, полученных разными методами, показывает существенные различия в результатах. Так, если для одного и того же композита объёмное содержание волокна по абсолютному значению

в пластике отличается на (3–5) %, то пористость изменяется в пределах 0,4–2,6 %, т.е. более чем в 5 раз, а при выжигании ряда образцов получены отрицательные значения пористости.

Результаты оценки компонентного состава по нашей методике хорошо согласуются с данными электронной микроскопии и оптимизированных режимов выжигания.

Таким образом, для получения надёжных воспроизводимых результатов по оценке компонентного состава разрабатываемых и применяемых ПКМ необходимо направленное и обоснованное применение методов контроля.

Литература

1. ГОСТ 15139–69. Пластмассы. Методы определения плотности (объёмной массы).
2. РТМ 1.4.401–87. Определение процентного содержания волокна, связующего и пор в углепластике.– ВИАМ, 1987.
3. ПМ 596.1501–2014 (выпущена в 2000 г). Определение плотности, пористости и компонентного состава полимерных композиционных материалов.
4. ASTM D 792–00. Определение плотности и удельного веса пластмасс методом вытеснения жидкости.
5. ISO 14127:2008. Композиты полимерные. Методы определения содержания смолы, волокна и пустот в углекомпозитах.
6. ASTM D 2734–94 (исправлен в 2003 г). Методы испытаний для определения пустот в армированных пластиках.
7. ASTM D 2584. Потери при сжигании отверждённых армированных смол.

СРАВНЕНИЕ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ДЛЯ ПРОЦЕНТИЛЕЙ СЛУЧАЙНОЙ ВЫБОРКИ НА ОСНОВАНИИ ФОРМУЛ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ И ПОЛУЧЕННЫХ БУТСТРЕП-МОДЕЛИРОВАНИЕМ

Гадолina И. В.¹, Лисаченко Н. Г.², Попов А. Г.²

¹ ФГБУН ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия;

² АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

При сертификации высокотехнологичной продукции необходимо на основании проведенного эксперимента оценить доверительные интервалы для ряда процентилей, в частности, определить так называемый В-базис [1], что соответствует нижней границе 95 % доверительного интервала 10 % процентиля (чем меньше образцов в выборке, тем шире интервал). Для вычисления среднеквадратических ошибок значений процентилей разработаны весьма сложные зависимости, причем при выводе этих соотношений используются предположения о распределениях ошибок некоторых статистик, которые не всегда могут быть обоснованы.

Статистический бутстреп – это способ получения робастных оценок среднеквадратических ошибок и доверительных интервалов. Метод основан на многократном моделировании так называемых бутстреп-выборок на основе исходной выборки и ос-

нован на интенсивном использовании ЭВМ [2]. Для статистик, для которых существуют точные математические выражения для анализа изменчивости, на ряде примеров было показано удовлетворительное соответствие этих величин оценкам, полученным статистическим моделированием бутстреп. Для ряда статистик, таких, например, как 10 % процентиль, представляют интерес сопоставления оценок бутстреп с применяемыми до настоящего времени методами с целью дальнейшего их внедрения в практику инженерных расчетов.

Исследовалось распределение прочности образцов при растяжении, изготовленных из препрега марки HexPly на основе углеродной ленты.

Визуальная проверка однородности шести выборок по шести технологическим рулонам проводилась на основании диаграмм «Ящик с усами» [3] и показана на рис. 1. На основании визуальной проверки первый рулон был исключен из рассмотрения, как имеющий прочность, отличающуюся от остальных.

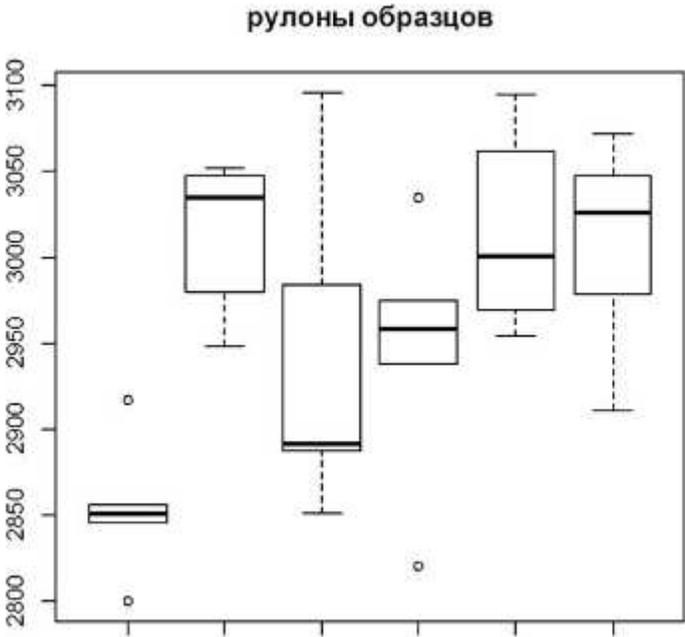


Рис. 1. Диаграмма «Ящик с усами» для проверки однородности выборок по шести рулонам. По вертикали отложены значения прочности в МПа. Построено в среде R

Далее из оставшихся данных была сформирована объединенная выборка, по которой, собственно, проводился анализ доверительных интервалов 10 % процентиля [4].

Нижняя граница доверительного интервала по [1] составила 2812 МПа.

Для построения доверительных интервалов с применением бутстреп-моделирования было разыграно 100 бутстреп-выборок на основе экспериментальной выборки. (Исследование необходимого и достаточного числа бутстреп-выборок было проведено в [5]. В данном случае использовалось $V=100$ бутстреп-выборок). Вариационный ряд распределения 10 % процентиля по 100 бутстреп-выборкам показан на рис. 2. На рисунке по вертикали

отложены значения прочности в МПа, по горизонтали номера бутстреп-выборок. На основе вариационного ряда строятся 95 % доверительные интервалы по значениям индексов LOW (нижний) и UP (верхний), которые составили LOW=2,5 и UP=97,5 (поскольку номера индексов не целые, использовались медианы). Таким образом, если случайную величину прочности обозначить X , то $X_{2,5}=2819$ МПа и $X_{97,5}=2900$ МПа. Искомая нижняя граница составляет 2819 МПа, что сопоставимо со значением, полученным ранее.



Рис. 2. Вариационный ряд распределения 10 % процентиля прочности материала, построенный по 100 бутстреп-выборкам

Выводы

Значения нижней границы 95 % доверительного интервала 10 % процентиля прочности, полученные по используемым ранее формулам и по моделированию бутстреп, близки. Представляет интерес исследование возможности применения бутстреп для анализа точности экспериментально полученных прочностных характеристик высокотехнологичной продукции.

Литература

1. Composite Materials Handbook – 17 (CMH-17). SAE International on behalf of CMH-17, Wichita State University, March 2012. – Chapter 8 Statistical Methods.
2. Диаконис П., Эфрон Б. Статистические методы с интенсивным использованием ЭВМ // В мире науки.– 1983.– № 7.– С.60-73.
3. R Core Team R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.– 2014. URL: <http://www.R-project.org/>.
4. Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R.– Тольятти: Кассандра, 2013.– 314 с.
5. Гадолина И.В. Применение бутстреп-моделирования при построении доверительных интервалов по цензурированным выборкам // Надежность и контроль качества.– 1986. – № 6.– С.53-57.

МОДЕЛЬ ПОЛЗУЧЕСТИ УГЛЕПЛАСТИКА БМИ 3/3692 НА ОСНОВЕ РАВНОПРОЧНОЙ ТКАНИ

Русланцев А. Н.^{1,2}, Думанский А. М.^{1,2}, Портнова Я. М.³

¹ ФГБУН ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия;

² ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», г. Москва, Россия;

³ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Введение

В настоящей работе предложена модель ползучести равнопрочного тканого углепластика БМИ-3/3692 с бисмалеимидной матрицей при сдвиговом нагружении в плоскости слоя.

В [1] показано, что наиболее значительные временные эффекты у волокнистых композиционных материалов проявляются при сдвиговом нагружении в плоскости слоя, в то время как при нагружении в направлении и поперек армирования реологические эффекты пренебрежимо малы.

В [2] используются соотношения наследственной механики. Наследственный подход является наиболее общей формой соотношений между напряжениями и деформациями при переменных во времени нагрузках и позволяет идентифицировать ряд взаимосвязанных функций, характеризующих материал.

Описание эксперимента

Образцы были вырезаны из 14-слойной пластины саржевого плетения. Все слои были ориентированы в одном направлении. Образцы вырезались под углами 0°, 30°, 45° и 90° к направлению основы ткани. Кривые деформирования образцов были получены при нагружении на испытательной машине Instron-7709. Образцы каждого направления вырезки нагружались со скоростью, соответствующей квазистатическому нагружению, с последующей разгрузкой. Последнее нагружение производилось до разрушения. На каждый образец было наклеено 3 тензодатчика: два в продольном направлении и один в поперечном. Деформации регистрировались при помощи тензостанции СИИТ-4.

Образцы, вырезанные вдоль основы ткани, нагружались до напряжений 220, 440 и 660 МПа с последующей разгрузкой, а затем до разрушения, которое произошло при 800 МПа. Образцы, вырезанные поперек основы, нагружались до 75, 150, 300 и 450 МПа, а затем до разрушения (900 МПа). Диаграммы деформирования близки к линейным, упругие характеристики практически не зависят от уровня напряжений и скорости нагружения. Эти эксперименты позволили определить следующие упругие характеристики слоя: $E_1=90$ ГПа, $E_2=83$ ГПа, $\nu_{12}=0.04$.

Образцы, вырезанные под углом 30° к основе, нагружались до 100 и 150 МПа, а затем до разрушения (200 МПа). Образцы, вырезанные под углом 45°, нагружались до 55, 110, 165 МПа и до разрушения (200 МПа). Кривые деформирования этих образцов близки к линейным при напряжениях, не превышающих 0,4 от разрушающих, и становятся нелинейными при повышении нагрузки. Вид диаграмм слабо зависит от скорости нагружения. Был определен модуль сдвига в плоскости слоя: $G_{12}=6.5$ ГПа.

Другие образцы, вырезанные под углом 45°, были испытаны на ползучесть. На протяжении всего эксперимента регистрировались продольные и поперечные дефор-

мации. Образцы были нагружены до 160 МПа за 15 секунд, затем в течение 2 часов поддерживался данный уровень напряжений без видимых признаков разрушения образца. Максимальные зарегистрированные деформации составили 1,8 %.

Математическая модель

В [3] показано, что зависимость между напряжениями и деформациями может быть представлена в виде определяющего соотношения наследственного типа:

$$G_{12}^0 \gamma_{12} = (1 + K^*) \tau_{12}$$

Используя выражение для резольвенты, было получено соотношение для напряжений, вычисляемых по известной истории деформирования: $\tau_{12} = G_{12}^0 (1 - R^*) \gamma_{12}$

Определяющие соотношения для слоя могут быть записаны в следующей матричной форме:

$$\sigma_{12} = (G_{12}^0 - G^0 R^*) \varepsilon_{12}$$

Далее, производя вычисления при помощи теории слоистых пластин, получаем выражение для матрицы податливости пакета: $S_{xy}^* = Q \text{diag} (1 - \lambda_i R^* (\mu - \lambda_i)) Q^{-1} S_{xy}^0$

Определяющие соотношения для пакета записываются в следующем виде: $\varepsilon(t) = S_{xy}^* \sigma_{xy}(t)$, где S_{xy}^* – матрица податливости, $\sigma_{xy}(t)$ – функция, описывающая историю нагружения.

Удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными данными было получено при использовании ядра Абеля:

$$R(t) = \frac{t^\alpha}{\Gamma(1 + \alpha)}, \text{ определен параметр ядра } \alpha = -0.75$$

Расчетные и экспериментальные кривые ползучести углепластика, вырезанного под углом 45°, представлены на рисунке.

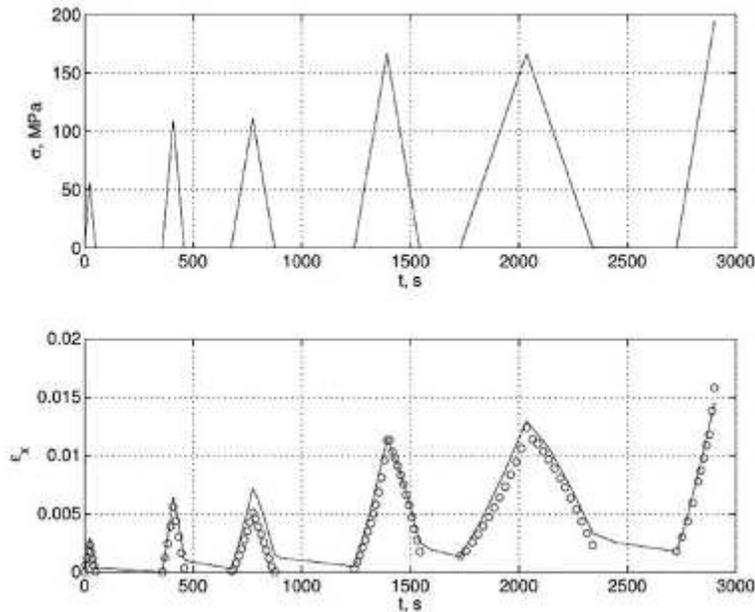


Рис. Расчетная и экспериментальная зависимость напряжений и деформаций образца от времени

Таким образом, выполнен анализ анизотропии механических свойств тканого углепластика с наномодифицированной высокотемпературной матрицей. Проведены испытания образцов с различными укладками. Определены упругие и прочностные характеристики материала в продольном и поперечном направлениях. Проведены испытания на ползучесть для выявления реологических эффектов. Получена модель наследственного типа, определены ее параметры. Показано удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными данными.

Литература

1. Kawai M., Masuko Y., Sagawa T. Off-axis tensile creep rupture of unidirectional CFRP laminates at elevated temperature // Composites: Part A.– 2006.– № 37.– P.257-269.
2. Работнов Ю.Н., Паперник А.Х., Степаньчев Е.И. Нелинейная ползучесть стеклопластика ТС8/3-250 // Механика полимеров.– 1971.– № 3.– С.391-397.
3. Тамуж В., Андерсонс Я, Анискевич К., Янсонс Ю., Корсгаард Д. Ползучесть и накопление повреждений в ортотропном композите при циклическом нагружении // Механика композитных материалов.– 1998.– Т.34, № 4.– С.447-460.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ МЕТОДАМИ 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ СДВИГЕ С УКЛАДКОЙ СЛОЕВ $\pm 45^\circ$

Попов А. Г., Матюшевский Н. В.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В авиационной и космической технике широкое применение находят высокомодульные (модуль упругости $E \geq 340$ ГПа) и высокопрочные (прочность $\sigma \geq 2,5$ ГПа) углепластики, существенная анизотропия которых вызывает дополнительные сложности в получении достоверных результатов испытаний по определению механических свойств, в частности, прочностных и упругих свойств при сдвиге. Наибольшие трудности при этом вызывают испытания образцов из высокомодульных углепластиков с укладкой слоев $\pm 45^\circ$, которые максимально сопротивляются действующим сдвиговым усилиям. Опыт проведения прочностных испытаний на сдвиг в плоскости листа показывает, что наиболее применимые в зарубежной и отечественной практике стандарты (ASTMD4255D4255M-15B «Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method», «ASTMD5379 D5379M-12 Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method», ГОСТ Р 50578-93 «Материалы композиционные полимерные. Метод испытания на сдвиг перекашиванием пластины» и другие) не обеспечивают равномерность распределения напряженно-деформированного состояния (НДС) в рабочей части образца. Вследствие этого результаты определения упругих и прочностных характеристик при сдвиге высоко-

модульных ПКМ со схемой укладки слоев $\pm 45^\circ$ не являются в достаточной степени достоверными.

В работе проведен расчетный и экспериментальный анализ НДС образцов по трехрельсовой схеме нагружения «Rail Shear» при испытании на сдвиг высокомодульного углепластика со схемой армирования $\pm 45^\circ$:

– ГОСТР 50578-93 «Материалы композиционные полимерные. Метод испытания на сдвиг перекашиванием пластины»»;

– D4255 D4255M-15B «Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method».

На основании расчетных и экспериментальных исследований и полученных диаграмм распределений напряжений определены рациональные геометрические параметры образцов. Получены зависимости распределения сдвиговых напряжений и деформации с учетом изменения длины и ширины рабочей зоны образца и наличием вырезов с различными радиусами.

В процессе нагружения образцов оптическим методом исследовалось НДС образцов с размерами, выполненными в соответствии с имеющимися стандартами, и образцы с измененными геометрическими размерами.

Анализ проведенных исследований и испытаний показал, что влияние концентраторов напряжений и распределение касательных напряжений зависит от формы и размера рабочей части образца. Полученные значения сдвиговых напряжений и деформаций методом конечных элементов (КЭ) и оптическим методом позволили определить оптимальный диапазон отношения длины рабочей части пластины к ее ширине и форму радиуса скругления выреза, при которых в рабочей зоне образца наблюдается равномерное распределение сдвиговых напряжений (рис. 1).

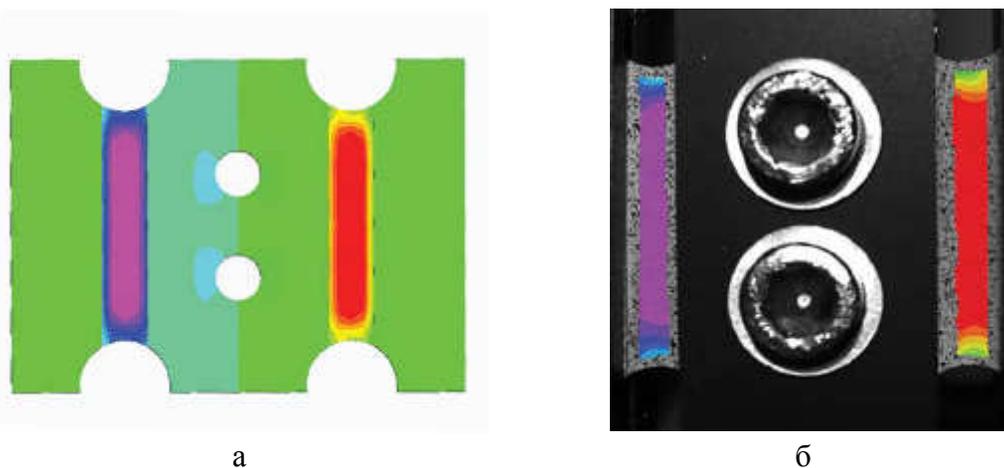


Рис. 1. Распределение сдвиговых деформаций τ_{xy} : а - методом КЭ в расчетном пакете MSC/Nastran; б - оптическим методом в программном комплексе VIC-3D

Для определения модуля упругости и предела прочности высокомодульных углепластиков со схемой армирования $\pm 45^\circ$ при сдвиге в плоскости листа предложен образец в форме прямоугольной пластины с защитными накладками. Рабочая часть

находится между симметрично расположенными на противоположных сторонах пластины вырезами U-образной формы, радиус R каждого выреза составляет 5–10 мм, при этом размеры рабочей зоны выбираются из соотношения:

$$l/b = 5 \dots 10,$$

где l – длина рабочей зоны;

b – ширина рабочей зоны;

а в центре образца, перпендикулярно линии приложения нагрузки, выполнены сквозные отверстия.

Предлагаемая геометрия образца позволяет достичь при испытаниях равномерного напряженно-деформированного состояния в его рабочей части, обеспечить максимальное снижение уровня концентраторов напряжений, что дает возможность повысить точность и достоверность определения прочностных характеристик современных высокомолекулярных углепластиков.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Скоморохов А. О.¹, Русаков Д. Ю.²

¹ ФГБОУ ВО «НИЯУ МИФИ», г. Обнинск, Россия;

² АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Одной из основных областей применения метода теплового контроля является авиакосмическая промышленность. Метод используется, например, для определения воды в обшивке космических челноков и в сотовых авиационных панелях, обнаружения расслоений и непроклеев.

Преимуществами теплового контроля являются его универсальность, наглядность результатов, высокая производительность и безопасность обслуживания инфракрасной аппаратуры.

Важнейшим параметром при активном тепловом контроле расслоений и непроклеев является температурный сигнал, то есть разница между температурами дефектной и бездефектной областей.

Существуют два основных подхода к обработке результатов теплового контроля. Первый предполагает преобразование всего массива термограмм и формирование искусственной фазограммы по результатам преобразования Фурье [1], второй - преобразование массива термограмм в трехмерное изображение с использованием времени нагревания в качестве третьего измерения [2].

Эксперимент проводился на установке, состоящей из тепловизора, инфракрасного нагревателя и генератора электрических импульсов. В ходе активного теплового контроля трехслойного образца из углепластика с полимерным сотовым наполнителем и с расслоением в виде клина на данной установке был получен массив термограмм. Разрешение термограмм 408x240. Количество термограмм в массиве - 122.

Пример термограмм в начале измерения и при нагреве дефекта приведен на рис. 1.

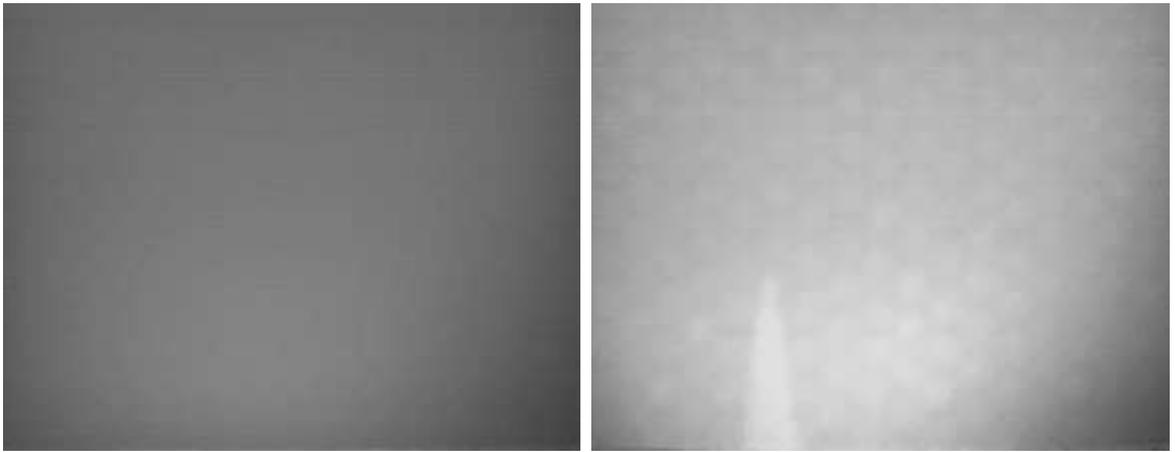


Рис. 1. Примеры термограмм

Разработанный метод предполагает преобразование тепловых изображений в числовые матрицы, элементами которых являются значения яркости каждого из пикселей изображения. На рис. 2 представлена зависимость яркости двух случайно выбранных пикселей от времени нагревания образца.

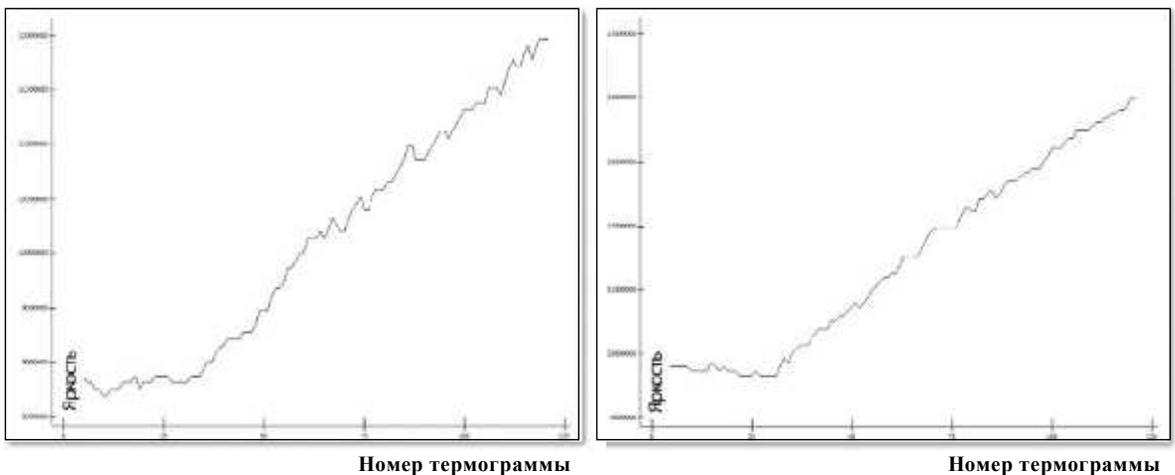


Рис. 2. Изменение яркости двух случайно выбранных пикселей в процессе нагрева

Наклон прямой после точки перегиба определяется скоростью нагрева соответствующего участка образца. Был применен робастный метод оценки наклона, основанный на вычислении медианы всевозможных частных углов наклона:

$$\frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}, \text{ где } i < j.$$

Такой подход избавляет от необходимости определять точку начала нагрева (точка перегиба на рис. 2).

Обработка данных проводилась в среде языка программирования Dyalog APL [3, 4], ориентированного на обработку массивов как целого. Полученная числовая матрица скоростей нагрева (углов наклона) может анализироваться традиционными методами, например, с применением кластерного анализа [5]. Особый интерес представляет визуализация этой матрицы с использованием различных фильтров (числа градаций по яркости). Примеры такой визуализации приведены на рис. 3.



Рис. 3. Визуализация скоростей нагрева при различных уровнях фильтра

Дефект и температурный сигнал сотового заполнителя видны более отчетливо, чем на любой из термограмм массива.

В результате проведенных исследований разработан новый подход к обработке результатов активного теплового контроля. Разработанный метод позволяет выделить наиболее информативную часть сигнала, достоверно определить область дефекта и имеет значительно меньшую трудоемкость, чем имеющиеся аналоги.

Литература

1. Фомицаева Ю. В., Нестерук А. Д. Реализация метода тепловых волн в тепловом контроле изделий из композитов. URL: <http://tndtsoft.ru/index.php/ru> (дата обращения: 04.07.2016).
2. Вавилов В.П. Динамическая тепловая томография // Заводская лаборатория материалов.– 2006.– № 3.– С.26-36.
3. Dyalog Language Reference Guide. URL: <http://www.dyalog.com/documentation> (дата обращения: 04.07.2016).
4. Bernard Legrand. Mastering Dyalog APL: A Complete Introduction to Dyalog APL. Dyalog Limited. First edition - 2009.
5. Yanchang Zhao, Yonghua Cen. Data Mining Applications with R. Elsevier Academic Pres.– 2014.– P.471.

ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ ЛЕНТЫ СЕРИИ АБРИС-А ДЛЯ ВАКУУМНОГО ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Артамонова Т. А., Шашунькина О. В., Савченкова Г. А.

ООО «Завод герметизирующих материалов» г. Дзержинск, Россия

ООО «Завод герметизирующих материалов» производит герметизирующие ленты (жгуты) серии Абрис-А ТУ 2513-002-43008408-98 для герметизации и крепления вакуумных мешков при проведении вакуумных процессов различного типа (вакуумная инфузия, печное и автоклавное формование полимерно-композиционных материалов). Герметизирующие ленты применяются при формовании деталей в авиакосмической промышленности, формовании стекол и изделий сложной конфигурации из стеклопластика в автомобильной промышленности, судостроении, строительстве.

Герметизирующие ленты серии Абрис-А изготавливаются из отечественного сырья. Герметизирующая лента применяется на металлической и композитной оснастке, совместима с различными типами вакуумной пленки. В процессе вакуумного формования ленты обеспечивают высокую прочность присоединения вакуумного мешка к поверхности матрицы, шлангам, штуцерам и герметичность технологических процессов при различных температурах и давлении. По окончании процесса формования герметизирующая лента хорошо удаляется с оснастки. Технические характеристики ленты представлены в таблице.

Таблица

Технические характеристики герметизирующей ленты Абрис-А

Показатели	Марка		
	Абрис-А ЛБпечн.	Абрис-А ЛБавт.	Абрис-А ЛБ ₉₀
Область применения	Термоформование деталей из ПКМ	Автоклавное формование деталей из ПКМ	Вакуумная инфузия и вакуумное формование
Цвет	Светло-серый	Черный, зеленый	Светло-серый
Прочность связи с металлом при отрыве, МПа, не менее	0,1	0,1	0,1
Максимальная температура применения, °С	+ 180	+ 180	+ 90
Типоразмеры ленты - ширина, мм - толщина, мм	15 3	10; 15 3	15 3
Транспортирование и хранение	Транспортируют любым видом транспорта в условиях, обеспечивающих защиту от воздействия атмосферных осадков, механических повреждений. Хранят в сухих складских помещениях при любой температуре воздуха. ГСХ - 12 месяцев		
Упаковка	Ящики из гофрированного картона.		

По требованию заказчика полимерная композиция может выпускаться в виде брикета – марка Абрис®-А-Б.

Герметизирующая лента серии Абрис-А серийно поставляется на авиа-промышленные предприятия.

Система качества, действующая на ООО «Завод герметизирующих материалов», сертифицирована на соответствие ГОСТ ISO 9001-2011.

Думанский А. М.^{1,2}, Портнова Я. М.², Русланцев А. Н.^{1,3}

¹ ФГБУН ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия;

² АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

³ ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», г. Москва, Россия

В работе [1] рассмотрены основные требования, предъявляемые к феноменологическим критериям разрушения анизотропных сред, сформулированных в тензорно полиномиальном виде. В отличие от критериев максимальных напряжений и деформаций критерии тензорно полиномиального вида не позволяют явным образом предсказывать тип разрушения материала [2]. Условием устойчивости разрушения материала, обладающего конечной прочностью, является эллипсоидальность формы поверхности разрушения, заключающаяся в положительной определенности матрицы квадратичной формы критерия.

Рассмотрим общий вид тензорно полиномиального критерия разрушения при плоском напряженном состоянии, в тензорно-полиномиальной форме:

$$f_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1, \quad (1)$$

где $i, j = 1, 2, 6$ - компоненты тензора напряжений, f_i, F_{ij} - параметры критерия, определяемые из эксперимента. Наличие линейной части в критерии (1) свидетельствует об анизотропии прочности при растяжении-сжатии, а квадратичная форма, определяемая матрицей F_{ij} , определяет тип поверхности и ее расположение в пространстве напряжений. Наибольшую неопределенность в определении параметров критерия разрушения вызывает параметр F_{12} , позволяющий учитывать взаимное влияние компонентов нормальных напряжений, который определяется из условия наилучшего соответствия расчетных и экспериментальных данных. Не беря в расчет влияние касательных напряжений, выполним анализ кривой статической прочности в соответствии с тензорно полиномиальной формой критерия разрушения. Условие положительности квадратичной формы, выражаемое формулой $F_{11}F_{22} - F_{12}^2 \geq 0$, свидетельствует об эллиптичности исследуемой кривой. Причем угол наклона осей эллипса к оси напряжений определяется с помощью следующего соотношения:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{2F_{12}}{F_{11} - F_{22}} \quad (2)$$

Если $F_{12} < 0$, ось эллипса поворачивается в положительном направлении. Поворот осей означает, что оси напряжений и главные оси эллипса не совпадают.

Рассмотрим схему определения кривой прочности слоя в плоскости напряжений

$O\sigma_1\sigma_2$, представляющую собой замкнутую линию. В общем случае уравнение кривой прочности в вышеприведенных критериях представляет собой сумму квадратичной и линейной форм от напряжений, которые в общем случае могут быть представлены в матричной форме:

$$\sigma^T F \sigma + f^T \sigma = 1, \quad (3)$$

где $F = (F_{ij})$ - матрица компонент квадратичной формы в соответствии с данными таблицы, $f = (f_1 \ f_2)^T$ - вектор линейной части критерия.

Матрица квадратичной и линейной форм для критерия Цая-Ву имеет следующий вид:

$$F = \begin{pmatrix} \frac{1}{X_t X_c} & -\frac{1}{2\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} \\ \text{sym} & \frac{1}{Y_t Y_c} \end{pmatrix} \quad f = \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \quad \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right)^T,$$

где X_t, X_c, Y_t, Y_c - значения предельных напряжений при растяжении и сжатии в направлениях x_1 и x_2 , соответственно.

Для критерия Цая-Хилла квадратичная форма имеет вид:

$$F = \begin{pmatrix} \frac{1}{X^2} & -\frac{1}{2X^2} \\ \text{sym} & \frac{1}{Y^2} \end{pmatrix}$$

где X, Y - значения предельных напряжений при растяжении в направлениях x_1 и x_2 , соответственно.

Преобразование координат вида $\sigma = R\sigma'$ приводит выражение (3) к следующему виду:

$$\sigma'^T R^T F R \sigma' + b^T R \sigma' = 1 \quad (4)$$

Ищем такую матрицу преобразования R , которая осуществляет поворот системы координат таким образом, что матрица квадратичной формы приобретает диагональную форму, а именно $\tilde{R}^T F \tilde{R} = D$. Подставляя полученное выражение в (4), получим

$$\sigma'^T \tilde{D} \sigma' + b^T \tilde{R} \sigma' = 1 \quad (5)$$

В силу симметричности матрицы собственные числа всегда действительны, а условие замкнутости кривой накладывает ограничение положительности формы, означающее еще и положительность этих значений, что означает эллиптичность кривой прочности. Отсутствие линейной части критерия означает равенство значений предельных напряжений при растяжении и сжатии, геометрически означающее, что центр эллипса лежит в начале координат и повернут на некоторый угол. Угол поворота осей определяется выражением (2).

Анизотропия прочности при сжатии и растяжении определяет изменение центра эллипса путем переноса координатных осей в соответствии со следующими преобразованиями:

$$\lambda_i x_i'^2 + \tilde{f}_i x_i' = 1, \quad (6)$$

где λ_i - собственные значения матрицы F , \tilde{f}_i - компоненты преобразованной линейной части $f\tilde{R}$.

После преобразования выражения (6) получим каноническое выражение эллипса

$$\frac{(x_1' - x'_{10})^2}{a_1^2} + \frac{(x_2' - x'_{20})^2}{a_2^2} = 1, \quad (7)$$

где центр эллипса $(x'_{10} \quad x'_{20}) = \left(-\frac{\tilde{f}_1}{2\lambda_1} \quad -\frac{\tilde{f}_2}{2\lambda_2} \right)$, $a_i = \sqrt{\frac{1 + \frac{\tilde{f}_1^2}{4\lambda_1} + \frac{\tilde{f}_2^2}{4\lambda_2}}{\lambda_i}}$ - длины полуосей эллипса.

Соответствующие вычисления были выполнены для образцов из тканого углепластика БМИ-3/3692, немодифицированного и наномодифицированного, и представлены на рис. 1.

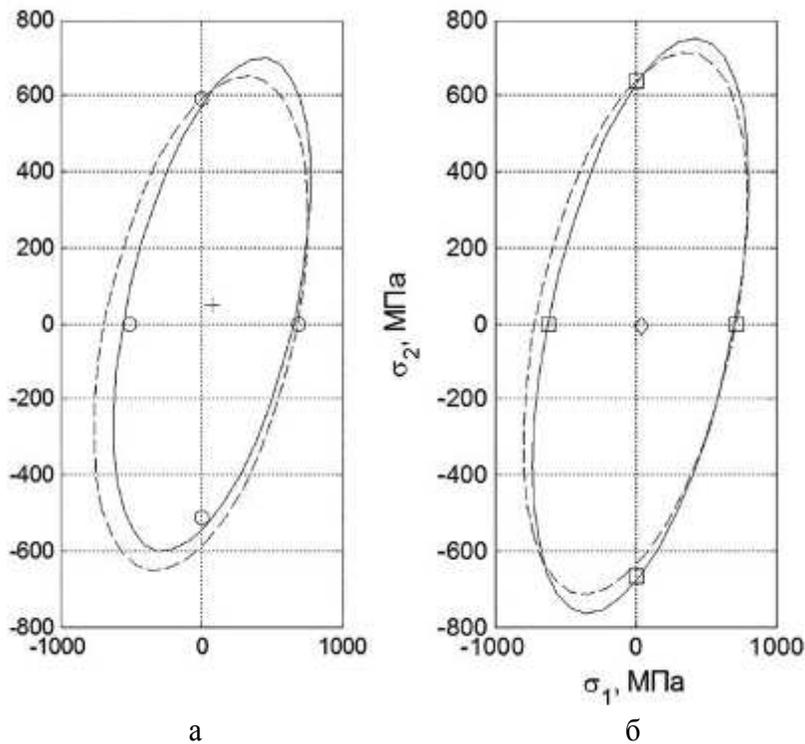


Рис. 1. Поверхности разрушения тканого углепластика БМИ-3/3692, немодифицированного (а) и наномодифицированного (б), рассчитанные по критериям Цая-Ву (сплошная линия) и Цая-Хилла (штриховая). Крестиком и ромбиком отмечены центры эллипсов по критерию Цая-Ву

Поскольку анизотропия статической прочности невелика, центры эллипсов по критерию Цая-Ву лежат близко к началу координат. Визуальный анализ поверхностей разрушения свидетельствует о том, что критерий Цая-Ву лучше описывает опытные данные, чем критерий Цая-Хилла. Незначительное различие в соответствии расчетных и экспериментальных результатов обусловлено небольшой анизотропией прочности при растяжении и сжатии.

Литература

1. Ву Э. Феноменологические критерии разрушения анизотропных сред // Механика композиционных материалов. Т. 2. Композиционные материалы. Пер. с англ.– М.: Мир, 1978.– С.401-491.
2. Camanho P.P. Failure criteria for fibre-reinforced polymer composites // DEMEGI. FEUP.– 2002.– 13 p.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ТЕПЛОВОЙ, ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КМ ДЛЯ РКТ

Вагин В. П., Дворецкий А. Э., Миронихин А. Н., Ташев В. П., Тащиллов С. В.
ОАО «Композит», г. Королев, Россия

Для исследования поведения композиционных материалов (КМ) в условиях интенсивного теплового нагружения в окислительных средах необходимо решение комплекса экспериментальных и расчетных задач. К ним относятся: исследование теплофизических и физико-механических свойств материала в условиях, близких к эксплуатационным, численное моделирование полей температур, напряжений и деформаций в материале, а также проведение стендовых или натурных испытаний материалов в элементах конструкций.

В ОАО «Композит» развиваются все перечисленные методы исследований КМ для РКТ и других высокотемпературных приложений. Методология моделирования одностороннего термоокислительного воздействия на материалы и элементы конструкций сводится в первую очередь к исследованию квазистационарными методами теплофизических и физико-механических свойств материалов при высоких температурах. Затем проведение численного моделирования заданных (прогнозируемых) условий нагружения тепловым, механическим или высокоэнтальпийным воздействиям, а также экспериментальное моделирование поведения КМ при таком воздействии как упрощенного расчетного случая, реализуемого в условиях, моделирующих заданные воздействия. И в завершение создание модели функционирования материала в условиях эксплуатации материала в конструкции и проведения верификационных стендовых и натурных экспериментов.

Для оценки тепловой и окислительной стойкости перспективных КМ для РКТ использовались установки для определения физико-механических и теплофизических свойств материалов, моделирование заданных уровней воздействий с использованием механического нагружения в условиях одностороннего нагрева образцов исследуемых КМ, а также проведение испытаний на стойкость к высокоэнтальпийному окислительному потоку с использованием плазматрона УПИМ-200 (200 кВт). Отработаны методические особенности таких

испытаний, получены результаты по оценке термоокислительной стойкости перспективных материалов на основе УУКМ и УККМ различного типа, а также получены характеристики поведения конструкционных ТЗМ в условиях одностороннего программируемого нагрева.

В процессе исследований были обнаружены эффекты упрочнения УККМ после длительного нагрева при высокой температуре, эффекты, блокирующие окисление УУКМ при воздействии высокотемпературного воздушного потока с энтальпией до 8 МДж/кг, а также разработаны методы испытаний для решения перечисленных задач на комплексе высокотемпературных установок.

ПРИМЕНЕНИЕ В МАТЕРИАЛАХ ТИПА «АРГОЛОН» ПРОШИВНЫХ ТКАНО-ВЫКЛАДОЧНЫХ КАРКАСОВ ИЗ ВОЛОКОН НА ОСНОВЕ ГИДРАТЦЕЛЛЮЛОЗЫ И МАТРИЦЫ НА ОСНОВЕ КАМЕННОУГОЛЬНОГО ПЕКА

Ляхин А. В., Магнитский И. В., Тащилев С. В., Чернокожев И. И.

ОАО «Композит», г. Королев, Россия

На сегодняшний день углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) находят все большее применение в качестве конструкционных и теплозащитных материалов в таких областях техники, как ракетно-космическая, авиационная, транспортное машиностроение, термическое оборудование. Следующим этапом развития УУКМ, в значительной мере расширяющим область их использования, является их применение в качестве преформ для получения углерод-керамических композиционных материалов (УККМ), которые, в свою очередь, имеют повышенные характеристики окислительной и теплоэрозионной стойкости, обеспечиваемые керамической матрицей.

Одним из направлений в технологии УУКМ и УККМ является получение конструкций в виде плит и обечаек. Характерной особенностью КМ, применяемых в данных конструкциях, является, как правило, более сильное армирование в плоскости. При этом армирование в направлении, перпендикулярном поверхности, обеспечивается в меньшей степени или вообще отсутствует. Мировые тенденции в области получения таких материалов характеризуются широким применением в качестве армирующего наполнителя углеродного волокна на основе полиакрилонитрила (ПАН). Кроме этого, в последнее время всё большее распространение получают автоматизированные методы плетения, прошивки, а также многомерного, в частности, трёхмерного ткачества для изготовления армирующих каркасов по форме, близких к конечному изделию. Тем не менее, в аспекте многообразия областей применения УУКМ и определяемых ими требований к характеристикам материала использование автоматизированных способов получения волокнистых преформ может быть достаточно ограничено. Кроме того, использование ПАН-волокна не всегда позволяет добиться наилучших показателей характеристик материала.

Наиболее перспективным способом формирования матрицы УУКМ с точки зрения обеспечения требуемых характеристик УУКМ является метод жидкофазной пропитки с использованием в качестве связующего пека каменноугольной смолы. Так,

согласно данному способу путём варьирования количества циклов пропитки и термообработки, а также параметров термообработки может быть обеспечен широкий диапазон теплофизических, физико-механических, физико-химических и других характеристик материала в зависимости от области его применения. Однако к недостаткам метода можно отнести трудность сочетания, с одной стороны, предельных значений плотности, высокой теплоэрозионной стойкости материала и, с другой стороны, его низкой теплопроводности, что является важным для ряда применений УУКМ.

В ОАО «Композит» для изготовления деталей сложной формы, в том числе и крупногабаритных, обладающих характеристиками высокой термopрочности, низкой теплопроводности, высокой теплоэрозионной стойкости разработан ряд технологических процессов, позволяющих преодолеть указанные противоречия.

Так, несмотря на то, что применение углеродных волокон на основе гидратцеллюлозы взамен волокон на основе ПАН, как правило, приводит к снижению прочности и предельно достигаемой плотности материала, тем не менее, обеспечивает снижение жесткости материала, причем гораздо более существенное, чем снижение его прочности. Это в целом обеспечивает более высокую предельную деформацию материала на фоне достаточной прочности, возможность избежать высоких механических напряжений в материале, а также высокую несущую способность и термостойкость (термопрочность) конструкций. Кроме этого, высокая степень деформации материала может быть обеспечена за счет применения наполнителя с существенным искривлением нити в направлении армирования, что может быть обеспечено за счет применения ряда серийно выпускаемых тканых наполнителей.

К этому следует добавить, что, с одной стороны, получение пористых УУКМ-заготовок на основе ПАН-углеродных волокон позволяет достигать высоких прочностных свойств УККМ, в частности C-SiC. С другой стороны, это влечет за собой высокие значения жесткости материала, что может, в свою очередь, служить причиной низкой термopрочности материала. Кроме этого, установленные для УККМ C-SiC на основе ПАН-углеродного волокна низкие значения ТКЛР материала могут служить причиной снижения окислительной стойкости материала вследствие разрушения керамической составляющей УККМ. Растрескивание и разрушение керамической матрицы, а также наружного керамического слоя, в частности SiC, может быть вызвано несоответствием ТКЛР углеродной и керамической составляющих УККМ, а также таковых величин для основы и покрытия. В данном аспекте в случае применения для изготовления УУКМ-заготовки для УККМ C-SiC волокон на основе гидратцеллюлозы удаётся достигнуть значений ТКЛР основы, близких к ТКЛР карбида кремния. Это в значительной мере позволяет снизить интенсивность растрескивания покрытия и избежать его отслоения.

Поскольку существующие автоматизированные методы изготовления волокнистых преформ, которые на сегодняшний день также активно развиваются в ОАО «Композит», удовлетворяют не всем существующим на сегодняшний день требованиям к их форме и структуре армирования, одним из способов решения этой проблемы является применение прошивных тканно-выкладочных каркасов. Несмотря на отсутствие иногда возможности механизации процессов изготовления волокнистых преформ для ряда заготовок согласно данному методу, основанному на выкладке слоев ткани с последую-

щей их прошивкой, существует возможность получения преформ практически любой формы и сложности, а также реализации необходимых схем армирования.

Применение неграфитированного кокса в качестве матрицы УУКМ для изготовления узлов и деталей, на которые нет сильного эрозионного и окислительного воздействия, т.е. которые в большей степени используются в качестве теплоизоляции, позволяет реализовать низкую теплопроводность материала. Кроме этого, применение в таких узлах структур с сильно искривленными волокнами в направлении действия нагрузок наряду с неграфитированным коксом пека позволяет достичь высоких показателей предельной деформации и низкой жесткости материала, что обуславливает высокую термopрочность материала, стойкость к термическим напряжениям и деформациям.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ПЕКА, ПРИМЕНЯЕМОГО ПРИ ПОЛУЧЕНИИ УУКМ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО АРМИРОВАННОГО КАРКАСА ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ СТЕРЖНЕЙ И ОБЪЕМНО-ИЗОТРОПНОЙ УГЛЕРОДНОЙ МАТРИЦЫ, НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УУКМ

Симачко А. И.¹, Лахин А. В.¹, Кокин П. А.¹, Скудин В. В.²

¹ ОАО «Композит», г. Королев, Россия;

² ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д. И. Менделеева», г. Москва, Россия

Технологический процесс изготовления высококачественных углерод-углеродных композиционных материалов, обладающих высокими физико-механическими и теплоэрозионными свойствами, включающий в себя процесс жидкофазной пропитки как один из этапов насыщения углеродной армирующей преформы углеродной (коксовой) матрицей, является крайне трудо- и наукоемкой процедурой. Одним из наиболее существенных факторов при изготовлении УУКМ с использованием жидкофазного метода является тип каменноугольного пека – связующего, применяемого при пропитке заготовок.

Так, использование нетехнологичного связующего, изготавливаемого по типовым технологиям ректификации каменноугольной смолы – продукта процесса коксования углей, в которых целевыми являются низкокипящие компоненты, а высококипящий остаток – пек является побочным, приводит к необходимости проведения большого количества процессов цикла жидкофазная пропитка-термическая обработка для достижения требуемой плотности УУКМ. Это существенно увеличивает сроки изготовления материала, а также снижает экономическую эффективность производства.

Цель данной работы заключается в исследовании перспективных видов каменноугольных пеков, а также в установлении взаимосвязей между свойствами пеков и свойствами УУКМ.

На сегодняшний день существуют технологии переработки каменноугольной смолы, в которых пек является основным продуктом с определенными свойствами. Исходя из этого, предполагается, что использование в качестве связующего специального каменноугольного пека, полученного по технологии ректификации каменноугольной смолы определенного состава, в которой он является целевым, а не вторичным продуктом, обладающего требуемым групповым составом, низким содержанием влаги, и, как следствие, необходимой адгезией к углеродному наполнителю и хорошими пропиточными свойствами, позво-

лит интенсифицировать скорость прироста плотности материала в процессе проведения цикла жидкофазная пропитка-термическая обработка, а также повысить его физико-механические характеристики.

Исследование перспективных видов каменноугольных пеков и физико-механических свойств УУКМ проводилось на экспериментальных образцах углерод-углеродного композиционного материала, представляющих собой композиции из углепластиковых стержней, образующих схему армирования 1D, и углеродной матрицы на основе различных типов каменноугольного связующего. Для сравнения результатов выбран экспериментальный образец УУКМ на основе типового среднетемпературного пека марки «Б» ГОСТ 10200 производства ОАО «Губахинский Кокс».

В результате исследования было установлено, что коксы, полученные термообработкой специальных пеков при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 60\text{ МПа}$, имеют повышенную механическую прочность при сжатии по сравнению с коксом, полученным из типового пека. Прирост прочности достигает 50 %, что, по-видимому, положительно скажется на прочности УУКМ на основе специальных пеков.

В ходе анализа значений пористости и истинной плотности коксов на основе специальных и типового пеков отмечен схожий характер перехода закрытой пористости в открытую, а также аналогичное изменение истинной плотности коксов специального среднетемпературного пека и типового среднетемпературного пека марки «Б», при сравнительно одинаковых значениях выхода кокса (8 и 80 %, соответственно) из этих пеков при $T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P = 60\text{ МПа}$. Однако использование специального среднетемпературного пека в роли связующего привело к значительному повышению скорости прироста (до 30 %) кажущейся плотности УУКМ в ходе проведения циклов жидкофазная пропитка-термическая обработка на начальных этапах насыщения материала матрицей, что, предположительно, обусловливается существенным влиянием химического состава определенных фракций специального среднетемпературного пека на кинетику процессов сорбции, спекания и коксообразования в системе углеродный наполнитель – пек.

Исходя из полученных данных, дальнейшее развитие работы видится в детальном исследовании химического состава используемых пеков, а также в изучении физико-механических свойств УУКМ на их основе с целью установления взаимосвязей между исследуемыми свойствами компонентов рассматриваемой системы и механизмов основных процессов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРФОРАЦИОННЫХ ОТВЕРСТИЙ В ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЯХ ПАНЕЛЕЙ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ

Половый А. О., Шелковой А. Н.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Типовая панель звукопоглощающей конструкции (ЗПК) современного авиационного двигателя представляет собой многослойную конструкцию, в обшивках которой выполнено большое количество перфорационных отверстий, обеспечивающих снижение уровня шума работающего двигателя. При этом одна обшивка панели может содержать десятки тысяч отверстий.

Одним из наиболее распространенных способов выполнения перфорационных отверстий является сверление на станке с ЧПУ. В этом случае для подготовки управляющей программы необходима электронная модель (ЭМ) изделия, содержащая оси отверстий, определяющие координаты начала отверстия и направление движения инструмента.

В ряде случаев разработчик ЭМ изделия не создает непосредственно оси перфорационных отверстий, а определяет параметры перфорации через задание диаметра отверстий, продольного и поперечного шага их расположения, а также контура, в пределах которого необходимо выполнить перфорацию. В этом случае изготовителю необходимо самостоятельно дорабатывать ЭМ в части моделирования осей перфорационных отверстий.

В зависимости от особенностей конструкции и технологии изготовления панелей ЗПК перфорационные отверстия могут выполняться как на заранее отформованных заготовках обшивок, так и на собранных панелях.

Как правило, панели ЗПК имеют сложную криволинейную поверхность вращения. Если поверхность разворачивается, то перфорация может быть выполнена на плоских заготовках обшивок. В этом случае ЭМ для перфорации представляет собой плоскую развертку заготовки обшивки с массивом точек, определяющих координаты перфорационных отверстий. Сверление выполняется по нормали к поверхности заготовки.

Указанную ЭМ целесообразно создавать с использованием систем двумерного проектирования, например, AutoCAD, для которых создание большого массива точек на плоскости не требует значительных ресурсов вычислительной техники (рис. 1).

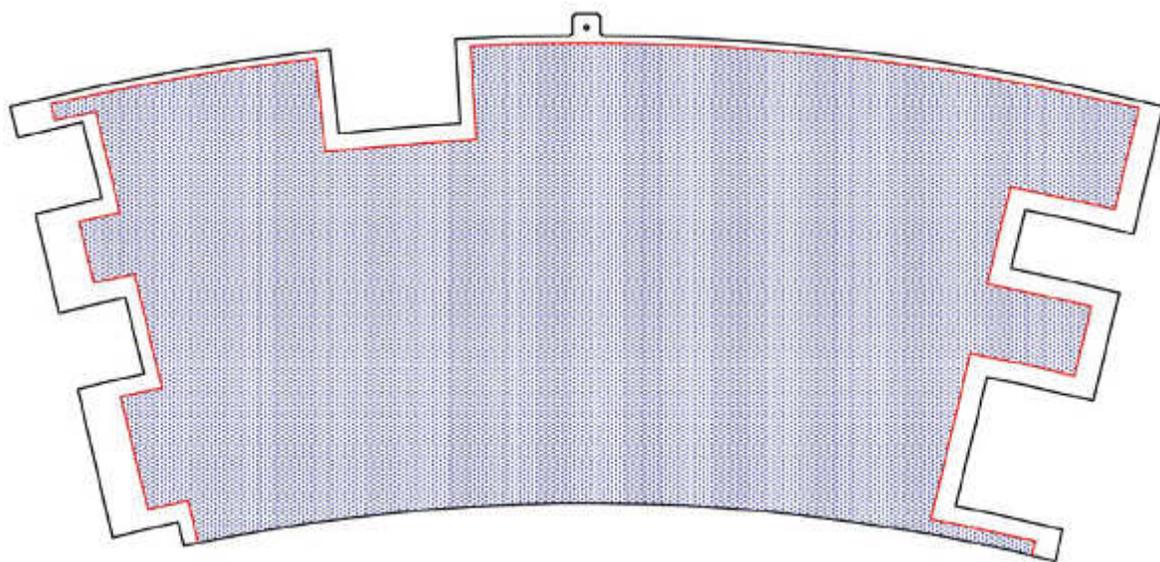


Рис. 1. ЭМ для перфорации плоской заготовки обшивки ЗПК (свыше 19,6 тыс. отв.; система AutoCAD)

Если поверхность изделия не разворачивается, либо согласно выбранной технологии перфорацию необходимо выполнить на отформованной криволинейной детали, то ЭМ для перфорации должна иметь трехмерное представление в виде массива осей отверстий, проходящих через поверхность детали. Конкретное исполнение ЭМ для перфорации криволинейной детали из ПКМ зависит от количества независимых степеней свободы режущего инструмента станка (трех-, четырех- или пятикоординатный), на котором будет выполняться сверление отверстий. Следует отметить, что в случае использования трех- или четырехкоординатных станков для перфорации деталей двойной кривизны не все оси отверстий будут направлены по нормали к поверхности, что приведет к искажению круглой формы данных отверстий (образуется эллипс).

Для эффективного использования вычислительных ресурсов при создании больших трехмерных массивов осей перфорационных отверстий следует применять специальные возможности систем трехмерного проектирования. Так, например, в системе NX использование функции User Define Feature (UDF) позволяет за счет автоматизации многократно повторяющихся операций существенно снизить трудоемкость и время моделирования перфорационных отверстий (рис. 2).

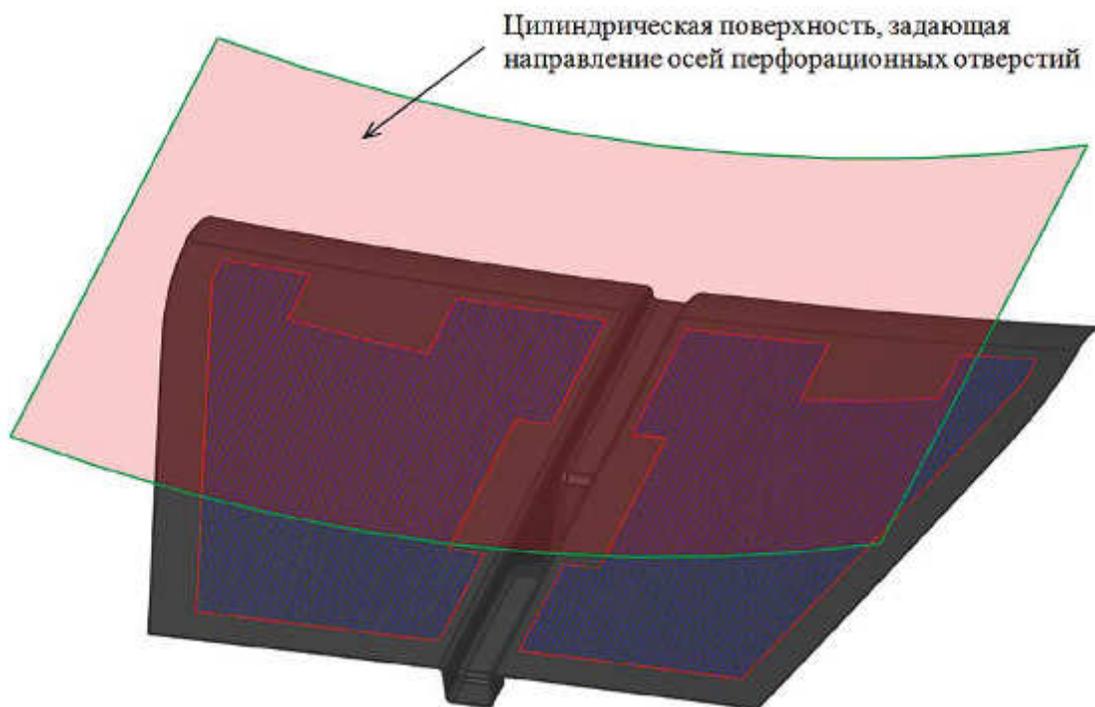


Рис. 2. ЭМ для перфорации конической обшивки ЗПК на четырехкоординатном станке с ЧПУ (свыше 6,4 тыс. отв.; система NX)

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ПРЕФОРМ ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Халиулин В. И., Батраков В. В., Константинов Д. Ю., Шабалов А. В.
ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» г. Казань, Россия

В настоящее время объем деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов неуклонно возрастает. Область применения композитов становится более ответственной, а сами детали — более нагруженными. К таким деталям можно отнести элементы крыльев и фюзеляжа самолетов, элементы системы несущего и рулевого винта вертолета, детали шасси и другие. Однако известные недостатки композиционных материалов с традиционной схемой армирования, такие как низкая ударостойкость и прочность в трансверсальном направлении даже при очень высоких характеристиках армирующих волокон сдерживают процесс дальнейшего вытеснения металлических деталей. В связи с этим разработка и исследование новых типов армирования является одним из наиболее перспективных путей совершенствования технологии изготовления деталей из композиционных материалов.

При изготовлении деталей интегрального типа трансферными методами формования наиболее сложной и ответственной операцией является процесс создания сухой комплексной преформы, ее тип, качество, направление и расположение армирующих волокон будут определять прочность и весовую эффективность будущей конструкции.

В настоящей работе продемонстрировано направление технологических исследований Центра композитных технологий КНИТУ-КАИ (г. Казань), связанное с исследованием применения новых схем армирования для изготовления высоконагруженных конструкций из композиционных материалов, таких как корпус втулки рулевого винта вертолета «Ансат», образцов стрингерных панелей самолета, конструкций с 3D - армированной структурой.

Обобщая опыт работ можно сказать, что применение направленной укладки волокна (Tailored Fiber Placement, TFP) позволило добиться максимальной весовой эффективности при проектировании и изготовлении корпуса втулки рулевого винта вертолета «Ансат». Достигнуто снижение веса на 40 % относительно ее металлического аналога.

Применение роботизированной поперечной прошивки для усиления соединения преформ обшивки и стрингера должно повысить живучесть конструкции крыльевой панели и увеличить ее постударные характеристики.

Использование 3D - ткачества для изготовления преформ высоконагруженных деталей, подверженных ударным воздействиям, позволят изготавливать на их основе лопасти вентилятора авиационных двигателей. В настоящее время совместно с ООО «Текстор» (г. Казань) ведутся исследования технологии создания 3D-тканых композитов с различными типами переплетения и формой, изучаются их механические свойства.

Применение новых типов армирования, таких как направленная укладка волокна (TFP), поперечная роботизированная прошивка (Tufting), трехмерное ткаче-

ство при изготовлении высоконагруженных композитных конструкций, позволяет:

- повысить прочность деталей, которые имеют места приложения сосредоточенных нагрузок, отверстия, фланцы и т. п.;
- повысить живучесть соединений элементов интегральных конструкций;
- увеличить межслойные сдвиговые характеристики;
- создавать конструкции, стойкие к ударным нагрузкам.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОЙ УКЛАДКИ ВОЛОКНА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ И СЕТЧАТЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Халиулин В. И., Двоеглазов И. В., Беззаметнова Д. М.

ФГБОУ ВО «КНИТУ им. А. Н. Туполева - КАИ» г. Казань, Россия

В данной работе исследуется возможность применения метода направленной укладки волокна – Tailored Fiber Placement (TFP) для создания элементов конструкций многослойных панелей со стержневой и сетчатой структурой.

Многослойные панели с сотовыми наполнителями широко применяются в конструкциях летательных аппаратов. В то же время можно отметить, что повышение сдвиговой прочности многослойных панелей позволило бы многократно увеличить весовую эффективность данных конструкций.

Одним из альтернативных типов легких наполнителей для многослойных панелей могут служить стержневые структуры, представляющие собой систему прямолинейных стержней, расположенных под заданным углом к несущим обшивкам [1]. Данные элементы воспринимают в основном растягивающие и сжимающие усилия вдоль оси стержня и по схеме работы напоминают ферменные конструкции.

Сдерживающим фактором для внедрения таких конструкций долгое время являлись ограниченные возможности технологии их изготовления. Такие конструкции изготавливались, как правило, из твердолистовых материалов методом вырезки или просечки зигзагообразных лент с последующей их сборкой или гибкой, соответственно, в объемную структуру [2, 3]. Другим вариантом изготовления стержневых наполнителей являлась прошивка вспененного материала жгутами сухого или пропитанного угле- или стекловолокна с последующей склейкой с несущими слоями [4]. Недостатком данных способов является высокая трудоемкость изготовления панелей и увеличение массы панели за счет применения вспененного материала в среднем слое.

Использование предложенного метода направленной укладки волокна (TFP) позволяет получать сетчатую преформу из высокопрочных или высокомодульных углеродных волокон в соответствии с заданной разметкой структуры (рис. 1), которая впоследствии складывается в объемную конструкцию. Вариации исполнения разметки структуры, толщины жгута и схемы складывания позволяют получать большое разнообразие стержневых структур с базовой поверхностью в виде линейного или зигзагообразного гофра, в которых стержневые элементы будут образовывать пирамидальные, тетраэдральные, х-образные структуры или сетчатые поверхности.

Процесс складывания и формования стержневого заполнителя может быть осуществлен в двух вариантах.

Первый вариант заключается в использовании трансформируемой оправки для складывания и формования стержневого заполнителя. При этом в элементах оправки имеются пазы, совпадающие с разметкой преформы, в которые она и укладывается. Сечения паза соответствует по форме и площади сечению жгута из углеродных волокон. Пропитка данной конструкции осуществляется методом инфузии непосредственно в трансформируемой оправке в рельефном состоянии. После формования деталь извлекается из трансформируемой оправки и склеивается с несущими слоями.

Второй вариант заключается в последовательном складывании преформы в рельефное состояние известными способами и ее формование на упруго-эластичных элементах. В данном случае возможно в процессе одного формования объединить пропитку заполнителя с несущими слоями панели, которые могут быть изготовлены как из тканых материалов, так и в виде сетчатой обшивки, соединенной с заполнителем по вершинам стержней (рис. 2).

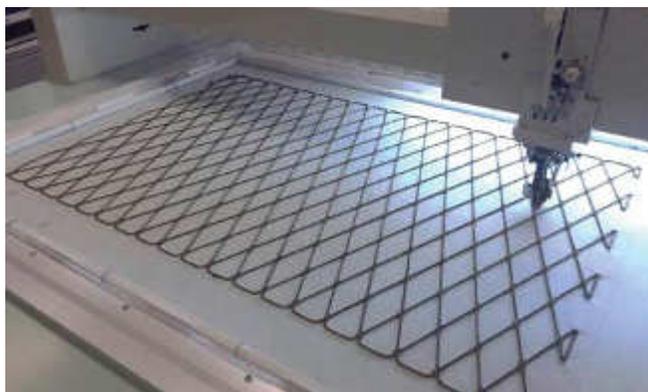


Рис. 1. Изготовление преформы стержневого заполнителя в виде сетки методом TFP

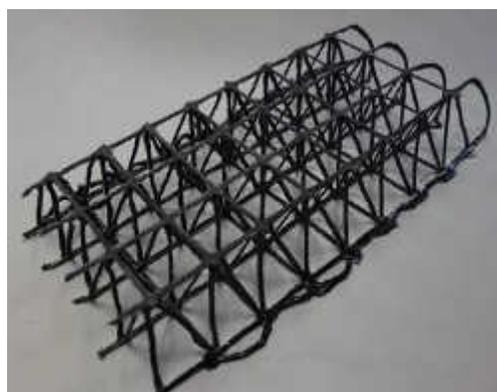


Рис. 2. Стержневая структура с сетчатой обшивкой

Данным способом были изготовлены образцы стержневых заполнителей с объемной плотностью от 22 до 48 кг/куб.м с высотой от 28 до 50 мм. Для изготовления заполнителей использовались волокна НТА 45 или Тогуса Т700 с суммарной толщиной жгута от 24 до 72 тысяч филаментов (К). Пропитка структур осуществлялась методом инфузии с использованием связующих ТО-29 (ИНУМИТ) и RTM 6 (Hexcel).

Применение стержневых заполнителей в качестве заполнителя многослойных панелей позволяет:

- эффективно использовать прочностные и жесткостные характеристики армирующих волокон за счет расположения их по линиям действия растягивающих или сжимающих усилий;
- повысить термостабильность панелей за счет применения материалов с одинаковым коэффициентом температурного расширения для изготовления заполнителя и несущих слоев;

- создавать локальные зоны упрочнения за счет изменения конфигурации заполнителя и его разметки, а также соединения элементов заполнителя в преформе с элементами силового набора панели;
- получать заполнители с криволинейной огибающей за счет изменения схемы разметки структуры.

Данная работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения проекта с уникальным идентификатором RFMEFI57414X0078.

Литература

1. Ендогур А. И. Конструкция самолетов. Конструирование агрегатов планера: учебник. – М.: МАИ-ПРИНТ, 2012.– 496 с.
2. Гайнутдинов В. Г. Прочностной анализ конструкций со стержневым заполнителем Известия высших учебных заведений // Авиационная техника.– 2015.– № 2. – ISSN 0579-2975.
3. T. George a, V. S. Deshpande, H.N.G. Wadley. Contents lists available at Science Direct Composites: Part A, journal homepage: www.elsevier.com/locate/compositesa. Hybrid carbon fiber composite lattice truss structures; June 2014. (03.08.2015).
4. Gregor Christian Enders. Beitrag zur Gestaltung, Auslegung und Optimierung von Kernverbunden für die Luftfahrtanwendung, 1. Auflage 2009.– ISBN 13: 978-3-86844-202-1.

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВЫСОКОЙ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬЮ МЕТОДОМ РАДИАЛЬНОГО ПЛЕТЕНИЯ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Батраков В. В., Данилов Я. С., Шабалов А. В.

ФГБОУ ВО «КНИТУ им. А. Н. Туполева - КАИ» г. Казань, Россия

Повышение требований к опорным конструкциям космических аппаратов требует от разработчиков новых подходов к их проектированию и изготовлению. Традиционные способы изготовления элементов опорных конструкций методами намотки и выкладки препрегом достаточно хорошо изучены, известны их основные достоинства и недостатки. Однако информация об использовании высокоэффективного способа создания трубчатых элементов методом радиального плетения для изготовления размеростабильных конструкций КА в известной литературе встречается крайне редко. Также отсутствуют сведения о возможности изготовления трубчатых элементов методами радиального плетения и трансферного формования с использованием высокомодульных углеродных волокон.

Целью настоящей работы являлось создание методики проектирования и технологии изготовления размеростабильных элементов опорных конструкций КА с использованием методов радиального плетения и трансферного формования.

При проектировании и изготовлении были выявлены и решены следующие основные проблемы, к которым можно отнести:

- определение оптимального угла армирования и типа плетения, а также соотношения продольных и плетельных волокон;
- «травмируемость» высокомодульных углеродных волокон при использовании стандартного оснащения технологического оборудования;
- обеспечение высокой точности угла армирования при плетении;
- достижение высокой плотности преформы;
- влияние формообразующей оснастки на точность воспроизведения размеров.

Для практической апробации разработанной технологии и верификации расчетной методики был изготовлен комплект штанг опорной конструкции контррефлектора КА, к которым предъявлялись высокие требования по жесткости и размеростабильности в осевом направлении. Изготовление штанг осуществлялось с использованием плетельного комплекса HERZOG RF1/144 100 и промышленного робота KUKA GWA 180-270. Основным армирующим материалом штанги было выбрано высокомодульное углеродное волокно M46J (Toray), пропитка осуществлялась связующим Т-26 (ИНУМИТ). Были рассчитаны и воспроизведены два типа армирующей структуры с параметрами 72x12К M46J 0° (96,3 %) / 16x1К Т300 ±60° (3,7 %) и 72x6К M46J 0° / 72x6К ±14° M46J, которые обеспечивали штангам требуемые физико-механические параметры.

В результате испытаний штанг со вторым типом укладки были установлены следующие характеристики – осевой модуль упругости материала штанги $E = 204,09$ ГПа, осевой ТКЛР $\alpha = -0,82 \cdot 10^{-6}$ 1/С°.

Проведенные исследования показали, что использование для изготовления опорных конструкций КА методов радиального плетения и трансферного формования в закрытой формообразующей оснастке (RTM) позволяет изготавливать трубчатые элементы с высокими показателями жесткости и размеростабильности.

Данная работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения проекта с уникальным идентификатором RFEF57714X0131.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОСТОЙКОГО ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА ВЭК-7

Кордо А. А., Бойко Л. И., Иваницкий А. С.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Для создания более совершенных электрических двигателей и аппаратов с высоким КПД, длительным ресурсом работы и минимальными размерами необходимо применять в их системах изоляции высоконагревостойкие полимерные материалы с оптимальными электрическими характеристиками и термической стабильностью.

Среди применяемых в электротехнике материалов значительную долю составляют электроизоляционные заливочные полимерные компаунды, которые служат для

заполнения относительно больших полостей, промежутков между деталями в электрических машинах и аппаратах и получения сравнительно толстых покрытий электро- и радиотехнических деталей, узлов, блоков. Они должны обеспечивать надежную электрическую изоляцию в процессе длительной работы в различных эксплуатационных условиях.

Компаунды на основе эпоксидных смол, имеют рабочую температуру до 150 °С. Поэтому была поставлена задача разработать технологичный эпоксидный компаунд с использованием общедоступного сырья с рабочей температурой до 200 °С.

По результатам экспериментальных исследований была разработана эпоксидная композиция ВЭК-7, которая наиболее удовлетворяет требованиям, предъявляемым к эксплуатационным и технологическим характеристикам компаунда.

Показано, что:

- компаунд выдерживает воздействие высоких температур с сохранением удовлетворительных электроизоляционных свойств вплоть до 200 °С как при кратковременном нагреве, так и в течение длительного времени - 500 часов (рис. 1);
- электрическая прочность компаунда более 30 кВ/мм;
- у компаунда низкое влагопоглощение (рис. 2) и хорошая влагостойкость как по диэлектрическим свойствам, так и по удельному объемному электрическому сопротивлению.

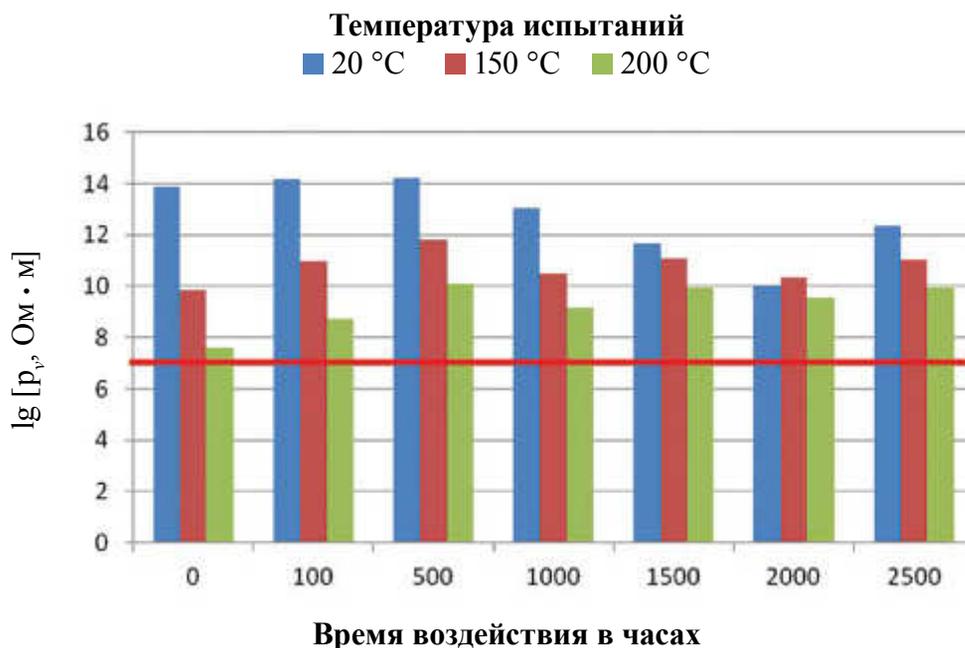


Рис. 1. Температурные зависимости удельного объемного сопротивления от времени выдержки при 200 °С

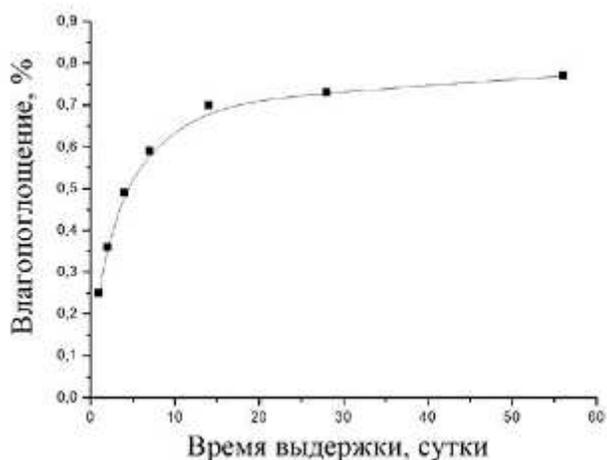


Рис.2. Зависимость влагопоглощения от времени выдержки в среде воздуха с относительной влажностью $(95\pm 2)\%$ и температурой $(23\pm 2)\text{ }^\circ\text{C}$

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ УГЛЕСТЕКЛОПЛАСТИКОВ НА ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА

Шкиркова Л. М., Ирошников А. И., Обухова Н. С., Захаров Е. В., Ширко А. А.
 АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет создать оснастку с заданными термодформационными характеристиками, максимально приближенными к аналогичным свойствам формуемого материала, что обеспечивает требуемые размеры, а также минимизирует остаточные напряжения и коробление изделий.

Кроме того, заданный ресурс эксплуатации оснастки должен гарантировать минимальные изменения теплофизических и физико-механических свойств материала оснастки при воздействии повышенной температуры и давления.

В данной работе исследовано влияние совмещения различных по природе армирующих наполнителей: углеродной ткани и стеклоткани на термодформационные свойства гибридов, полученных методом вакуумной инфузии связующего Araldite в стеклоугленаполнитель с различными схемами армирования, обозначенными далее – Г1, Г2, Г3, Г4. Указанные схемы отличаются количеством и последовательностью укладки слоев углеродного наполнителя в гибридном композите.

Определены термодформационные свойства образцов исходных гибридов и прошедших 50 циклов автоклавного формования.

Для определения термодформационных характеристик: термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и относительной термической деформации указанных материалов, использовался дилатометр типа DIL 801 фирмы ВАНR Thermoanalyse.

Можно отметить, что исследуемые образцы гибридных композитов имеют достаточно низкие значения ТКЛР и относительной термической деформации, что определяется аналогичными свойствами применяемых связующего и наполнителей. При этом различия в структуре, а именно в последовательности укладки углеродного наполнителя в гибриде, приводят к отличиям в значениях ТКЛР на 15-20 % у образцов со схемами Г1 и Г2, а при повышении его содержания в два раза (Г3 и Г4) значения ТКЛР гибридного композита снижаются более чем на 30 % (рис.1). Представленные результаты испытаний показывают, что такие отличия сохраняются и после 50 циклов автоклавного формования.

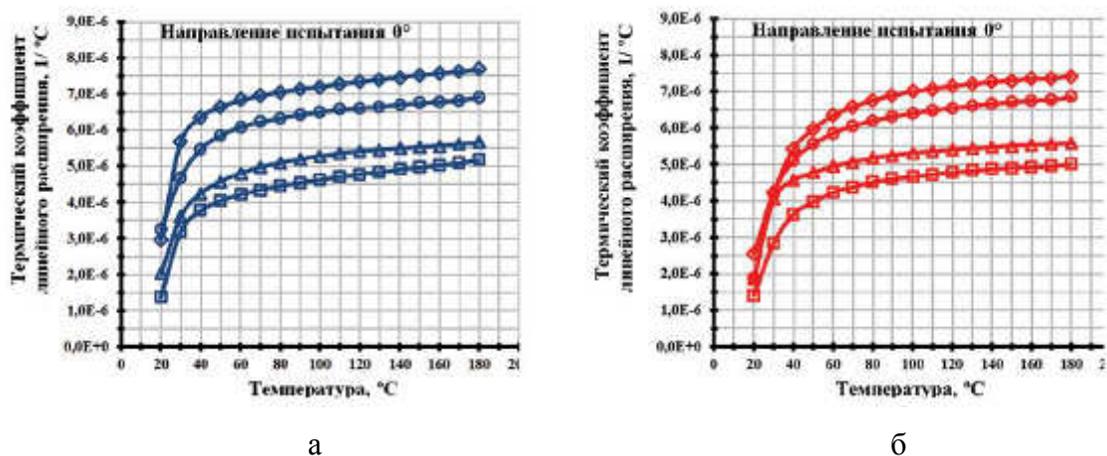


Рис. 1. Температурная зависимость термического коэффициента линейного расширения стеклоуглепластиков исходного (а) и после 50 циклов автоклавного формования (б) со схемами армирования:

Г1 - \diamond , Г2 - \circ , Г3 - \square , Г4 - \triangle

Все четыре заготовки стеклоуглепластиков с вышеперечисленными схемами армирования имеют идентичный компонентный состав.

При проведении dilatометрических испытаний значения относительной термической деформации и ТКЛР определяются, как правило, по показаниям второго цикла нагрева образца в заданном температурном интервале. При таких испытаниях отмечается незначительное повышение относительной термической деформации и, соответственно, ТКЛР при повторном нагреве. Это может быть связано с протекающими в ПКМ при нагреве релаксационными процессами, обеспечивающими снижение остаточных технологических напряжений в связующих и ориентированных волокнистых наполнителях, а также с возможным доотверждением полимерных связующих. Кривые, рассчитанные по разности относительной термической деформации при первом и втором циклах нагрева, характеризуют указанные релаксационные процессы.

На рис. 2 показано изменение относительной термической деформации при 1-2 циклах нагрева и рассчитанные релаксационные кривые для гибридов с повышенным содержанием углеродного наполнителя (образцы Г3 и Г4) в исходном состоянии и после 50 циклов автоклавного формования.

Можно отметить, что образцы с чередующимися слоями наполнителей (Г4) показывают повышенные в сравнении с образцами (Г3) значения относительной термической деформации и более существенное проявление релаксационных процессов.

При этом после 50 термоциклов у образцов обеих структур отмечено усиление релаксационных процессов, что может свидетельствовать об увеличении остаточных напряжений в гибридном композите при воздействии повышенных температур и давления.

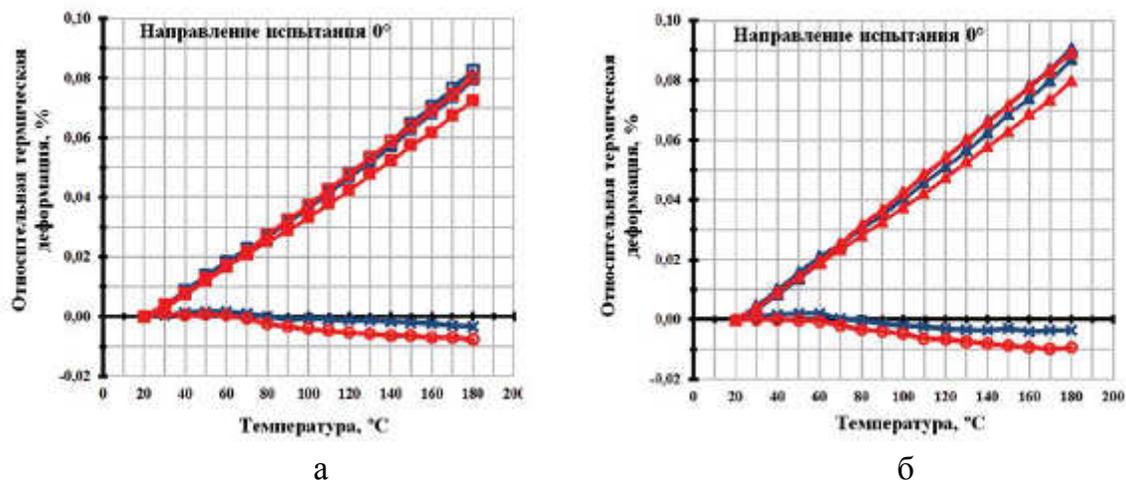


Рис. 2. Температурная зависимость относительной термической деформации стеклоуглепластиков со схемами армирования Г3 (а), Г4 (б) исходных (—) и после 50 циклов автоклавного формования (—): 1 цикл - ■, ▲; 2 цикл - □, △; релаксационные кривые: исходных X и после 50 циклов автоклавного формования Θ

Проведенные исследования термодформационных свойств гибридных композитов (углестеклопластиков) различной структуры и состава свидетельствуют о возможности направленного изменения ТКЛР для получения материалов с заданным уровнем термодформационных свойств. Показано, что низкий уровень значений ТКЛР сохраняется у таких гибридов и после 50 циклов автоклавного формования.

ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРОПИТКИ ПОД ВАКУУМОМ

Шкиркова Л. М., Мартиросян В. С., Обухова Н. С., Ширко А. А.
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Безавтоклавные технологии получения полимерных композиционных материалов (ПКМ) и изделий на их основе, в том числе и пропитка сухого армирующего наполнителя связующим под вакуумом, достаточно широко применяются при изготовлении композитной формообразующей оснастки.

Для ее эффективного применения необходимо, чтобы термдеформационные характеристики материалов оснастки и формуемого изделия были близки. Решение такой задачи требует знания уровня значений термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) композитов, используемых при изготовлении оснастки, и его изменение при температурах эксплуатации. Отсутствие таких данных для импортных и разработанных отечественных связующих и армирующих наполнителей различной природы и схемы армирования определяло цель данной работы.

Были исследованы термдеформационные свойства стекло – и углепластиков с различными схемами армирования, полученных методом пропитки под вакуумом, на основе импортных связующих Araldite, Toolfusion и отечественного аналога – ТО-29-1.

Для определения термдеформационных характеристик указанных материалов использовался dilatometer типа DIL 801 фирмы ВÄHR Thermoanalyse.

Полученные данные (рис. 1а) показывают, что значения ТКЛР для однонаправленных стекло– и углепластиков на основе связующих Araldite и ТО-29-1, аналогичных по природе, практически совпадают в направлении основы [0°] стеклоткани и достаточно близки в поперечном направлении [90°]. Сравнение температурных зависимостей ТКЛР углепластиков, полученных с перекрестной схемой армирования на основе исследуемых связующих, показывает (рис. 1б), что характер изменения и уровень значений этого показателя для импортного связующего Araldite и отечественного аналога ТО-29-1 достаточно близки.

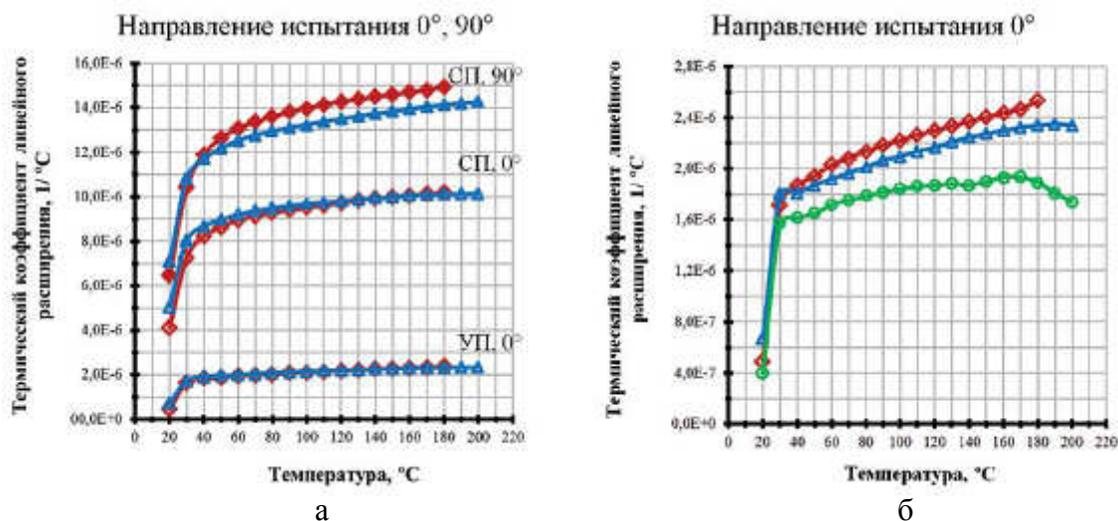


Рис. 1. а: температурная зависимость ТКЛР однонаправленных угле- и стеклопластиков на основе связующих: Araldite - (◊ - 0°, ◆ - 90°), ТО-29-1 - (▲ - 0°, ▴ - 90°); б: Температурная зависимость ТКЛР армированных углепластиков на основе связующих: Araldite - ◊, ТО-29-1- ▲, Toolfusion - ⊕

Вместе с тем углепластик на основе связующего Toolfusion, в состав которого дополнительно введен нанодисперсный углеродный наполнитель, отличается более низким уровнем значений ТКЛР. Характер изменения кривой температурной зависимости ТКЛР показывает большую стабильность значений этого показателя

в исследуемом интервале температур. Наблюдающийся излом на кривой при $T=160-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ и последующее снижение значений ТКЛР свидетельствуют о происходящих изменениях в структуре и свойствах композитов при $T \leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, что требует дальнейшего комплексного изучения этого материала.

Полученные термомодеформационные характеристики композитов (стекло– и углепластиков) с различными схемами армирования на основе связующих Araldite, ТО-29-1 и Toolfusion могут быть использованы при расчете, проектировании и изготовлении изделий из ПКМ, в том числе композитной оснастки с заданным уровнем свойств.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО РАЗРАБОТКЕ ГИБКИХ СТЕКЛОСОТОПЛАСТОВ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЯЧЕЙКОЙ

Корнейчук А. Н., Чугунов С. А., Рыбакова Н. В., Волков В. С.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Сотовые наполнители (СЗ) широко используются в многослойных конструкциях в качестве наполнителей, обеспечивая возможность перераспределять внешние нагрузки. Одним из видов СЗ являются стеклопластиковые сотовые наполнители или стеклосотопласты (ССП), где в качестве армирующего наполнителя используется стеклоткань. Они уже давно нашли широкое применение в различных конструкциях авиационной техники (Ми-17, Ту-204, А-50, Ил-96, Сухой-Суперджет 100, Ан-148 и др.).

В основном СЗ представляют собой множество полых шестигранных ячеек с тонкими вертикальными стенками, но многообразие видов и форм криволинейных трехслойных конструкций требует обеспечения гибкости сотовых наполнителей. Стандартные шестигранные соты очень сложно сформировать в криволинейные панели. Одной из конфигураций гибких сот является прямоугольная форма ячеек (рис.), которая позволяет повторять изгиб в плоскости L без потери своих высоких прочностных характеристик.

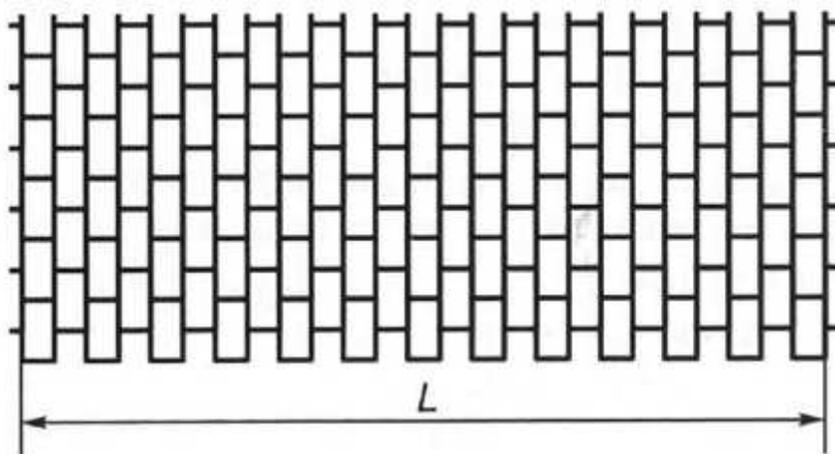


Рис. Стеклосотопласт с прямоугольной формой ячеек

Целью работы является выбор материалов и исследования по разработке стеклосотопласта с прямоугольной формой ячеек.

Для решения поставленной задачи необходимо провести:

- выбор материалов;
- отработать технологический режим нанесения клеевых полос на стеклоткань;
- разработать режимы прессования стеклосотопакетов;
- определить технологические параметры процесса пропитки сотоблоков.

В качестве армирующего наполнителя была выбрана электроизоляционная ткань алюмоборосиликатного состава марки ЭЗ-100. В качестве матрицы использовались фенолоформальдегидное (бакелитовый лак ЛБС-1) и полиимидное (СП-97К) связующие. Соты на основе лака ЛБС-1 имеют температуру эксплуатации до 160 °С, а на основе СП 97К – до 300 °С.

В данной работе исследовали влияние технологических факторов и режимов получения на всех стадиях изготовления стеклосотопласта с прямоугольной формой ячеек.

Для получения необходимой формы ячеек был изготовлен специальный вал для нанесения клеевых полос. Образцы ССП с размером граней ячеек 9x4 мм получали по стандартной клеевой технологии, когда вначале изготавливается сотоблок из склеенных определенным образом слоев стеклоткани. Были отработаны режимы прессования стеклосотопакетов.

Изменение конфигурации ячейки стеклосотопласта потребовало разработки новых технологических параметров процесса пропитки. Исследовано влияние вязкости связующего и режимов пропитки на свойства сотоблоков с прямоугольной формой ячейки.

Были изготовлены экспериментальные сотоблоки по режимам однократной и двукратной пропитки. Для проверки правильности выбранных параметров процесса пропитки (вязкость связующего, время выдержки в связующем и пр.) исследовали распределение связующего по высоте канала ячейки при каждом режиме.

Для изучения упруго-прочностных свойств полученных образцов стеклосотопласта проводили испытания на определение прочности при сжатии.

Расположение сотопанелей в сотоблоке	Сотоблок №1	
	Плотность кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
ССП-1-9П (Лак ЛБС-1)	90±5	4,5±0,3
ССП-7-9П (Связующее СП-97К)	90±5	При 20 °С - 2,2±0,2 При 300 °С – 1,2±0,2

В результате проведенных исследований показано, что разработанные стеклосотопласты с прямоугольной формой ячеек (типа ССП-1-9П и ССП-7-9П) обладают высокими прочностными характеристиками. При этом было установлено, что разработанные соты выкладываются на цилиндрические поверхности диаметром 40 мм и более.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ГИБКОСТИ СТЕКЛОСОТОПЛАСТОВ

Крюков А. М., Волков В. С., Мурашкин Ю. Г., Мешков С. А., Степанов Н. В.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Трёхслойные сотовые конструкции (ТСК) широко используются в современной аэрокосмической технике. Многообразие видов и форм криволинейных ТСК делает актуальной проблему повышения гибкости сотовых заполнителей.

Необходимым условием гибкости панелей сотового заполнителя является наличие в сотовой структуре выпукло-вогнутых многоугольников, таких как «звезда Джексона», «ячейка «флекс» (рис. 1а), (рис. 1б) и т. п. [1].

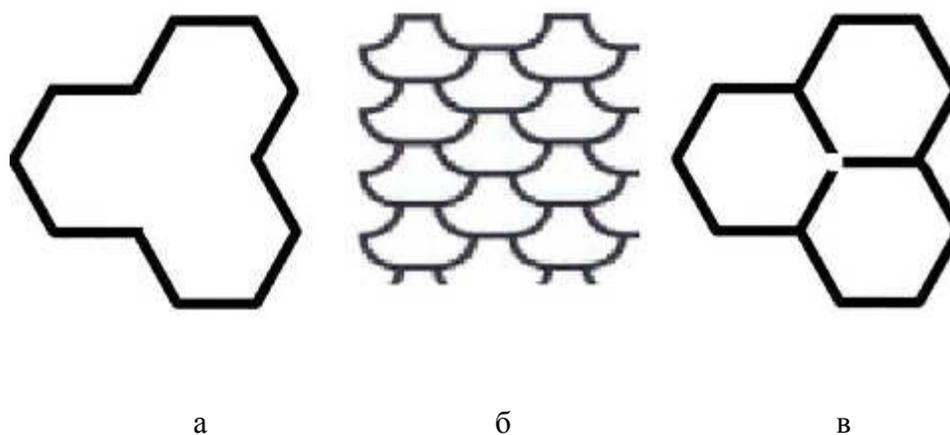


Рис. 1. Типы ячеек гибких сотовых заполнителей:
а – звезда Джексона; б – флекс; в – подкреплённая звезда Джексона

В настоящей работе авторами предложен способ модификации шестигранных стеклосотопластов для придания им гибкости. Равномерное удаление узловых соединений трёх шестигранных элементарных ячеек образует выпукло-вогнутую элементарную ячейку, названную авторами «подкреплённой звездой Джексона» (рис. 1в). Удаляемая часть граней ячеек составляет 0,25–0,33 длины грани. Предлагаемый способ модификации панелей (блоков) стеклосотопластов актуален для клеевых шестигранных сотов с гранями размером ячеек 4,2 – 12 мм.

В процессе отработки технологии получения гибких панелей сотовых заполнителей определялось влияние изменения структуры сотопанели высотой 15 мм при мехобработке некоторых марок сотовых заполнителей на плотность и прочность при сжатии (таблица).

№ примера	Марка стеклосотопласта	Исходная плотность, кг/м ³	Относительное снижение плотности, %	Прочность при сжатии в исходном состоянии, МПа	Прочность при сжатии после удаления узловых соединений, МПа	Остаточная прочность при сжатии, %
1	ССП-1-4,2	71,8	5,8	2,9	2,2	75,9
2	ССП-1-8Т	74,2	4,5	4,0	3,1	77,5
3	ССП-1-8Э	51,6	4,4	2,2	1,7	77,2
4	ССП-7-8Т	68,4	4,3	3,2	2,5	78,1
5	ССП-1-10Т	65,3	3,5	2,4	2,0	83,3
6	ССП-1-12Т	58,7	2,9	1,7	1,4	87,5

Сотовые панели стеклосотопласта с гранями размером 10 мм, обработанные согласно патенту [2], легко выкладываются на полусферическую поверхность диаметром 300 мм (рис. 2).

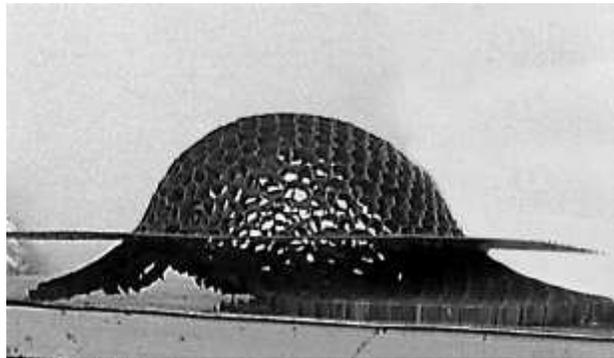


Рис. 2. Стеклосоты с ячейкой «подкреплённая звезда Джексона», выложенные на полусферическую поверхность Ø 300 мм

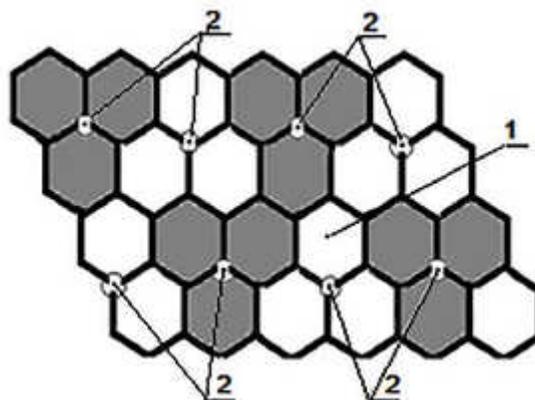


Рис. 3. Схема вырезки узловых соединений в панели стеклосотопласта: 1 – панель стеклосотопласта; 2 – вырезанные узловых соединения

Существенным недостатком разработанной технологии при удалении узловых соединений является снижение прочности материала при сжатии, которое составляет 12-24 % для разных марок сотов. Кроме того, при мехобработке появляются микротрещины на поверхности отверждённого полимерного связующего и образуются оголённые кромки стеклопластика.

Устранение этих недостатков достигается с помощью дополнительной пропитки сотовых панелей. При этом происходит залечивание микротрещин и пропитка кромок стеклопластика. Дополнительную пропитку проводили тем же связующим аналогично основной пропитке. За счёт этой операции прочность при сжатии, например, у стеклосотопласта ССП-1-8Т возрастала на 35 % при увеличении плотности на 12,5 %. С целью снижения значительного прироста плотности стеклосотопласта, а также исключения образования галтелей в углах ячеек, рекомендуется проводить дополнительную пропитку гибкого стеклосотопласта более разбавленным раствором связующего.

Таким образом, предложена технология изготовления гибких стеклопластиковых сотовых заполнителей с шестигранными ячейками с высокими прочностными характеристиками для использования их на криволинейных поверхностях ТСК сложной геометрической формы. Показано, что предложенная модификация технологии обеспечивает сохранение прочности при сжатии стеклосотопластов на уровне 76 – 88 % от исходной.

Литература

1. Крюков А. М., Волков В. С., Мурашкин Ю. Г., Мешков С. А., Степанов Н. В., Шуль Г. С. Возможности повышения гибкости стеклопластиковых сотовых заполнителей // *Авиационная промышленность*. – 2016. – № 2. – С.17-20.

2. Пат. № 2565711 РФ, МПК: В 32 В 3/12. Способ изготовления сотового заполнителя / Крюков А.М., Волков В. С., Мурашкин Ю. Г., Мешков С. А., Степанов Н. В.; заявл. 08.07.2014; опубл. 20.10.2015. – Бюл. № 29 .

РАЗРАБОТКА НОВЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ

*Волков В. С., Кулагина И. В., Крюков А. М., Садикова Н. А.,
Корнейчук А. Н., Денисова Е. В.*

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Сотовые заполнители, разработанные в АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», широко используются в различных отраслях промышленности: авиастроении, ракетостроении и радиотехнике. Они обладают высокими параметрами жесткости и удельной прочности, хорошими тепло-и звукоизоляционными свойствами. В то же время развитие техники требует повышения прочностных характеристик стеклосотопластов при невысоких значениях плотности, а также увеличения габаритов сотовых блоков для повышения производительности труда и надежности трехслойных сотовых конструкций.

Прочностные характеристики стеклосотопластов (ССП) зависят как от свойств применяемых стеклотканей и связующих, так и от технологических параметров процессов их изготовления. Для получения ССП с повышенной прочностью при сжатии использовалась стеклоткань с низкой поверхностной плотностью при увеличенном нанесе связующего, что позволило получить сотопласт с заданными значениями прочности и плотности.

В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» разработана технология изготовления трех марок стеклосотопластов с повышенной прочностью при сжатии: ССП-1-2,5М, ССП-1-3,5М, ССП-1-4,2М с размерами граней ячеек 2,5, 3,5 и 4,2 мм на основе электроизоляционной стеклоткани марки Э4-80 и бакелитового лака ЛБС-1. Стеглосотопласты изготавливали по клеевой технологии пропиткой связующим блоков сотовой структуры с последующим их отверждением. При изготовлении стеклосотопластов использовали поливинилацетальный клей марки БФ-2. Для получения крупногабаритных сотоблоков количество слоев стеклоткани в сотоупаковке существенно увеличено по сравнению с серийно выпускаемыми ССП-1. Изготовленные сотоблоки имеют габаритные размеры не менее чем 1200×650×320 мм, что позволяет увеличить в 1,5-2 раза объем производства разработанных стеклосотопластов (до 160 м³/год) по сравнению с серийно выпускаемым ССП-1 (ТУ 1-596-395-98).

Проведены исследования по разработке технологических режимов изготовления крупногабаритных стеклосотопластов с повышенной прочностью. Проведен полный комплекс технологических испытаний и выпущена технологическая документация с литературой «О₁» (ТУ 1 -596-516-2014, ТУ 1-596-521-2015, ТУ 1-596-524-2016).

В таблице представлены физико-механические свойства стеклосотопластов, полученных по разработанной технологии, и серийных сотопластов марки ССП-1.

Таблица

Сравнительные свойства стеклосотопластов

Серийно выпускаемые ССП-1			Новые ССП		
Марка сотопласта	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Марка сотопласта	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
ССП-1-2,5	90 - 110	3,5 - 4,5	ССП-1-2,5М	98 - 110	5,5 – 7,0
ССП-1-3,5	70 - 100	3,0 – 4,0	ССП-1-3,5М	100 - 120	5,0 – 6,0
ССП-1-4,2	60 - 80	1,8 – 2,2	ССП-1-4,2М	80 – 110	2,5 – 4,0

Разработанные стеклосотопласты в настоящее время внедряются в изделия воздушного, наземного и водного транспорта. В частности, крупногабаритные сотопанели стеклосотопласта ССП-1-3,5М были применены для изготовления наземных радиопрозрачных антенных укрытий больших размеров.

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ И УПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИССЛЕДОВАНИЕ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СЖАТИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Петрова О. Л., Попов А. Г., Выморков Н. В., Перова И. Е., Лисаченко Н. Г.
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В рамках выполнения тематической работы по разработке в АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» отечественных сотовых заполнителей из алюминиевой фольги с характеристиками, соизмеримыми со свойствами аналогичных сотовых заполнителей фирмы «Hexcel», была выполнена программа экспериментальных исследований характеристик сотового заполнителя при сжатии и сдвиге.

Для анализа прочностных и упругих свойств сотового заполнителя использовались те же стандарты, по которым проводит испытания фирма «Hexcel», а именно стандарты ASTM. В ходе данной работы была спроектирована и изготовлена испытательная оснастка, выполнена методическая отработка процесса прочностных испытаний с целью получения максимально достоверных результатов. С этой целью отработывался способ изготовления образца, состоящего из сотового заполнителя, предварительно заполненного пастой с обоих торцов на глубину 2 мм, и обшивок, приклеенных к сотозаполнителю при помощи клеевой плёнки ВК-36. Предложенный способ изготовления образца позволил снизить риск торцевого подмятия стенок полимерного заполнителя за счёт подкрепления сотовой структуры в зоне контакта с обшивкой.

Следует отметить, что стандарт ASTM C365 рекомендует испытывать образцы с квадратным или круглым поперечным сечением с размерами, при которых в образце должно быть не менее шестидесяти ячеек. Для образцов с размером ячейки до 3 мм минимальная площадь поперечного сечения должна быть не менее 625 мм² (сторона образца с квадратным поперечным сечением составляет 25 мм и более), для образцов с размером ячейки от 3 до 6 мм минимальная площадь поперечного сечения должна быть не менее 2500 мм² (сторона образца с квадратным поперечным сечением составляет 50 мм и более), для образцов с размером ячейки от 6 до 9 мм минимальная площадь поперечного сечения должна быть не менее 5625 мм² (сторона образца с квадратным поперечным сечением составляет 75 мм и более). При этом стандартом рекомендуется площадь образца 5625 мм², как наиболее целесообразная. В аналогичном отечественном стандарте ОСТ 1 01188 для испытаний рекомендуется образец с квадратным поперечным сечением со стороной 80 мм независимо от размера сотового заполнителя. Таким образом, в процессе испытаний использовались образцы с различной площадью, что потребовало дополнительных исследований влияния масштабного фактора на результаты испытаний на сжатие сотового заполнителя.

Образцы для испытаний были изготовлены из сотового заполнителя шестигранной формы CRIII-1/8-5052-.002N-8.1 высотой 15,9 мм с размером ячейки 1/8 дюйма (3,13 мм) и размером стороны 1,83 мм из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм. Наряду со стандартными образцами были изготовлены образцы с предварительным заполнением обоих торцов образца сотового заполнителя заливочными композициями двух типов (ПЗ-1 и ЗК-1) на высоту около 2 мм с каждой стороны. Размеры образцов

с квадратным поперечным сечением составляли 50x50 мм (площадь поперечного сечения $S=2500 \text{ мм}^2$), 75x75 мм ($S=5625 \text{ мм}^2$), 100x100 мм ($S=10000 \text{ мм}^2$), 125x125 мм ($S=15625 \text{ мм}^2$), 145x145 мм ($S=21025 \text{ мм}^2$). Образцы для испытаний и в процессе испытаний представлены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Образцы для испытаний на сжатие



Рис. 2. Образец в процессе испытаний на сжатие

По результатам проведённой работы можно сделать вывод, что размер образцов оказывает существенное влияние на прочность и модуль упругости сотового заполнителя при сжатии (рис. 3 и 4). Увеличение площади поперечного сечения образца в 8,4 раза приводит к уменьшению прочности и модуля упругости в среднем в 1,8 и 5,8 раза, соответственно.

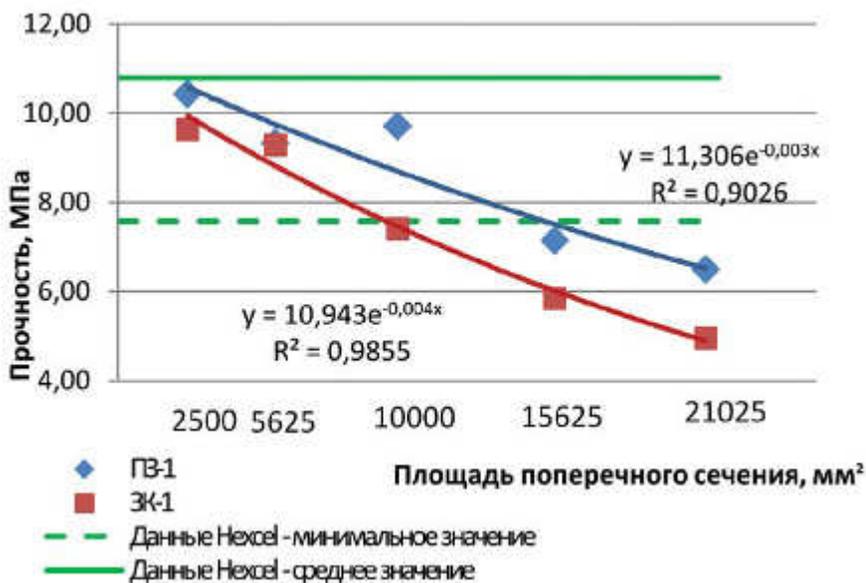


Рис. 3. Зависимость прочности при сжатии сотового заполнителя от площади поперечного сечения образца

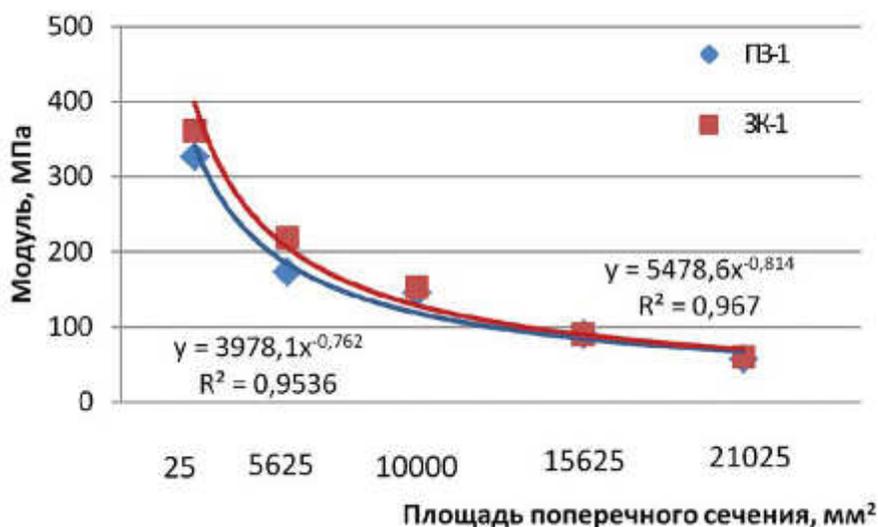


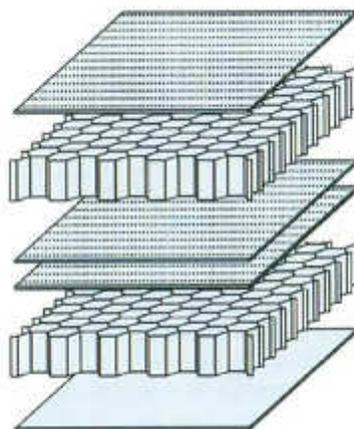
Рис. 4. Зависимость модуля упругости при сжатии сотового заполнителя от площади поперечного сечения образца

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПЕРФОРАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кованов А. Е.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В настоящее время в мире остро встают проблемы экологии. Одной из множества составляющих является задача по снижению шума на местности от самолётов отечественного производства. Решается данная задача преимущественно за счёт использования звукопоглощающих конструкций (ЗПК) в агрегатах самолёта и, в частности, в силовой установке. Звукопоглощающие конструкции состоят из перфорированных стеклопластиковых (или углепластиковых) обшивок и сотового заполнителя. Степень перфорации (количество отверстий на 1 м²), диаметр и взаимное расположение задаётся из условия максимального шумоглушения в определённом диапазоне частот звука.



Для выбора технологии получения отверстий в стеклопластиковых обшивках необходимо учитывать конструктивные, производственно-технологические особенности и свойства обрабатываемого материала, а также технологические особенности сборки и склейки ЗПК.

В данной работе рассматривается несколько тем.

1. Общая технология и особенности механической обработки панелей ЗПК.
2. Методы выполнения перфорации обшивок в составе звукопоглощающих конструкций для авиационных двигателей ПД-14 и SaM-146.

2.1. Перфорация внутренних обшивок панелей ЗПК на стадии предварительной сборки путём сверления отверстий с использованием оборудования с ЧПУ. Данная стадия механической обработки производится в первую очередь. При этом многослойная конструкция собирается не полностью, соты располагаются с обеих сторон перфорируемой внутренней обшивки, и перфорация производится через верхний слой сот. Внешняя обшивка на данной стадии отсутствует. Сборка конструкции производится методом предварительной подпрессовки. Перфорируемая заготовка крепится на алюминиевой оснастке методом вакуумной фиксации. Точное позиционирование заготовки на оснастке обеспечивается специальными штифтами.

2.2. Перфорация внешних обшивок многослойных конструкций. Данная стадия механической обработки является завершающей и производится после окончательной склейки, обработки габаритных размеров и других элементов, подлежащих механической обработке. Выполняется данная операция на специализированной металлической оснастке, на которую с помощью винтов крепится панель ЗПК. Наружные перфорируемые обшивки, как правило, имеют специальные покрытия, предъявляющие дополнительные требования к качеству кромок отверстий, получаемых при перфорации. Здесь исследуются режимы механической обработки, обеспечивающие наилучшее качество кромок отверстий, и используемый инструмент. Также для получения отверстий надлежащего качества проводится дополнительное охлаждение режущего инструмента и зоны механической обработки. Рассматриваются различные способы охлаждения, в том числе с использованием системы вихревого охлаждения (вихревой трубки ARIANA Hot & Cold Gun), не приводящие к разрушению панелей ЗПК, их элементов или нарушению внешнего покрытия.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РЕМОНТА ОТВЕРСТИЙ ПОД РАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА С ПОМОЩЬЮ УСТАНОВКИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ ВТУЛКИ

Насонов Ф. А.

«ОКБ Сухого», г. Москва, Россия

В данной работе приводятся промежуточные результаты по поиску конструктивно-технологических решений при проведении ремонта отверстий под разъемные соединения в изделиях из углепластика. Вырабатываются подходы для оценки дефектов в углепластике и результатов их ремонта с позиций механики разрушения композитов.

Широкое применение в авиационной промышленности изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) и при этом их относительно высокая стоимость вынуждают иметь на вооружении и изыскивать новые эффективные методы ремонта дефектов, чтобы применять их в обоснованных случаях при восстановлении изделий.

В частности, поскольку в авиационной технике (АТ) широко применяется способ соединения деталей, узлов и агрегатов из композитов с помощью механического крепежа (болтовые, заклепочные соединения), требующий выполнения отверстий для крепежа, необходимо предусмотреть эффективные способы ремонта зон деталей, непосредственно примыкающих к крепежу, а также дефектов, которые могут появиться вследствие установки крепежа (с отклонениями от техпроцесса) и его эксплуатации в составе всего изделия.

Целью настоящей работы является поиск конструктивно-технологических решений для проведения ремонта отверстий под разъемные соединения.

Для достижения обозначенной цели необходимо решение следующих задач:

- рассмотреть возможные виды дефектов отверстий под разъемные соединения в изделиях из ПКМ, возможные причины возникновения несоответствий этого типа;
- провести рассмотрение типового порядка действий при принятии решения о проведении ремонта;
- рассмотреть характер распределения механических напряжений в зоне отверстий;
- провести исследование возможности и рациональности применения метода ремонта отверстий под крепеж постановкой ремонтной втулки из стеклопластика;
- обосновать выбор и назначение технологических параметров ремонта отверстий, конструктивные особенности ремонта;
- рассмотреть варианты адаптации предлагаемого метода для серийных заводов, авиаремонтных заводов и эксплуатирующих организаций.

Актуальность решения проблемы обуславливается необходимостью обеспечения заданных ресурса и сроков службы изделий АТ, имеющей в составе конструкции детали из полимерных композиционных материалов.

Возможны следующие основные условия возникновения повреждений отверстий под крепеж в изделиях из ПКМ:

- производственные (полученные на стадии производственного процесса) – при изготовлении, техническом обслуживании, ремонте;
- эксплуатационные (полученные на стадии эксплуатации) – естественный или ускоренный износ, нерасчетные воздействия.

При перечисленных условиях приобретения изделиями повреждений возможно появление следующих вариантов дефектов отверстий:

- отклонение геометрических параметров отверстий от требований КД (увеличение диаметров отверстий, искажение правильности их формы, овализация, искажение заданных конусности и параллельности стенок);
- расслоение многослойных пластиков вблизи отверстий;
- возникновение микроповреждений на кромках отверстий в виде сколов и трещин, распространяющихся вглубь материала.

Для проведения ремонта отверстий под крепеж предлагается использовать метод постановки ремонтной втулки из стеклопластика (рис.). Формовать втулку предлага-

ется по месту установки с помощью специализированного приспособления, используя в качестве полуфабриката ремонтного пластика клеевой препрег (рассматриваются также различные варианты, в т.ч. пресс-материалов).

При изготовлении образцов был осуществлен принцип влияния на давление формования втулок посредством использования разных материалов оправок: стальной, дюралевой и эластичный формующий элемент (ЭФЭ) из кремнийорганической резины. Таким образом должны быть достигнуты разные степени уплотнения заготовок втулок и усилия прижатия к стенкам отверстий в ремонтируемых деталях исходя из различия значений ТКЛР материалов оправок. Т.е. реализуется принцип метода термокомпрессионного формования пластиков.

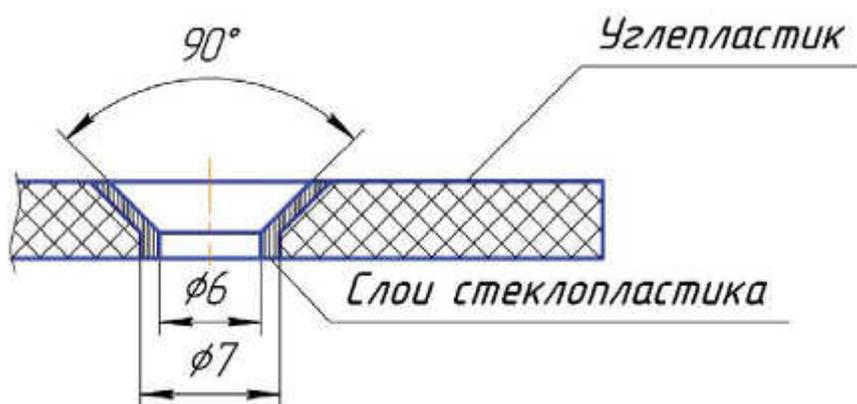


Рис. Эскиз исполнения ремонтной втулки

Для тщательной проработки предлагаемого метода ремонта, определения диапазона возможностей метода, а также выработки подходов для проектирования техпроцессов ремонта изделий из ПКМ был определен круг задач, которые необходимо решить:

– анализ напряженно-деформированного состояния зоны вблизи крепежного отверстия для случаев: «условно бездефектного», отверстие с дефектом в виде зарождающейся трещины [1, 2], то же с установленной ремонтной втулкой;

– изучение проявления «эффекта пробки» – эффекта дорнирования, задача «о псевдопрессовом соединении». Снижение коэффициента концентрации напряжений в зоне отверстия – концентратора напряжений. Функциональное применение ремонтных стеклопластиковых втулок в качестве так называемых низко модульных стопперов (НМС) трещин [3, 4].

Одной из причин активного использования методов механики разрушения при расчетах КМ-конструкций с отверстиями и вырезами стала невозможность объяснения некоторых экспериментально полученных и многократно подтвержденных фактов традиционными методами механики деформируемого тела [2]. Так, значение эффективного ККН даже при практически линейном поведении композита оказывается значительно ниже теоретического ККН (рассчитанного с помощью теории упругости

анизотропного тела). Упругий анализ, учет изменения формы отверстия вследствие деформирования не дают объяснения такому поведению [2].

Рационально рассмотреть задачу Бови (моделирование повреждения фиктивной трещиной) [2, 4] для крепежного отверстия в углепластике с зародившейся вблизи него трещиной, и как меняются условия ее решения при установке стеклопластикового цилиндрического стоппера (ремонтной втулки).

Литература

1. Савин Г. Н. Распределение напряжений около отверстий.– Киев: Наукова думка, 1968.
2. Практическая механика разрушения: учеб. пособие / П. И.Котов, А. В.Зинин, С. В.Сухов.– М.: МАТИ, 2012.– Т.2.
3. Инженерная методика проектирования авиационных конструкций из КМ (обобщение 20-ти летнего практического опыта).– Н.Новгород, 1997.
4. Насонов Ф. А., Морозов Б. Б., Бухаров С. В. К вопросу о ремонте отверстий под резьбовые соединения в изделиях из углепластика с помощью установки стеклопластиковой втулки // Наука и технологии. Т.1. Материалы XXXVI Всероссийской конференции, посвященной памяти референта МСНТ Н.Н. Ершовой. – М.: РАН, 2016.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И КОНФИГУРАЦИИ ОБРАЗЦОВ НА ЗНАЧЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ ПРЕПРЕГА БМИ-3/3692

*Волков Д. А., Попов А. Г., Осауленко А. В., Петрова О. Л.,
Литицкая В. А., Хандорина Е. А.*

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Выполнен анализ результатов аттестационных испытаний при осевом сжатии образцов углепластика на основе препрега БМИ-3/3692.

Для отработки процедуры производственного контроля изготовления углепластиковых панелей и повышения достоверности определения прочностных и упругих характеристик при сжатии, которые являются показателями качества, была разработана и выполнена программа испытаний образцов углепластика БМИ-3/3692. Данная программа испытаний включала в себя исследования по анализу степени влияния различных факторов, таких как: режимы формования, способы порезки образцов, методики испытаний на предел прочности углепластика при сжатии.

Следует отметить, что в настоящее время известно более 20 используемых в отечественной и зарубежной практике стандартов для определения прочностных и упругих характеристик слоистых пластиков. Все они основаны на трех методах передачи нагрузки от испытательной оснастки на образец: через клиновидные захваты путем создания сдвиговых усилий на боковых поверхностях; нагружение через торцы и комбинированный метод нагружения.

Для испытания на сжатие аттестационных образцов на основе препрега БМИ-3/3692 был выбран метод приложения комбинации сдвиговой и торцевой нагрузок.

Методика испытаний основывалась на аутентичном тексте стандарта ASTM D 6641 с небольшими изменениями в размере рабочей зоны образца. Так, в соответствии со стандартом ASTM D 6641 рабочая зона составляет 13 мм при длине образца 140 мм, в проводимых исследованиях – 23 мм при длине образца 150 мм при использовании того же приспособления для испытаний. Увеличение длины рабочей зоны до 23 мм позволило определять и модуль упругости, и прочность материала на одних и тех же образцах, но при этом возник риск появления изгибных деформаций в процессе нагружения образца и его преждевременного разрушения от потери устойчивости.

В результате проведения экспериментальных исследований влияния технологических факторов на прочностные и упругие характеристики при осевом сжатии образцов углепластика БМИ-3/3692 выявлено, что наибольшее влияние на прочность оказывает технология механической обработки и подготовки образцов. Так, порезка образцов на фрезерном станке с ЧПУ позволила существенно повысить прочность. Можно предположить, что это связано:

- с более точным соблюдением требований стандарта по параллельности и перпендикулярности торцов образцов;
- качество обработанной поверхности образцов лезвийным инструментом выше, чем при разрезке алмазным кругом.

Установлено, что при разрезке образцов алмазным кругом закладываются дефекты, такие как расщепление торцов и нанесение борозд, которые при испытании образца могут стать инициаторами разрушения образца.

В работе показано, что на значения прочности при сжатии образцов не оказывают влияния следующие технологические факторы: воздействие на образцы нескольких температурных циклов, изготовление образцов с накладками (образцы с тиснением).

Анализ результатов исследования позволил остановиться на образцах в форме полосы прямоугольного сечения без накладок, вырезанных из пластин на фрезерном станке.

Следующим этапом работы был сравнительный анализ результатов испытаний образцов углепластика БМИ-3/3692, изготовленных с различными размерами рабочей зоны.

Рассмотрено влияние на значения предела прочности и модуля упругости при сжатии углепластика на основе препрега БМИ-3/3692 следующих параметров:

- толщина образцов (количество слоев в образце);
- длина рабочей зоны образцов.

Результаты испытаний представлены в таблице.

Таблица

№ партии образцов	Толщина, мм	Длина рабочей зоны, мм	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа
1	2,67	23	805	67,2
2	3,64	23	650	66,0
3	2,65	13	867	66,2

По результатам испытаний установлено:

– разность деформаций при сжатии не превышает 3,90 % для всех партий образцов, чем объясняются равные значения модуля упругости и отличие значений пределов прочности. Предел прочности, полученный при испытаниях образцов партии № 1, на 19,3 % выше, чем у партии № 2, и на 7,6 % ниже, чем у партии № 3;

– наибольший предел прочности $\sigma = 867$ МПа был получен при испытании образцов партии № 3 с рабочей зоной 13 мм в соответствии со стандартом;

– для образцов партий № 1, 2 наблюдалась потеря устойчивости в области значений прочности при сжатии 700 МПа, что связано с большей рабочей зоной (23 мм), не соответствующей стандарту.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ПЕРВОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Зорин Ю. В., Горлов А. В.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Современная авиация в настоящее время немыслима без применения полимерных композиционных материалов (ПКМ). Многие из них легче и прочнее лучших металлических (алюминиевых и титановых) сплавов, а их применение позволяет снизить вес изделий. Уже к началу второй мировой войны различные детали в авиатехнике стали делать из тканей, пропитанных фенольными смолами, в 50–х годах XX века ПКМ на основе высокопрочных стекловолокон стали активно заменять металлические конструкции в авиации, а в 70–е годы применение ПКМ на основе углеродных, борных и стекловолокон стали обыденным явлением в авиации и космонавтике. Уменьшение удельной массы конструкции в общей массе самолета является одним из действенных путей снижения себестоимости авиаперевозок. У боевого самолета снижение массы планера позволяет увеличить массу полезной нагрузки или дальность полета.

В данной работе в качестве объекта для проведения исследований была выбрана направляющая лопатка входного направляющего аппарата компрессора низкого давления (ВНА КНД).

Входной направляющий аппарат компрессора низкого давления (рис. 1) предназначен для создания закрутки воздуха, поступающего на рабочие лопатки первой ступени компрессора, с целью снижения относительных скоростей и получения оптимальных углов набегания потока на профиль рабочей лопатки.

Условия эксплуатации направляющей лопатки:

– максимальная температура воздуха на входе $T_{\text{вх}} = 182$ °С;

– максимальная рабочая температура лопаток на максимальном режиме работы изделия не превышает 240 °С, кратковременно – 300 °С.

Все детали ВНА КНД, кроме шпилек, выполнены из титанового сплава. Для снижения массы входного направляющего аппарата титановые элементы конструкции заменяют на углепластиковые. Возможность применения ПКМ для изготовления опытного образца направляющего аппарата первой ступени компрессора низкого давления (лопатки) и определила основную цель данной работы.

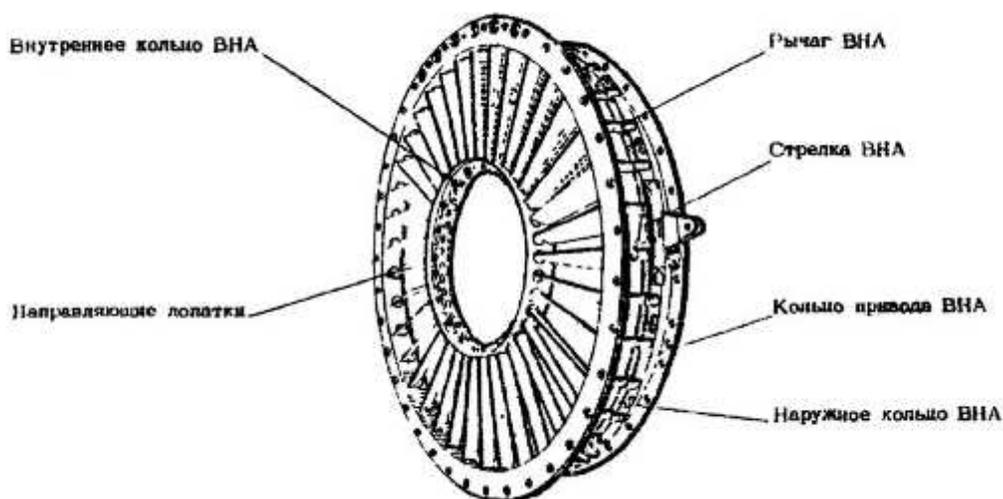


Рис. 1. Входной направляющий аппарат компрессора низкого давления

Для достижения поставленной цели, было сделано следующее:

1. Проведен анализ и выбор основных материалов для изготовления опытного образца направляющего аппарата первой ступени компрессора низкого давления на рабочие температуры до 300 °С. Для изготовления лопатки выбран углепластик БМИ 3/03692 на основе углеродной ткани фирмы «Porcher industries» арт.03692 и бисмалеимидного связующего БМИ-3 (разработка АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина»);
2. Разработана программа исследовательских испытаний и проведены испытания стандартных образцов. Данная программа испытаний позволила определить физико-механические характеристики углепластика на основе препрега БМИ-3/03692 в нормальных условиях и при повышенных температурах;
3. Проведен анализ прочности, собственных частот колебаний лопатки направляющего аппарата в среде MSC/Nastran;
4. Разработаны конструктивно-технологические решения и технология изготовления лопатки из полимерных композиционных материалов. Разработана послойная модель лопатки с помощью CAD-системы Unigraphics NX и проведено моделирование выкладки всех слоев опытного образца направляющего аппарата первой ступени компрессора низкого давления;
5. По математическим моделям детали и их теоретическому контуру разработана математическая модель оснастки с необходимыми технологическими припусками;
6. Изготовлена формообразующая оснастка;
7. Для сокращения времени изготовления лопатки применён автоматизированный раскрой элементов слоёв на промышленном плоттере Zund M-1600;
8. Изготовлены образцы для испытания на износостойкость;
9. Разработана технология механической обработки и контроля геометрии образца (при помощи системы ATOS III / III SO) направляющего аппарата первой ступени компрессора низкого давления.

В результате проделанной работы были изготовлены четыре опытных образца направляющего аппарата из углепластика БМИ-3/03692 (рис. 2). Изготовленные образцы переданы Заказчику, и в данный момент находятся на стадии испытаний.



Рис.2. Опытный образец направляющего аппарата первой ступени компрессора низкого давления из углепластика БМИ-3/03692

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СТВОРКИ РУ НА ТЕХНОЛОГИЮ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ

Маслов А. С., Волков Д. А.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В настоящее время особое значение в российской авиационной промышленности занимает реализация проекта среднемагистрального самолета МС-21 разработки ПАО «Корпорация «Иркут». Этот проект неразрывно связан с проектом разработки и производства двигательной установки ПД-14 конструкции ОАО «Авиадвигатель».

Для достижения конкурентных характеристик двигателя в конструкции двигателя и мотогондолы широко внедряются полимерные композиционные материалы (ПКМ). Применение этих материалов позволяет значительно снизить вес конструкции и повысить эффективность двигателя, а также снизить трудоемкость изготовления на 20-40 %, что положительно сказывается на технологичности изделия. Тенденция применения легких неметаллических материалов является уже достаточно распространенной в мировой практике двигателестроения. В этом ракурсе ориентация на такие решения является более логичной и эффективной, а значит, производство деталей с использованием современных материалов и технологий более технологично по сравнению с ранее освоенными подходами и решениями.

Под технологичностью конструкции понимается совокупность свойств, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных финансовых затрат при производстве, минимизации трудоемкости, рационализации используемого в изготовлении материала, снижения факторов, приводящих к появлению дефектов, и, как следствие, последующему ремонту, для заданных показателей качества объемов выпуска данной детали при серийном производстве.

В данном докладе рассматривается эволюция конструкции панелей створок реверсивного устройства, применяемых в двигателе ПД-14 в составе мотогондолы решетчатого типа для обеспечения реверса тяги (рис.).

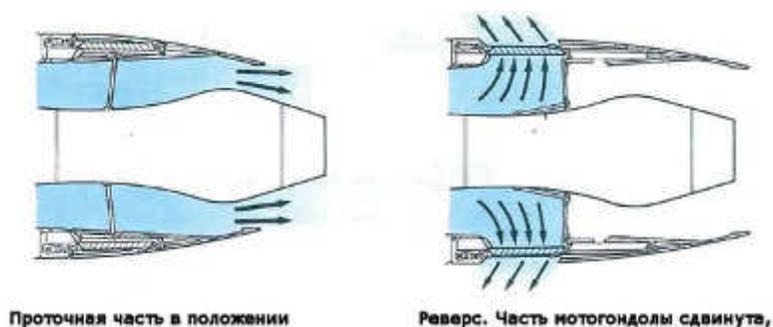


Рис. Принцип работы створок РУ

Проведен сравнительный анализ предложенных вариантов конструкции изделия (исполнения) разработчиком. Выявлены и сделаны акценты на конкретных особенностях каждого исполнения, которые в той или иной мере влияют на технологию изготовления.

В ходе построения технологического процесса были выявлены основные проблемы технологичности на стадиях отработки, по итогам которой найдены и применены оптимальные подходы для получения наилучшего результата в каждом из вариантов исполнений.

Как результат, отражена оценка технологического процесса изготовления створки РУ по таким параметрам, как трудоемкость изготовления (приведена примерная трудоемкость по совокупности выполняемых операций технологического процесса, не включая механическую обработку и подготовку к сборке с металлическими комплектующими) и рациональность используемых материалов, являющихся одними из комплексных характеристик технологичности производимого изделия.

Таблица

Перечень выполняемых операций технологического процесса с фактической трудоемкостью

№	Наименование операция	Трудоемкость по исполнениям, ч/час		
		Исполнение 1 (труд-ть, ч/час)	Исполнение 2 (труд-ть, ч/час)	Исполнение 3 (труд-ть, ч/час)
1.	Выкладка слоев оболочки, режимы автоклавного формования и вакуумных подпрессовок	70	57	44
2.	Установка сотового заполнителя, режим склейки и заполнение пастой, режим отверждения пасты	44	51	46
3.	Подготовка поверхности пасты под выкладку, окончательная выкладка и автоклавное формование (вакуумное для исполнения 1)	67	37	32
Итого		180	145	122

В качестве итога можно сказать, что любые технологические сложности, возникающие в связи с введением изменений в конструкцию или заменой основных материалов, решаемы путем отработки и введения дополнительных операций, но при этом приводят к увеличению или уменьшению временного цикла изготовления, трудоемкости и стоимости комплекта деталей.

В масштабах серийного производства деталей разница, наблюдаемая только в трудоемкости, даст большой экономический эффект, что является позитивным развитием взаимоотношений между разработчиком (заказчиком) и изготовителем изделия.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАСХОДА МАТЕРИАЛА ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ К СЕРИЙНОМУ

Домбров А. В., Волков Д. А.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Для опытного производства изделий из ПКМ характерны высокие показатели расхода материала и трудоемкости изготовления, так как раскрой и выкладка препрегов производится вручную. С внедрением специального программного обеспечения (ПО) Fibersim для моделирования раскроя материала появляется возможность получать выкройки заготовок слоев автоматизированным способом, что позволяет снизить расход материала и трудоемкость выкладки изделия. Автоматизированный раскрой препрега осуществляется на промышленном плоттере Zund M-1600 (рис. 1).

В работе рассмотрены различные подходы к созданию плана автоматизированного раскроя препрегов при производстве изделий из ПКМ. Сформулированы критерии оптимизации программ автоматизированного раскроя. Рекомендованы принципы формирования оптимального плана раскроя для производства деталей из ПКМ в условиях серийного производства.



Рис. 1. Процесс автоматизированного раскроя

Программы раскроя слоев, представляющие собой оптимальную раскладку всех элементов слоя по ширине и длине раскраиваемого материала, составляются персонально для каждой детали с учетом минимизации одного из критериев процесса – времени раскроя. Каждый элемент выкройки маркируется соответствующим чертежным номером с обозначением направления укладки, номера слоя и порядкового номера элемента внутри слоя. Средний коэффициент использования материала в условиях опытного производства составляет приблизительно 0,8.

Дальнейшее повышение коэффициента использования препрега становится возможным благодаря использованию специального ПО GTK, позволяющего оптимизировать программы раскроя материала с возможностью настройки всех параметров работы. При этом возможно комбинирование карт раскроя для различных изделий. Разработка простой и понятной системы маркировки выкроек позволяет сократить время их маркирования и сортировки, а также уменьшает трудоемкость выкладки.

РАЗРАБОТКА ЭПОКСИБАЗАЛЬТОКОМПОЗИТА ДЛЯ КОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТРУБОПРОВОДОВ

Пунина М. А., Бухаров С. В.

ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», г. Москва, Россия

Защита от коррозии железобетонных конструкций канализационной сети становится все более актуальной в последнее время, поскольку устранение аварий требует значительных финансовых и временных затрат. Железобетонные конструкции подвержены воздействию жидких и газообразных агрессивных сред. Значительный эффект на износ конструкций оказывает серная кислота, продуцируемая тионовыми бактериями, потребляющими сероводород. Негативное влияние оказывают также оксиды азота, серы, углерода, наличие на поверхности конструкций различных грибов и бактерий.

Одним из методов защиты от коррозии уже функционирующих конструкций канализационных сетей является нанесение покрытий или оболочек из полимерных композитов на внутреннюю поверхность существующего трубопровода.

Среди композитов наибольшее распространение получили композитные материалы на основе стеклянного волокна. Однако известно, что стекловолокно, используемое при изготовлении стеклокомпозитов, теряет прочность в среде твердеющего цемента (в щелочной среде).

Многочисленные исследования показали, что волокна из базальта при этих же условиях практически не теряют своих исходных прочностных характеристик, что позволяет значительно продлить срок эксплуатации конструкций за счет стойкости материала к воздействию кислой и щелочной среды сточных вод.

Однако только выбор базальтовой армирующей системы не является достаточным для эффективной защиты бетонных конструкций. Важную роль играет правильный подбор типа матрицы, которая из-за своей низкой биохимической устойчивости является слабым звеном в защитных свойствах базальтокомпозита. Систематиче-

ских исследований в этом направлении использования полимерных композитов не проводилось.

Целью настоящей работы является выбор и исследование возможности повышения биохимической стойкости эпоксивинилэфирных матриц и базальтокомпозитов, а также их антикоррозионных свойств. В качестве объектов исследования были выбраны эпоксивинилэфирные связующие на основе смолы «Камфэст-15 ВЭС» и базальтовые ткани различного плетения отечественного производства. Изготовление и стандартные испытания образцов к действию кислотных и щелочных сред в интервале рН 3-9 проводили в ОАО «НПО «Стеклопластик». Результаты испытаний показали, что смола обладает хорошей, но в то же время недостаточной химической стойкостью, в связи с чем необходима доработка состава связующего.

Повышение устойчивости отвержденных эпоксивинилэфирных связующих к действию типовых грибков достигали введением наноразмерных порошков фунгицидных веществ: трифенилоловоацетат и 8-оксихинолят меди в количестве 1-1,5 %. Для оценки биохимической устойчивости полимерных матриц и базальтокомпозитов использовали как традиционные методики, согласно ГОСТ 12020-72. Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред, а так и методы, разработанные в ЦНИИ ВВС МО РФ.

Анализ результатов первой серии экспериментов позволил определить исходные составы эпоксивинилэфирных связующих и типы модифицирующих добавок. Одновременно был установлен факт влияния модифицирующих добавок на процессы отверждения эпоксивинилэфирных связующих и свойства сетчатых полимеров.

ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКЦИИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ

Иванова С. М., Лисаченко Н. Г., Хабенко А. В.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

При изготовлении ПКМ на основе термореактивных полимеров кроме требований к эксплуатационным характеристикам необходимо знать целый ряд технологических свойств связующих и препрегов, таких как жизнеспособность при различных температурах, время полного и частичного отверждения при повышенных температурах и сроки их хранения.

Целью настоящей работы является разработка метода экспресс-оценки кинетических параметров термореактивных материалов по данным дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК), а также разработка программного приложения, позволяющего оптимизировать процесс расчета и получать данные для кинетического паспорта материала.

Скорость химических реакций в изотермическом режиме определяется уравнением Аррениуса:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp(-E/RT) f(\alpha),$$

где: α – степень превращения;

t – время, с;

A – предэкспоненциальный множитель, с⁻¹;

E – энергия активации, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/моль·град;

T – абсолютная температура, К;

$f(\alpha)$ – кинетическая функция.

Получив кривые ДСК процесса отверждения термореактивного материала при трех скоростях нагрева, каждая из которых вдвое выше предыдущей, можно определить эффективную энергию активации реакции отверждения (E). Используя полученное значение E , можно рассчитать время отверждения при заданной температуре до заданных степеней отверждения.

Разработанное программное приложение позволяет оптимизировать процесс расчета и предоставляет данные в виде кинетического паспорта материала. Пример такого паспорта на примере связующего ТЭИС-33М представлен в таблице.

Таблица

Степень отверж. %	Энергия активации, ккал/моль	Время отверждения для заданных температур (°C)							
		-18	4	20	25	30	90	170	200
		годы		сутки			часы	минуты	
5	15,2	4,94	0,459	37,3	24,1	15,8	5,91	7,99	2,68
10	15,4	10,9	0,986	76,5	49,1	31,9	11,1	14,0	4,61
20	15,9	29,2	2,40	181	114	73,3	22,2	24,7	7,83
30	16,3	59,0	4,58	331	207	131	35,8	36,2	11,2
40	16,6	–	–	–	–	–	53,2	49,5	14,9
50	17,0	–	–	–	–	–	76,4	65,7	19,4
60	17,3	–	–	–	–	–	–	86,5	24,9
70	17,6	–	–	–	–	–	–	117	32,9
80	18,0	–	–	–	–	–	–	164	45,0
90	18,5	–	–	–	–	–	–	256	67,6
100	19,2	–	–	–	–	–	–	709	178

Были получены кинетические паспорта эпоксибисмалеимидного связующего ТЭИС-33М и двух типов углепластиков на его основе с использованием углеродных наполнителей: углеродной ленты ЛУ-П/0,1-А (Россия) и углеродной ткани артикул 03692 фирмы «Porcher Industries» (Франция), а также других термореактивных материалов. Полученные прогнозы подтверждены экспериментально.

На рисунке графически представлены данные прогнозирования времени хранения связующего ТЭИС-33М и препрегов на его основе при различных температурах хранения – помещения и холодильной камеры (до степени отверждения 5 %).

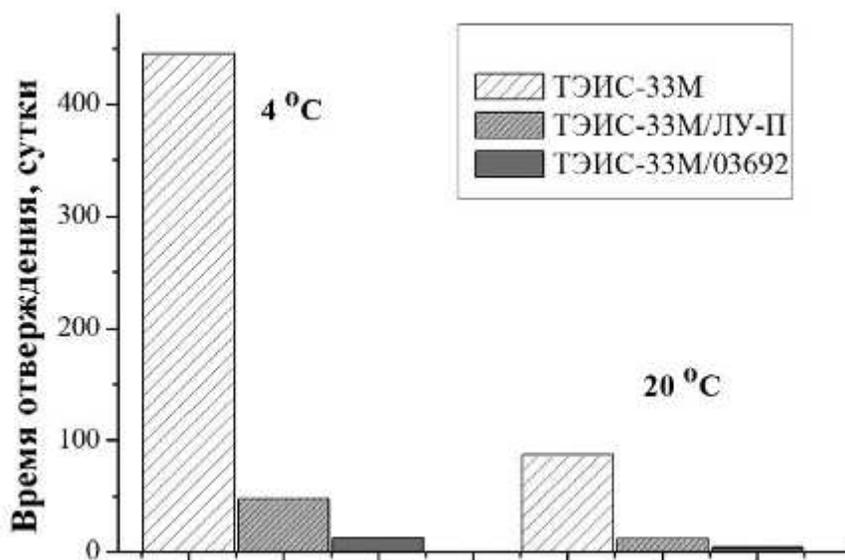


Рис. Время хранения связующего ТЭИС-33М и препрегов на его основе

В помещении время хранения связующего составляет около 3 месяцев, а время хранения препрегов 12 суток для ТЭИС-33М/ЛУ-П и 4 суток для ТЭИС-33М/03692. В холодильной камере (+4 °C) время хранения связующего составляет около 1 года и 3 месяцев, а время хранения препрегов порядка 2,5 месяца для ТЭИС-33М/ЛУ-П и порядка двух недель для ТЭИС-33М/03692.

Таким образом, экспресс-оценка кинетических параметров реакции отверждения позволяет:

- прогнозировать время полного и частичного отверждения термореактивных материалов;
- прогнозировать жизнеспособность и срок хранения термореактивных материалов;
- определять температуру хранения термореактивных материалов, при которой срок хранения максимален;
- отбраковывать композиции материалов по жизнеспособности при разработке новых материалов, минимизируя время выбора состава.

ПОДБОР РЕЖИМОВ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ СВЯЗУЮЩЕГО БМИ-3 МЕТОДОМ ДМА

Ворвуль С. В., Мосиук В. Н., Томчани О. В.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Для изготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ), широко используемых в аэрокосмической технике, необходимы термостойкие связующие. Самое широкое распространение получили связующие на основе эпоксидных смол (ЭС).

Однако максимальная температура эксплуатации композитов на основе ЭС обычно не превышает 150 °С. К более термостойким связующим (температура эксплуатации >250 °С) относятся связующие на основе полиимидов.

Одним из основных параметров, определяющим верхнюю температурную границу эксплуатации ПКМ, является температура стеклования T_g – температура, при достижении которой происходит значительное снижение свойств композита. По большей части температура стеклования композита определяется температурой стеклования связующего, использованного при его изготовлении.

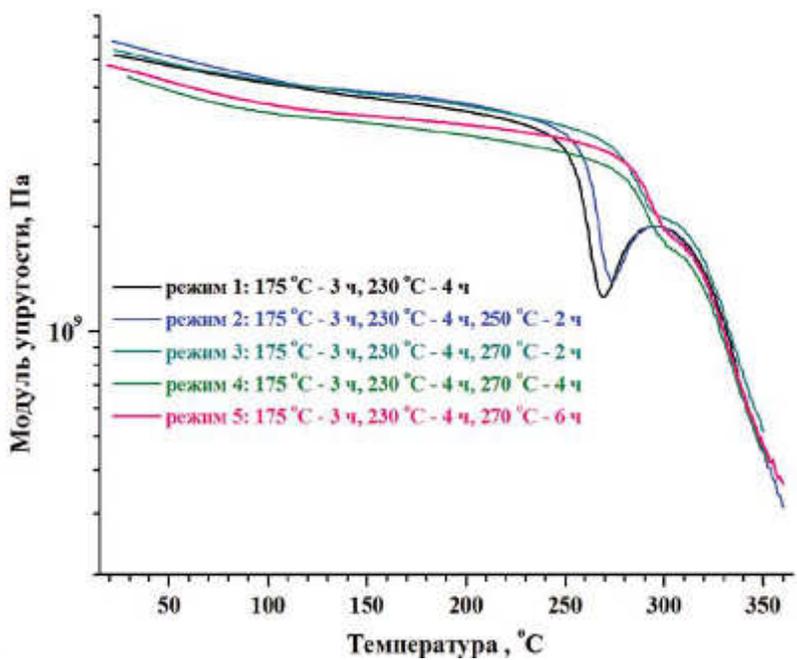
Для определения T_g отвержденных связующих и ПКМ на их основе в настоящее время широко используется метод динамического механического анализа. Динамические испытания позволяют в условиях малоамплитудного периодического деформирования определять важнейшие механические характеристики материала: модуль упругости, модуль потерь и тангенс угла механических потерь. Температура стеклования отвержденного связующего определяется по падению модуля упругости в процессе сканирующего нагрева.

Для достижения максимальной температуры стеклования композиционного материала в изделии и, следовательно, максимальной степени отверждения изделия после формования подвергаются дополнительной термообработке. Облегчить трудоемкий процесс выбора режима термообработки позволяет метод динамического механического анализа.

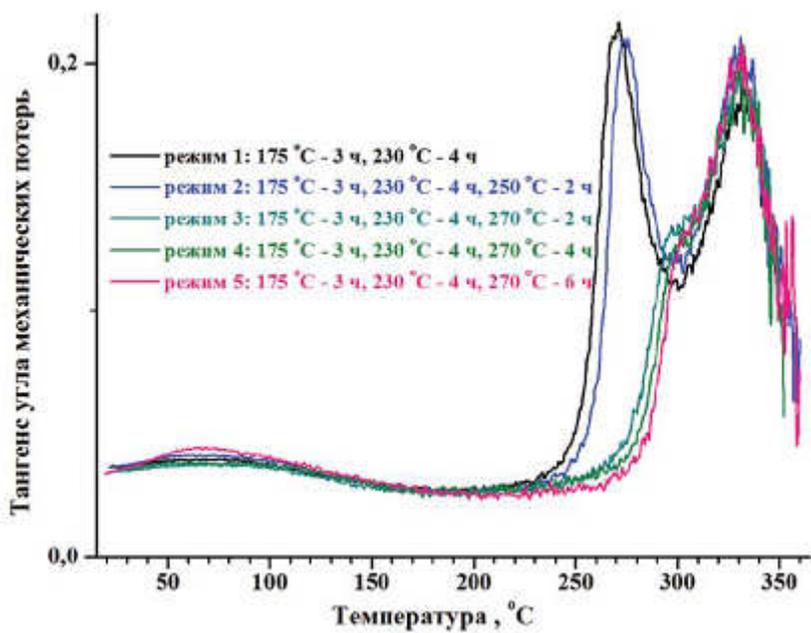
В качестве объекта исследований было выбрано бисмалеимидное связующее БМИ-3 (ТУ 1-596-489-2013). Исследования проводились на вискоанализаторе VA 4000 фирмы «Metravib» (Франция), частота испытания 1 Гц, температурный режим сканирующий, скорость нагрева 1 °С/мин. На рис. 1 представлены температурные зависимости модуля упругости (а) и тангенса угла механических потерь (б) связующего БМИ-3 после термообработки по различным режимам. Из рис. 1 видно, что при термообработке по всем режимам на температурных зависимостях модуля упругости и тангенса угла механических потерь можно выделить два перехода. Первый не является релаксационным (исходя из частотных зависимостей тангенса угла механических потерь) и свидетельствует о неполном отверждении связующего БМИ-3. Это подтверждается результатом повторного испытания образца связующего, после которого первый переход на зависимостях $E' \sim T$ и $\text{tg} \delta \sim T$ исчезает (рис. 2).

Дополнительная термообработка при температуре 250 °С, соответствующей максимальной скорости отверждения связующего по данным ДСК, не приводит к заметному росту температуры стеклования. После термообработки при более высокой температуре – 270 °С в течение различного времени нерелаксационный пик также сохраняется, но его интенсивность значительно уменьшается. Дальнейшее увеличение температуры и времени термообработки нецелесообразно, так как появившиеся на зависимости $\text{tg} \delta \sim T$ в области высоких температур потери после воздействия 270 °С в течение 6 часов могут свидетельствовать о начальных процессах деструкции материала.

Исходя из проведенных исследований, рекомендуемый режим отверждения 175 °С – 3 ч, 230 °С – 4 ч, 270 °С – 2 ч.



а



б

Рис. 1. Зависимость модуля упругости (а) и тангенса угла механических потерь (б) связующего БМИ-3 от температуры

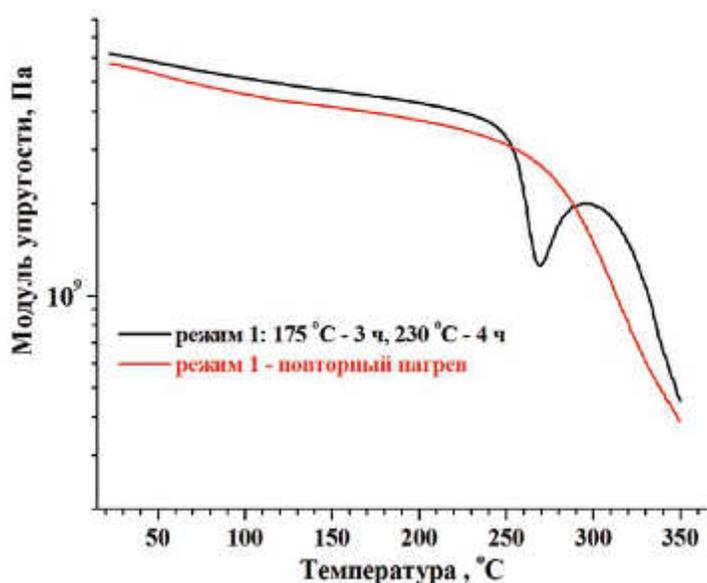


Рис. 2. Температурная зависимость модуля упругости связующего БМИ-3, отвержденного по режиму 1, исходного и после повторного нагрева

МОДИФИКАЦИЯ ЭПОКСИФЕНОЛЬНОГО ТЕРМОРЕАКТИВНОГО СВЯЗУЮЩЕГО СИЛИКАТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Смирнов А. А., Рубцов М. А.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Современная промышленность использует целый ряд термореактивных полимерных связующих с широким спектром свойств. Одним из наиболее распространенных является эпоксидное связующее. Однако полимеры на основе эпоксидных связующих зачастую обладают относительно низкими физико-механическими характеристиками. Одним из путей устранения подобных недостатков является структурная модификация. В последнее время активно исследуется модификация связующих путем введения в композицию наночастиц в качестве наполнителей. Модифицирование термореактивных связующих наночастицами позволяет направленно изменять физико-механические свойства получаемых композитов.

В данной работе в качестве модифицирующей добавки использовались наноразмерные силикатные частицы. Объектами исследования служили: эпоксидное связующее ЭНФБ, модифицированное силикатными наночастицами Аэросил А-300; препрег на основе углеродной ткани арт.14513 и модифицированного связующего, а также однонаправленный углепластик, полученный из данного препрега.

Методом ИК-спектроскопии исследовали возможные структурные и химические изменения, происходящие в связующем при введении силикатных наночастиц. Для сравнения были определены относительные значения интенсивности поглощения гидроксильных групп в исследованных образцах связующего ЭНФБ, определенные по величине отношения площадей пиков, соответствующих колебаниям –ОН (3450 см^{-1}) и С=С в бензольном кольце (1610 см^{-1}).

Для исследования изменения теплового эффекта реакции полимеризации и кинетики отверждения термореактивного связующего в препреге был использован метод дифференциально-сканирующей калориметрии.

Препрег, полученный пропиткой углеродной ткани арт. 14513 связующим ЭНФБ с различным содержанием наномодификатора, был использован для изготовления стандартных образцов однонаправленного пластика по ГОСТ 25.601-80 и ГОСТ 25.602-80. Все опытные образцы были изготовлены за один цикл вакуум-автоклавного формования. Проведены экспериментальные исследования по определению физико-механических и физико-химических показателей отформованных образцов углепластика с различным содержанием модифицирующей добавки.

При проведении испытаний на определение механических характеристик отмечается повышенная стабильность результатов.

В ходе работы достигнуты следующие результаты:

– получены экспериментальные зависимости влияния различного процентного содержания модификатора связующего на механические свойства однонаправленного пластика (рис. 1-3);

– выявлены оптимальные концентрации модификатора для улучшения прочностных характеристик однонаправленного пластика, позволяющие увеличить предел прочности при сжатии более чем на 25 %, предел прочности при растяжении – на 15 %, модуль упругости при растяжении – на 7 %.

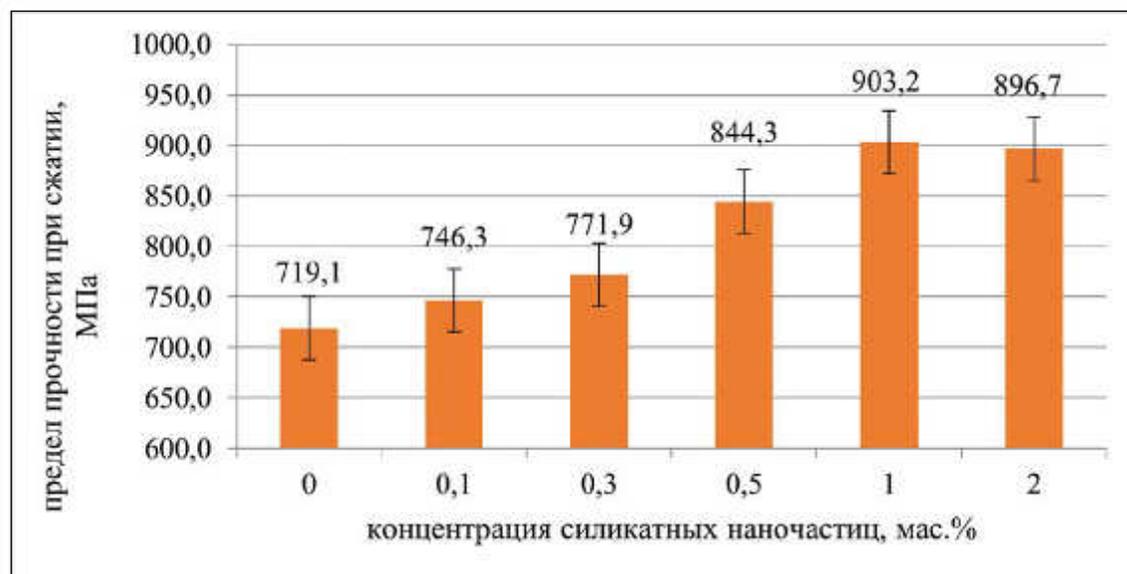


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии от концентрации А-300



Рис. 2. Зависимость модуля упругости при растяжении от концентрации А-300



Рис. 3. Зависимость предела прочности при растяжении от концентрации А-300



Секция 2. КЕРАМИКА СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, СТЕКЛО И ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ

3D-ПЕЧАТЬ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

*Путляев В. И., Евдокимов П. В., Гаршев А. В., Сафронова Т. В.,
Климашина Е. С., Иевлев В. М.*

ФГБОУ ВО «МГУ им. М. В. Ломоносова», г. Москва, Россия

Предмет доклада – создание керамических изделий заданной сложной формы. Зачастую сложность формы препятствует использованию традиционных способов формования изделий, таких, например, как шликерное литье. Воспроизведение сложной и, в частности, макропористой архитектуры в настоящее время уже немыслимо без применения аддитивных технологий. В рамках доклада смысл последнего термина сужен до 3D-печати. Следует подчеркнуть, что использование приемов трехмерной печати, несмотря на всеобщий энтузиазм, не всегда согласуется с массовым производством фасонных изделий. Существуют, однако, вполне определенные области применения керамики со специфическими требованиями к архитектуре, где применение описываемых технологий действительно оправдано. В докладе предпринята попытка рассмотреть технологии трехмерной печати сквозь призму приемов классического формования керамики и дан обзор таких методов быстрого прототипирования, как термоэкструзионная печать, экструзия паст (робокастинг), стереолитография и порошковая 3D-печать, как наиболее часто используемых для получения фасонной керамики приемов.

В докладе рассмотрена в качестве примера узкая область практически безальтернативного использования 3D-печати для создания биокерамики для регенерации костной ткани. Аддитивные технологии формирования биокерамических материалов нового поколения переживают бурное развитие, и в будущем значение этих методов будет только возрастать, поскольку в вопросе создания упорядоченной архитектуры пространства макропор им трудно найти альтернативу. Анализ ведущихся в настоящее время исследований в области кальций-фосфатных остеопластических материалов позволяет предположить, что основными трендами станут следующие направления:

1) активная реализация концепции конструкций тканевой инженерии (КТИ), что потребует разработки новых реакционносвязанных материалов холодного отверждения и адаптации их к методам порошковой 3D-печати, робокастинга и сходных методик;

2) в области стереолитографии продолжатся работы по улучшению латерального разрешения (что включает как улучшение существующих вариантов данного метода, так и совершенствование состава и морфологии керамических суспензий); с другой стороны, определенные усилия будут направлены на обеспечение непрерывности движения формируемой модели по вертикальной оси («вытягивание» модели) за счет более детального исследования процессов полимеризации вблизи границ модель/суспензия и суспензия/окно засветки;

3) несмотря на то, что термоэкструзионная печать все больше рассматривается как способ изготовления композитов полимер/фосфат кальция, вполне возможно, что «второе

дыхание» метода будет связано с реализацией вспомогательных функций, например, изготовления форм для шликерного литья.

Создание osteoconductive керамических имплантатов в рамках этих направлений развития потребует как обновления неорганической основы материалов, так и исследований в области дизайна порового пространства. В целом, предстоит более точно очертить те области керамического производства, где применение аддитивных технологий будет оправдано как с конструктивной, так и с экономической точек зрения.

Настоящий доклад подготовлен авторским коллективом в рамках теоретических и экспериментальных работ по проекту РНФ № 14-19-00752.

РАЗРАБОТКА ПРОРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СОЗДАНИЯ УЗЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МГТД

Мезенцев М. А., Каримбаев Т. Д., Ежов А. Ю.

ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», г. Москва, Россия

Повышение боевых, эксплуатационных и экономических характеристик малоразмерных газотурбинных авиационных двигателей (МГТД) для перспективных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и вертолетных двигателей (ВД) зависит от степени использования в них различных композиционных материалов. В докладе представлены следующие направления:

– разработка конструкций и прорывных технологий создания МГТД с деталями и узлами из отечественных композиционных материалов (ПКМ, МКМ и/или ИКМ, ККМ и УУКМ с покрытиями) для перспективных БЛА и ВД;

– обеспечение снижения массы двигателя и его элементов на 40 и более процентов, повышение температуры газа перед турбиной на 25–30 %, улучшение экологических характеристик и других технико-экономических показателей.

– демонстрация работоспособности элементов двигателя из композиционных материалов путем поузловой доводки и экспериментальных исследований деталей в режиме эксплуатации двигателя.

– создание макетных образцов роторных и статорных элементов двигателя из неметаллических материалов.

– создание научно-технического задела по применению композиционных материалов в конструкциях двигателей различного назначения.

Разработаны новые конструктивные решения и прорывные технологии использования композиционных материалов с реализацией их характеристик в конструкциях двигателя. Проведены экспериментальные исследования как образцов, так и опытных деталей и узлов из новых композиционных материалов.

Получены сведения о физико-механических свойствах новых композиционных материалов при нормальных и высоких (до 1500 °С) температурах применительно к использованию их в перспективных МГТД. Изготовлены и собраны макеты статорного (рис. 1) и роторного (рис. 2) узлов МГТД с применением неметаллических материалов.



Рис. 1. Статорный узел с жаровой трубой и сопловым аппаратом из керамического материала



Рис. 2. Роторный узел с рабочими колесами низкого, высокого давления и турбины из композиционных материалов

В частности, отработана технология изготовления, изготовлены и испытаны элементы МГТД:

- рабочее колесо (РК) компрессора низкого давления из ПКМ;
- РК компрессора высокого давления из высокотемпературного ПКМ на 320 °С [1];
- РК турбины высокого давления из КМ для последующей термообработки в ККМ [2];
- жаровая труба из ККМ C/SiC [3];
- керамические тела качения из монолитного карбида кремния (SiC) и сепаратор из углепластика для подшипников качения [4];
- сопловой аппарат из дисперсно-упрочненного алмазными частицами карбида кремния [5].

Снижение массы узлов составило ~49,5 % по сравнению с металлическими прототипами. Жаровая труба, сопловой аппарат и турбина, изготовленные из ККМ, позволяют повысить КПД двигателя на 1,5–2 % за счет отсутствия охлаждения и повышения температуры газа перед турбиной. Разработанные и изготовленные узлы из композиционных материалов соответствуют мировому уровню достижений в области перспективных МГТД, а некоторые детали не имеют зарубежных аналогов.

Разработки позволяют повысить тактико-технические характеристики МГТД и могут применяться в различных двигателях.

Результаты работы будут использованы при доработке деталей и узлов МГТД из неметаллических материалов до VI уровня технологической готовности, а также при создании перспективных двигателей различного назначения с широким применением деталей и узлов из композиционных материалов.

Литература

1. Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А., Ежов А.Ю. Технологический облик и экспериментальные исследования рабочего колеса центробежного компрессора из высокотемпературного полимерного композиционного материала: сб.тез. докл. «Авиадвигатели XXI века». – М.: ЦИАМ, 2015. – С.715;
2. Мезенцев М.А., Каримбаев Т.Д. Конструктивный и технологический облик элементов малоразмерного ГТД из композиционных и керамических материалов. – X Международная научная конференция по гидроавиации «Геленджик 2014», г. Геленджик, 5 – 6 сент. 2014;
3. Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А. Неметаллическая жаровая труба и сопловой аппарат, интегрированные в конструкцию МГТД. – XXXII Всероссийская конференция по проблемам науки и технологий, 12-14 июня 2012 Миасс, Челябинская обл.
4. Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А., Алферов А.И., Гордеев С.К. Керамические тела качения перспективных шарикоподшипников. Материал, технология изготовления и механическая обработка. Расчеты и испытания // Композиты и наноструктуры. – 2010. – №2 – С. 12-27.
5. Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А., Ежов А.Ю., Гордеев С.К., Корчагина С.Б. Дисперсно-упрочненные композиции алмаз-карбид кремния – новые материалы для машиностроения // Композиты и наноструктуры. – 2015. Т. 7, – № 2. – С.61-71.

СВЕРХВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ ZrV_2 -SiC: ПОЛУЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

Соколов П. С., Аракчеев А. В., Михальчик И. Л., Ланин А. В., Русин М. Ю., Келина И. Ю.
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Создание новых тугоплавких и жаростойких керамических композиционных материалов под цели и задачи авиакосмической промышленности является важной и актуальной задачей. В настоящее время в России и в мире активно ведутся разработки новых сверхзвуковых и гиперзвуковых летательных аппаратов (ЛА). Проектирование и создание такого рода ЛА невозможно без серьёзного научного и технологического задела в области сверхвысокотемпературных керамических материалов (СВТКМ). Среди СВТКМ особое место занимают дибориды циркония и гафния. Керамика на основе ZrV_2 и HfV_2 , кроме исключительной тугоплавкости ($T_{пл.} > 3000$ °С), обладает ещё целым рядом уникальных свойств, таких как высокая окислительная стойкость, хорошая стойкость к термоудару, высокая теплопроводность, высокая твердость, приемлемая трещиностойкость и износостойкость, что в совокупности делает её перспективным материалом для теплонагруженных деталей гиперзвуковых ЛА. Отметим, большинство традиционных металлических и керамических материалов при температурах более 1800 °С в условиях воздействия окислительной среды перестают работать.

Плотную керамику на основе ZrV_2 и HfV_2 обычно получают спеканием порошковых композиций. Основным методом производства тугоплавкой и сверхвысокотемпературной керамики остается метод горячего прессования (ГП). Дибориды циркония и

гафния в чистом виде уступают по окислительной стойкости керамике с добавками. Введение в керамику SiC, нитрида кремния, карбидов и силицидов переходных металлов повышает её окислительную стойкость за счет образования сплошных защитных пленок на основе В Si O. Кроме того, добавки способствуют активации процесса спекания.

Целью данной работы было получение плотной керамики на основе ZrV_2 -30 об.%SiC с различными добавками (Si_3N_4 , $TiSi_2$, $ZrSi_2$, $MoSi_2$) методом ГП, а также изучение основных теплофизических и прочностных свойств в широком диапазоне температур.

В нашей работе были использованы тонкодисперсные порошки отечественного производства марки «ч». Смешивание порошков производили в лабораторной планетарной мельнице в течение 24 ч. Затем шихту извлекали из помольных стаканов, сушили и протирали через стальное сито с ячейкой 200 мкм.

Полученные смеси помещали в установку ГП оригинальной конструкции. Компактирование и одновременное спекание производили в графитовых пресс-формах с внутренним сечением 70×32 мм и Ø59 мм. Образец обычно нагревали со скоростью ~20 °С/мин до температуры 1500 °С под вакуумом (~10 Па). Затем давление прессования увеличивали до ~20 МПа, производили напуск аргона, поднимали температуру до 1800-1900 °С и выдерживали 30 мин. до прекращения усадки. После режима ГП производили механическую обработку алмазным инструментом.

Полученные образцы СВТКМ имели высокую плотность (97-99 % от теоретической) и низкую пористость (~0,3 %). Прочность на статический изгиб при 20 °С составила 400-600 МПа. Микротвёрдость по Виккерсу составила 13-15 ГПа (при нагрузке на индентор 3 кг), что сравнимо с твердостью твердого сплава ВК8 (WC8-Co). Коэффициент интенсивности напряжений (K_{Ic}), рассчитанный по методу Палмквиста из длины радиальных трещин, формирующихся около отпечатка алмазной пирамиды, составил 5,1-5,9 МПа×м^{1/2}, что сравнимо с K_{Ic} горячепрессованного Si_3N_4 . Термическое расширение составило $\alpha_{20-1100} = 6,4 \times 10^{-6}$ град⁻¹, что находится на уровне керамики из Al_2O_3 . Кроме того, образцы показали исключительно высокую теплопроводность – до 80 Вт×м⁻¹×град⁻¹, что сравнимо с теплопроводностью алюминия.

СВЕРХБЫСТРОЕ МИКРОВОЛНОВОЕ СПЕКАНИЕ ОКСИДНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

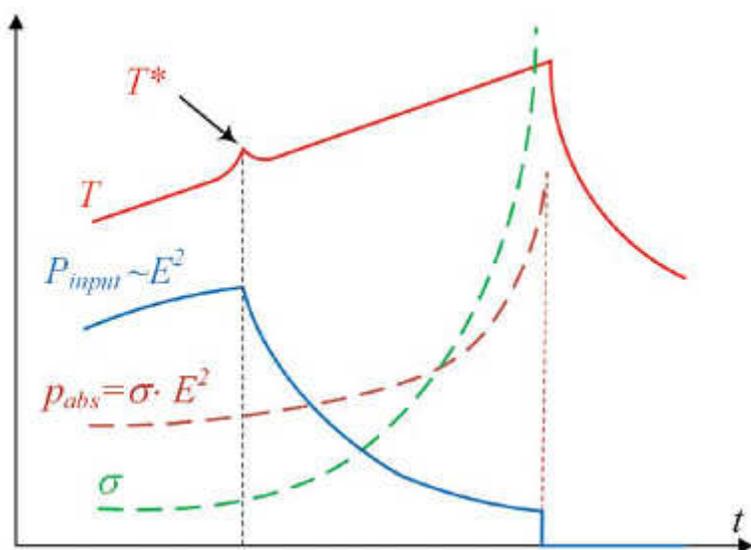
*Быков Ю. В., Егоров С. В., Еремеев А. Г., Плотников И. В., Рыбаков К. И.,
Сорокин А. А., Холопцев В. В.*
ФГБУН ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

В ряде опубликованных в последние годы работ сообщается об эффекте сверхбыстрого спекания (flash sintering) керамических материалов при наложении на образец постоянного или низкочастотного электрического напряжения [1-5]. Сверхбыстрое уплотнение до близкой к теоретической плотности происходит за время в десятки или единицы секунд при определенных, зависящих от температуры образца (печи) значениях удельной мощности джоулевых потерь, обусловленных протекающим через

образец током. При определенном соотношении мощностей объемных источников и поверхностных стоков тепла в нагреваемом материале развивается температурная неустойчивость (thermal runaway), обусловленная положительной обратной связью между проводимостью и температурой. На данный момент ответственный за эффект сверхбыстрого спекания механизм остается предметом дискуссий, однако все более признанной считается связь ускоренного уплотнения и развития в образцах температурной неустойчивости.

Возможность развития температурной неустойчивости считается одним из недостатков, внутренне присущих спеканию при объемном нагреве материалов СВЧ излучением. Использование системы быстрого автоматического управления СВЧ мощностью позволяет контролировать развитие неустойчивости и реализовать сверхбыстрое спекание керамики до близких к теоретическим плотностей в отсутствие стадии изотермической выдержки.

Эксперименты по СВЧ спеканию оксидных материалов композиций $\text{Yb}:(\text{LaY})_2\text{O}_3$, Y_2O_3 , Al_2O_3 , MgAl_2O_4 выполнялись на специализированном гиротронном комплексе для высокотемпературной обработки материалов мощностью до 6 кВт на частоте излучения 24 ГГц. Образцы диаметром 13 мм и толщиной 2–3 мм компактировались одноосным прессованием из порошков со средним размером зерна 100–450 нм. Управление процессом нагрева осуществлялось с использованием температуры образца в качестве сигнала обратной связи для изменения величины поступающей в аппликатор мощности. Скорости быстрого нагрева до предустановленной температуры варьировались в интервале 100–2400 °С/мин. Во всех процессах спекания отсутствовала стадия изотермической выдержки при максимальной температуре спекания; СВЧ мощность автоматически отключалась при достижении предустановленной температуры.



Характерные зависимости температуры образца (T), удельной поглощаемой в образце микроволновой мощности (p_{abs}), мощности поступающего в аппликатор излучения (P_{input}), и эффективной проводимости образца (σ), от времени в процессе микроволнового нагрева с постоянной скоростью

На рисунке приведены характерные зависимости температуры образца (T), мощности поступающего в аппликатор излучения (P_{input}), удельной поглощаемой в образце мощности (p_{abs}) и эффективной СВЧ проводимости образца (σ) от времени, наблюдавшиеся в процессах микроволнового нагрева с постоянной скоростью. При некоторой температуре образца (T^*) скорость нагрева начинает заметно превышать заданную. Коррекция скорости нагрева достигается резким снижением мощности P_{input} , необходимой для поддержания заданного темпа нагрева. При нагреве с постоянной скоростью роста температуры (dT/dt) компенсация увеличивающихся с температурой тепловых потерь образца обеспечивается ростом p_{abs} , пропорциональной произведению эффективной проводимости и квадрата напряженности электрического поля (E): $dT/dt \sim p_{abs} \sim \sigma E^2 \sim \sigma P_{input}$. Продолжение нагрева с заданной скоростью dT/dt при уменьшении величины P_{input} возможно только при условии одновременного роста СВЧ проводимости материала образца.

В экспериментах были получены образцы керамик перечисленных составов с конечной относительной плотностью 98–99 % при длительности процессов от долей минуты до нескольких минут. Величина удельной поглощенной мощности p_{abs} , оцененная на основе уравнения баланса энергии и экспериментальных данных, составляла от 20 до 400 Вт/см³, что соответствует плотности мощности джоулевых потерь в экспериментах по flash sintering. Это обстоятельство является свидетельством сходства/идентичности механизмов, ответственных за сверхбыстрое спекание при обоих методах нагрева.

Анализ экспериментальных данных и результатов исследований эволюции микроструктуры спеченных образцов, указывающих на присутствие жидкой фазы в объеме материала во время его нагрева, свидетельствует о механизме сверхбыстрого уплотнения, в основе которого лежит предплавление поверхностей частиц спекаемого материала. Избыток примесей и дефектов в приповерхностных областях зерен обуславливает их повышенную электрическую проводимость и существенно снижает температуру их плавления по сравнению с температурой плавления чистого материала в объеме зерна. При объемном энерговыделении в образце реализуется неоднородное температурное распределение с максимумом в его центре. При достаточной величине удельной поглощенной мощности происходит предплавление поверхностей зерен и увеличение эффективной СВЧ проводимости приповерхностных областей, результатом которого является развитие температурной неустойчивости. Ускоренный процесс диффузионного массопереноса через квазижидкий слой приводит к округлению формы зерен. Схожесть химического состава жидкой фазы и зерен обеспечивает их полную смачиваемость. Под действием капиллярных сил происходит перегруппировка соседних зерен вследствие их вращения и проскальзывания относительно друг друга, что приводит к быстрому уплотнению материала. В результате локального уплотнения центральной области образца жидкая фаза выдавливается в более пористые периферийные области, способствуя их уплотнению. Область максимального энерговыделения движется по образцу вместе с жидкой фазой, и фронт уплотнения распространяется от центра образца к его периферии, приводя к образованию плотного материала.

Предполагая схожесть механизмов сверхбыстрого микроволнового спекания и flash sintering, следует отметить, что отсутствие электродов для пропуска тока через спекаемые образцы является очевидным преимуществом СВЧ процесса с практической точки зрения.

Литература

- M. Cologna, et al.// J. Am. Ceram. Soc.– 2011.– № 94.– P.316–319.
H. Yoshida, et al.// J. Eur. Ceram. Soc.– 2014.– № 34.– P.991–1000.
R. Raj // J. Eur. Ceram. Soc.– 2012.– № 32.– P.2293–2301.
K.S. Naik, et al.// J. Eur. Ceram. Soc.– 2014.– № 34.– P.2435–2442.
Y. Du, et al.// J. Eur. Ceram. Soc.– 2016.– № 36.– P.749–759.

ОСОБЕННОСТИ АЗОТИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ С ДОБАВКОЙ ОКСИДА ИТТЕРБИЯ

Ганичев А. И., Забейжайлов А. О., Лисаченко М. Г., Келина И. Ю.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Использование редкоземельных металлов и их оксидов в качестве активаторов процесса жидкофазного спекания нитрида кремния достаточно подробно описано в литературе [1-3]. При этом в некоторых патентах приводится информация об использовании соединений редкоземельных металлов в качестве катализаторов азотирования кремния [4, 5], однако данных об исследовании их влияния на процесс реакционного спекания нет.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния добавки оксида иттербия (Yb_2O_3) на процесс азотирования кремния, разработка режима реакционного спекания, получение образцов реакционносвязанного нитрида кремния (РСНК) с добавкой Yb_2O_3 и измерение основных физико-механических и теплофизических свойств данного материала.

В работе варьировалось содержание Yb_2O_3 в интервале от 0,3 до 0,9 мол.%, а также состав газовой атмосферы при азотировании заготовок. Показано, что Yb_2O_3 оказывает катализирующее воздействие на начальном этапе азотирования кремния в области температур 1140 – 1170 °С. При этом происходит образование тугоплавких фаз силикатов иттербия ($\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, Yb_2SiO_5) и формирование тонкой микроструктуры без крупных пор.

Установлено, что для полного завершения реакции азотирования количество Yb_2O_3 в шихте должно составлять 0,5-0,6 мол.%. Увеличение добавки Yb_2O_3 до 0,9 мол.% приводит к снижению открытой пористости и затруднению доступа азота по всему объему образцов, и как следствие, к образованию областей с непрореагировавшим кремнием. Снижение содержания Yb_2O_3 до 0,3 мол. % уменьшает его катализирующее воздействие. В этом случае в образцах наблюдается остаточное содержание кремния до 2 масс.%, что ухудшает их диэлектрические свойства, увеличивает открытую пористость и снижает механическую прочность.

Исследовалось влияние состава газовой атмосферы на процесс азотирования кремния с добавкой Yb_2O_3 . Помимо азотирования в чистом азоте также использовались смеси азота с 10 % гелия и азота с 10 % водорода. Показано, что добавка H_2 положительно влияет на полноту прохождения реакции. При прочих равных условиях образцы, полученные в атмосфере азота с 10 % H_2 , имеют привесы на 2 % больше, чем образцы, изготовленные в чистом азоте. Добавка гелия замедляет реакцию азотирования.

Для состава с 0,6 мол.% Yb_2O_3 был оптимизирован температурный режим, обеспечивающий полноту азотирования кремниевых заготовок. По данному режиму были изготовлены образцы, которые имели уровень прочности на изгиб ~ 300 МПа, превышающий показатели разработанных ранее материалов на основе реакционносвязанного нитрида кремния. Следует отметить, что такая прочность не связана с уплотнением материала (линейная усадка составляет всего 0,2 – 0,3 %), а обусловлена характером микроструктуры материала с равномерно распределенной мелкодисперсной закрытой пористостью.

Литература

1. Ki-Min Lee et al. Microstructural evolution and mechanical properties of gas-pressure-sintered Si_3N_4 with Yb_2O_3 as a sintering aid // J. Mater. Res.— 1999.— V.14, № 5.
2. T. Nishimura and M. Mitomo High temperature strength of silicon nitride ceramics with ytterbium silicon oxynitride // J. Mater. Res.— 1997.— V.12, № 1.
3. Mani Gopal et al. Seamless Joining of Silicon Nitride Ceramics // J. Am. Ceram. Soc.—2001.— № 84 [4].
4. Miyanaga et al Si_3N_4 ceramic Si-base composition for its production, and method for its production. US Patents, 2003.
5. A.Horiuchi et al. Method for production of Si_3N_4 sintered body. US Patent, 1987.

БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА БОРА

*Овсиенко А. И.¹, Румянцев В. И.¹, Орданьян С. С.²,
Синани А. Б.³, Беспалов И. А.⁴*

¹ ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВО «СПБГТИ(ТУ)», г. Санкт-Петербург, Россия;

³ ФГБУН ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия;

⁴ ОАО «НИИ Стали», г. Москва, Россия

Керамику на основе карбида бора можно рассматривать как перспективную по баллистическим и весовым характеристикам. В качестве альтернативы горяче-прессованному карбиду бора (НРВС) может быть предложен реакционноспеченный карбид бора (RVBC), который представляет собой композит с низким удельным весом, содержащий фазы кремния (Si), карбида кремния (SiC), сложного карбида на основе карбида бора ($\text{B}_{4-x}\text{Si}_y\text{C}$) и карбида бора (B_4C), получаемый методом

пропитки пористой заготовки расплавом кремния при температурах 1450-1650 °С.

Цель работы

Исследование баллистических характеристик керамики на основе RBBC и HPBC.

Материалы и методы

На базе ООО «Вириал» согласно серийной технологии были получены образцы-свидетели из HPBC (ТУ 3988-033-23042805-2013) и RBBC (ТУ 3988 -026 -23042805-2012). Исследование физико-механических свойств и структуры образцов проводили по стандартизованным методикам. Исследования на полученных образцах сопротивления внедрению при различных нагрузках (методика описана в работе [1]) и кольцевого изгиба (ИСО 6474) проводили на базе ФТИ им. Иоффе. Баллистические испытания проводили на исследовательской базе РЦИ СИЗ ОАО «НИИ Стали» по методике, описанной в работе [2]. Обстрел бронезэлемента (плитка 50x50x10 мм), свободно подвешенного в рамке, которая устанавливалась в пулеуловитель, проводили из снайперской винтовки СВД (калибр 7,62 мм) с дистанции 10 м одной пулей Б32 (патрон 7-БЗ-3). Выстрел производился в центр бронезэлемента. Скорость пули при испытаниях находилась в интервале 815-840 м/с.

Результаты

Особенности получения, а также результаты исследования свойств и параметров структуры HPBC и RBBC описаны в работе [3]. Результаты диагностирования физико-механических свойств и микроструктуры образцов-свидетелей, полученных в рамках данной работы, представлены в табл. 1.

На рисунке приведен график зависимости изменения значения твердости (сопротивления внедрению) при увеличении нагрузки индентирования. Для HPBC с увеличением нагрузки индентирования от 5 до 100 кг наблюдается падение величины сопротивления внедрению практически в 2 раза. Характер кривой позволяет сделать предположение, что при дальнейших увеличениях нагрузки величина сопротивления внедрению продолжит снижаться. Данный эффект может быть объяснен нестехиометричностью карбида бора, как фазы переменного состава. Для RBBC при увеличении нагрузки индентирования величина сопротивления внедрению практически не изменяется.

Баллистические испытания образцов-свидетелей из HPBC и RBBC показали сопоставимые результаты. Безразмерный параметр задержки времени проникновения пули в керамику ($n_{пр}$) составил 20,5 в случае RBBC и 20,0 в случае HPBC.

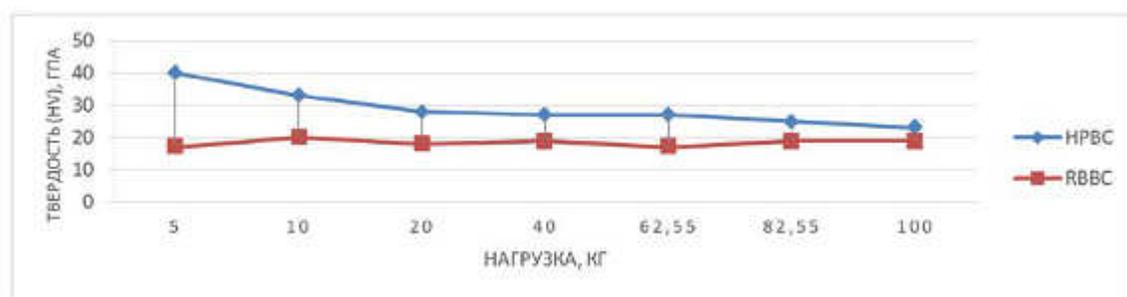
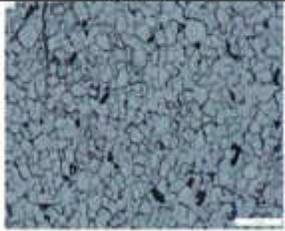
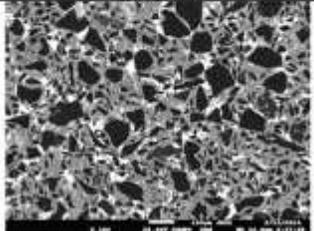


График изменения твердости (сопротивления внедрению) при различных нагрузках

Физико-механические свойства и микроструктура карбида бора, полученного методами горячего прессования и реакционного спекания

Физико-механические свойства	НРВС ТУ 3988-033- 23042805-2013	RVBC ТУ 3988 -026 -23042805-2012
Плотность, г/см ³	2,50-2,52	2,63-2,66
Микротвердость, ГПа	42-45	38-42
Прочность при 3х точечном изгибе, МПа	450-500	300-350
Прочность при кольцевом изгибе, МПа	190-220	200-220
Трещиностойкость, МПа*м ^{1/2}	2,5-3,5	3,0-4,0
Модуль упругости, ГПа	450-470	400-410
Микроструктура		

Выводы

1. Продемонстрирована возможность получения керамики из RVBC с баллистическими параметрами, аналогичными ($n_{пр}$) НРВС, при существенно большей простоте и экономичности технологии.
2. Показано почти двукратное падение величины сопротивления внедрению (твердости) при повышении нагрузок от 5 до 100 кг на образцах-свидетелях из НРВС при постоянстве данной характеристики, в исследуемом диапазоне образцов из RVBC, а также практическая близость материалов по этому показателю при наибольшей нагрузке.
3. Механизмы взаимодействия керамических элементов из RVBC и НРВС с твердыми ударниками при высоких нагрузках требуют дальнейшего изучения.

Литература

1. Синани А.Б. Об измерении твердости хрупких тел // Письма в Журнал технической физики. – 2003.– Т.29, вып.19.– С.48-51.
2. Беспалов И.А., Григорян В.А., Кобылкин И.Ф. Экспериментальное определение времени задержки проникания высокоскоростных ударников в керамическую броню // Вопросы оборонной техники.– 2011.– Серия 15, вып. 1-2.– С.34-38.
3. Овсиенко А.И., Дятлова Я.Г., Манина И.Н., Лужкова А.П., Осмаков А.С., Орданьян С.С., Румянцев В.И., Бойков С.Ю. Сравнение структуры свойств карбида бора, производимого в ООО «Вириал» // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: сб тез. докл. XX Междунар. науч.-техн. конф. – Обнинск, 2013.– С.225-227.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ СЛАБЕЙШЕГО ЗВЕНА ВЕЙБУЛЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ

Часовской Е. Н., Русин М. Ю., Келина И. Ю.

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Основным требованием к керамическим материалам, используемым для изготовления обтекателей, является сохранение достаточной прочности и надежности при высоких силовых и тепловых нагрузках, а также обеспечение необходимых технических характеристик на всех режимах эксплуатации. Для обеспечения этих требований необходимо обязательно учесть специфику керамических материалов, проявляющуюся в хрупком характере разрушения, масштабном факторе и разбросе прочностных свойств.

Предлагаемый подход основан на использовании для анализа прочности и надежности обтекателей из керамики модели слабейшего звена Вейбулла, которая учитывает конкретное распределение напряжений по объему обтекателя и разброс прочностных свойств материала. Масштабный фактор, присущий керамике, проявляется в том, что на величину предельных разрушающих напряжений оказывает влияние как объем, так и характер распределения растягивающих напряжений в обтекателе при различных схемах его нагружения. Отличаются также и прочностные свойства керамики, полученные при испытании образцов на трёхточечный изгиб для их разных размеров.

Поэтому с учетом специфики керамического материала и используя модель слабейшего звена Вэйбулла предлагается выбирать такую контрольную нагрузку при испытании обтекателей, при которой вероятность разрушения от контрольной нагрузки равна вероятности разрушения от действия эксплуатационной нагрузки, что позволяет получить формулу для определения максимального напряжения, соответствующего необходимому уровню контрольной нагрузки:

$$\sigma_k^{\max} = \sigma_s^{\max} (K_{H_s} / K_{H_k})^{1/m}, \quad (1)$$

где σ_s^{\max} – максимальное напряжение растяжения в обтекателе при действии эксплуатационных нагрузок; K_H – коэффициент нагруженности конкретного обтекателя растягивающими напряжениями по отношению их к максимальным значениям во всем обтекателе, он определяется расчетным путем для выбранной схемы нагружения для конкретного материала испытываемого обтекателя:

$$K_H = \left(I / \sum_{i=1}^N [\Delta V_i] \right) \sum_{i=1}^N \left[\frac{\sigma_i}{\sigma_i^{\max}} \right]^m \Delta V_i \text{ для всех } \sigma_i > \theta, \quad (2)$$

где ΔV_i – i -тый элементарный объем обтекателя из N возможных; – растягивающие напряжения в i -том элементе объема; m – модуль Вэйбулла; σ_i^{\max} – максимальное значение растягивающих напряжений среди всех элементов объема обтекателя для принятой схемы его нагружения.

Коэффициенты нагруженности K_n не зависят от абсолютной величины нагрузки, т.е. являются постоянными для выбранных схем нагружения обтекателя. Следовательно, определив расчетным или экспериментальным путем для выбранных схем нагружения обтекателя эксплуатационной и контрольной нагрузок коэффициенты нагруженности и зная величину максимального эксплуатационного напряжения σ_y^{\max} , по формуле (1) определяется максимальное напряжение при контрольной нагрузке σ_k^{\max} .

В качестве контрольной нагрузки для обтекателя предлагается использовать внутреннее избыточное давление. Причем существует простая линейная связь между максимальным значением напряжения в керамической оболочке и величиной давления:

$$\sigma^{\max} = \eta \cdot Q, \quad (3)$$

где η – коэффициент пропорциональности. Значение η зависит от размеров оболочки и толщины стенки, является константой для конкретного типа обтекателя и не зависит от величины давления. Определить η можно расчетным или экспериментальным путем, что позволяет получить требуемую величину давления для контрольного испытания:

$$Q = \frac{1}{\eta} \cdot \sigma_y^{\max} (K_n / K_{n_k})^{1/m}, \quad (4)$$

Предлагаемый способ назначения контрольной нагрузки и определение её величины упрощает требования к виду контрольных испытаний и не накладывает специальных ограничений на него. Вид испытания может выбираться любой, наиболее удобный для данного класса обтекателей, легко и точно реализуемый на практике. Если эта нагрузка является однопараметрической, например, внутреннее давление, то значение K_n не зависит от величины давления, является константой для конкретного обтекателя (а точнее для целой серии обтекателей данного типоразмера) и может вычисляться заранее. В этом случае максимальное напряжение при контрольной нагрузке однозначно определяет величину внутреннего давления при контрольных испытаниях данного типоразмера обтекателей, но с учетом модуля Вейбулла материала конкретного обтекателя. Вместе с тем, эксплуатационная нагрузка может быть и не однопараметрической, например, комбинация тепловых и силовых нагрузок, но точно известно распределение растягивающих напряжений по объему от их суммарного воздействия в обтекателе. Важно отметить, что в предлагаемом способе назначения контрольной нагрузки не используются прочностные свойства материала обтекателя, а только модуль Вейбулла материала, отражающий его масштабный фактор и разброс прочностных свойств.

В докладе приводятся также результаты расчета и данные натурных испытаний различных обтекателей. Сопоставляя величины разрушающих давлений и напряжений, полученных на основе предложенного подхода, с результатами натурального эксперимента, можно отметить их хорошее соответствие.

Таким образом, доказана применимость модели слабейшего звена Вейбулла для оценки прочностной надежности керамических обтекателей, подтверждена связь масштабного фактора и вероятностного характера прочностных свойств керамиче-

ских материалов обтекателей. Обоснована необходимость вероятностного подхода к способу назначения уровня контрольной нагрузки при испытании керамических обтекателей.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КЕРАМИКА НА ОСНОВЕ НИТРИДА БОРА ГЕКСАГОНАЛЬНОГО

Нечепуренко А. С., Гарипов О. Ф., Поженский С. В., Ласыченков Ю. Я.
АО «УНИХИМСОЗ», г. Екатеринбург, Россия

Керамика на основе нитрида бора гексагональной структуры в силу своих физических свойств (высокой температуры диссоциации, диэлектрических свойств, высокой теплопроводности, низкого коэффициента трения, способности поглощать тепловые нейтроны) и химических свойств (инертности к расплавам многих металлов и стекол, стойкости в кислотах, высокой температуры окисления) остается перспективным материалом для современной авиационной промышленности. Благодаря высоким диэлектрическим свойствам керамика из чистого нитрида бора может быть использована в качестве различных изоляторов при создании высокотемпературных аппаратов (установок), работающих при температуре выше 2000 °С и использующих графитовые трубчатые нагреватели или углерод-углеродные нагреватели.

Для получения изделий из чистого нитрида бора (без добавок, активирующих спекание) необходимо использовать нитрид бора с разупорядоченной «турбостратной» структурой (индекс графитации более 7), получаемый карбамидным способом.

В данной работе изучалось влияние условий получения «турбостратного» нитрида бора этим способом на процесс спекания изделий (заготовок) методом горячего прессования.

Для проведения исследований по получению изделий методом горячего прессования были синтезированы порошки нитрида бора «турбостратной» структуры: содержание оксида бора от 0,2 до 3,0 мас.%, индекс графитации 7-40, размер первичных кристаллитов 2-4 мкм. Микроструктура такого материала приведена на рис. 1.

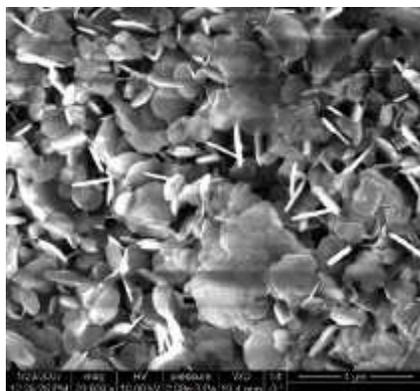


Рис. 1. Микроструктура турбостратного BN



Рис. 2. Цилиндры диаметром 142 мм из BN

Учитывая, что кислород, внедренный в решетку, обуславливает его дефектную структуру, получаемый «турбостратный» нитрид бора характеризовался содержанием кислорода от 3 до 9 мас.%. Высокое содержание кислорода в системе В-О-N обеспечивает активность к спеканию, но снижает высокотемпературную прочность и диэлектрические свойства горячепрессованной керамики за счет образования борного ангидрида в конечном изделии. Удаление борного ангидрида высокотемпературной термообработкой уже запрессованного материала малоэффективно.



Рис. 3. Изоляторы из нитрида бора



Рис. 4. Шпилька М16х2 из нитрида бора

Поэтому целью работы было подобрать оптимальные условия получения «турбостратного» нитрида бора, необходимого для прессования и спекания изделий (заготовок) из него с заданными свойствами без активирующих добавок, включая продукты пиролиза элементарноорганических соединений (ЭОС).

В результате исследований было установлено, что на качество полученного турбостратного нитрида бора оказывают влияние как условия (режимы) получения спека бор-кислород-азотного комплекса, так и режимы последующей термической обработки полученного спека.

Рассмотрен процесс приготовления спека при температурах до 400 °С в условиях «активной» и «пассивной» полимеризации расплава солей аммония. В случае «активной» полимеризации расплав перемешивался постоянно в течение всего перехода от жидкой фазы до образования спека БАК. В случае «пассивной» полимеризации расплав солей аммония не перемешивался. В результате исследований было установлено, что в процессе «активной» полимеризации содержание кислорода и индекс графитации в полученном спекатурбостратном нитриде были ниже, чем в нитриде бора, полученном из спека, синтезированного в «пассивном» режиме полимеризации. Это обуславливалось тем, что в процессе «активной» полимеризации выделяется большее количество аммиака и получаемый БАК содержит большее количество борного ангидрида. В свою очередь повышенное количество борного ангидрида в турбостратном нитриде бора приводит к снижению индекса графитации. Оптимальные свойства «Турбострата» получены при температуре 1350 °С.

Изучение процесса спекания заготовки (цилиндра диаметром 142 мм и высотой 78 мм) из нитрида бора проводили на прессе горячего прессования усилием 95 тонн

в пресс-форме из графита марки «НЛМ» при температуре до 1900 °С. Программное обеспечение позволяло регистрировать скорость усадки при постоянном давлении «online» на всех участках процесса формирования прессуемого тела.

В результате исследований установлено, что при одних и тех же режимах прессования (давлении 5-7 МПа) наилучшие показатели по удельной плотности горячепрессованных заготовок получались из турбостратного нитрида бора с индексом графитации 15-25 и содержанием борного ангидрида менее 0,2 мас.%, который синтезировался из спека «пассивной» полимеризации. В связи с отсутствием графита с высоким значением на растяжение удельное давление прессования не поднимали выше 8 МПа. Из полученных заготовок диаметром 142 мм и высотой 75 мм с плотностью 1,75 г/см³ (рис. 2) на токарном станке были изготовлены изделия в виде втулок (рис. 3) и шпилек размера М16×2 (рис. 4), что свидетельствует о высокой механической прочности. Электротехнические характеристики полученных изделий проходят испытания на предприятии Роскосмоса.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Мугла Д. Р., Галиновский А. Л., Хахалин А. В., Судник Л. В.
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», г. Москва, Россия

Для изготовления бронезащитных элементов индивидуальной защиты рассматривается перспектива использования композиционной конструкционной керамики (ККК) на основе оксида алюминия. Несмотря на высокие эксплуатационные параметры данного материала, до сих пор не существует эффективных средств его диагностики. Также стоит вопрос о повышении эксплуатационных характеристик бронезащитных элементов за счет использования наномодификаторов. Предварительные данные по использованию бемита в качестве наномодификатора показали перспективность данного подхода улучшения качества и эксплуатационных показателей ККК на основе оксида алюминия. В частности, установлено повышение прочности конечного материала на 10 %, как минимум, в сравнении с ККК без использования наномодификатора бемит.

В настоящее время на кафедре СМ-12 МГТУ им. Н. Э. Баумана изучается влияние различных наномодификаторов на характеристики оксидной керамики, в частности: галлуазита, углеродистых трубок, наноалмазов, бемита и др. Оценивается возможность повышения качества оксидной керамики за счет использования модификаторов, проводится сравнение их влияния на эксплуатационные характеристики, а также технико-экономические показатели использования.

С целью повышения эффективности этапов технологической подготовки производства для оценки динамических характеристик конструкционной керамики используется инженерная методика ультразвуковой диагностики. Способ включает в себя воздействие на торцевой участок контролируемого (диагностируемого) объекта жидкостной высоконапорной струи, например, воды, оценки результатов этого воздействия. К оценке результатов диагностики относится: относительный унос массы в

результате гидроэрозии и сравнение полученных результатов с исходными значениями массовых характеристик образцов с точностью до 0,001 грамма, а также форма и размеры гидрокаверны и сколов на керамических образцах. По разнице результатов этого воздействия судят о динамических характеристиках и физико-механических свойствах образца из конструкционной керамики. Перспективными направлениями исследования является изучение микроструктуры композитной конструкционной керамики с помощью компьютерной томографии, сравнение полученных данных с результатами УСД и данных микроскопии.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ПРИ СИНТЕЗЕ РЕАКЦИОННОСВЯЗАННОГО НИТРИДА КРЕМНИЯ НА ЕГО МИКРОСТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Георгиу И. Ф.^{1,2}, Лисаченко М. Г.¹, Забейайлов А. О.¹, Путляев В. И.²

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

² ФГБОУ «МГУ им. М. В. Ломоносова», г. Москва, Россия

В работе исследовано влияние состава газовой среды на микроструктуру нитрида кремния, получаемого в результате высокотемпературной реакции азотирования порошка кремния с добавкой NiO. Синтез проводился в вакуумной печи в различной газовой атмосфере: N_2 ; N_2+H_2 ; N_2+He ; N_2+He+H_2 . Для анализа микроструктурных свойств определены значения плотности, пористости, исследованы поверхности шлифов образцов с помощью оптической и электронной микроскопии. Определены значения прочности на изгиб в зависимости от состава газовой среды и посредством фрактографического анализа установлены типичные дефекты (рис. 1), инициирующие разрушение керамического материала.

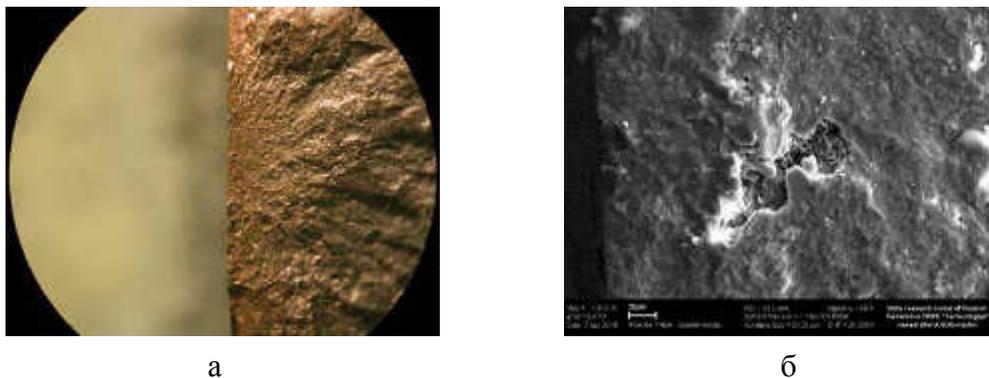


Рис. 1. Характерный дефект, инициирующий разрушение в реакционносвязанном нитриде кремния при увеличении 50 (а) и 1000X (б)

В ходе работы установлено, что значения плотности, пористости и прочности для образцов, полученных в различных газовых средах, отличаются незначительно. Для всех образцов, кроме синтезированного в чистом N_2 , обнаружены крупные ($d_{cp} \approx 200-300$ мкм) микроструктурные неоднородности в объеме материала, кото-

рые представляют собой сферы, имеющие рыхлую структуру. Согласно результатам фрактографического анализа, основным дефектом, инициирующим разрушение, является пора (полость). Таким образом, для получения однородной нитридокремниевой керамики использование чистого азота без добавок водорода и гелия наиболее предпочтительно.

Литература

1. Lindley M.W., Elias D.P., Jones B.F., Pitman K.C. The influence of hydrogen in the nitriding gas on the strength, structure and composition of reaction-sintered silicon nitride // J. Mater. Sci.– 1979.– V.14.– P.70-85.

2. Park Y.J., Kim H.D., Halloran J.W. Permeability enhancement in porous-sintered reaction-bonded silicon nitrides // Int. J. Appl. Ceram. Technol.– 2011.– V.8.– P.809-814.

3. Alem A., Drew R., Pugh M. The influence of the nitriding parameters on the microstructure and strength of the open-cell reaction bonded silicon nitride foams fabricated via wet processing // J. Mater. Sci.– 2014.– V.49.– P.4780-4789.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КАРБОНИТРИДОКРЕМНИЕВОЙ КЕРАМИКИ, САМОАРМИРУЕМОЙ ВОЛОКНИСТЫМИ НАНОСТРУКТУРНЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ

Рыжова О. Г.¹, Стороженко П. А.¹, Тимофеев И. А.², Жукова С. В.¹, Драчев А. И.¹, Кузнецова М. Г.¹, Тимофеев П. А.², Кузнецова Т. М.¹

¹ АО «ГНИИХТЭОС», г. Москва, Россия;

² ОАО «Композит», г. Москва, Россия

Эффективным способом улучшения характеристик керамоматричных композитов, полученных по РИР технологии, является модификация керамической матрицы, формируемой в процессе пиролиза олигометилэлеметосилазанов (ОМЭС). Разработанные в АО «ГНИИХТЭОС» ОМЭС обеспечивают формирование в инертной среде квазикристаллической карбонитридокремниевой керамики в интервале температур 850-600 °С.

В представленной работе рассматриваются два способа формирования керамики: а) пиролизом ОМЭС с фрагментами Si-N-Э, где Э = В, Ti, Zr, Ta, Hf; б) пиролизом олигометилсилазанов, наполненных нанопорошками бора и карбидов, боридов, нитридов тугоплавких металлов в различных соотношениях. Определены условия образования керамики, самоармируемой волокнистыми наноструктурными образованиями (ВНСО).

В первом способе ОМЭС синтезировали взаимодействием олигометилсилазанов с алкиламидными соединениями тугоплавких металлов - $M[N(C_2H_5)_2]_4$, где М= Ti, Zr, Ta, Hf. Олигоорганоборсилазаны получали взаимодействием олигометилсилазанов с амминбораном. Показано, что природа гетероэлемента в ОМЭС определяет особенности процесса самоорганизации ВНСО в керамике, а именно условия образования, морфологию поверхности, элементный состав, размер ВНСО. ОМЭС, содержащие ВНСО, характеризуются повышенным выходом неорганического остатка как после-

пиролиза до 1100 °С, так и на каждом этапе потери массы при повышении температуры в интервале 100-1500 °С. Характер термических превращений ОМЭС приводит к образованию ВНСО в керамике Ti- ОМС при 850 °С, а в керамике Ta-ОМС и Zr-ОМС, Hf-ОМС - при температуре 1350 °С. Причем в последнем случае образуются наноразмерные ВНСО.

Введение наноразмерных наполнителей в олигометилсилазаны (второй способ) сопровождается повышением их реологических характеристик. Причем заданная вязкость наполненной композиции достигается путем корректировки одновременно четырех параметров: температуры, концентрации, природы и полидисперсности нанонаполнителя. Увеличение жизнеспособности нанонаполненных композиций происходит при снижении полидисперсности состава нанонаполнителя, за счет увеличения доли наноразмерной фракции. Природа и количество нанонаполнителя определяют морфологию поверхности керамики, полученной пиролизом нанонаполненных композиций, её элементный состав, а также условия самоорганизации ВНСО.

Так, введение в олигометилсилазан наноразмерного наполнителя, состоящего из смеси В, SiC, Si₃N₄, ZrB₂, снижает потерю массы керамики при термообработке при 1350 °С в инертной среде в три раза по сравнению с ненаполненным олигометилсилазаном. Установлена взаимосвязь повышения термической стабильности керамики с процессом самоармирования её объема ВНСО в виде нанотрубок. Однако проведение термообработки керамики в аналогичных условиях при изменении состава нанонаполнителя приводит к формированию нанотрубок на поверхности керамики, что не сопровождается термостабилизацией массы керамики.

Исследования олигометилсилазанов и ОМЭС проводили методами: ТГА, ДТА; спектроскопии ЯМР 29Si, 1H, 11B; ИК-спектроскопии. Морфологию поверхности, элементный состав керамики исследовали методами РФА, РСА, SEM и рентгеновского микроанализа.

Возможность формирования в процессе пиролиза ОМЭС нитридокремниевой керамики, самоармируемой ВНСО, открывает широкие перспективы для создания керамоматричных композиционных материалов с принципиально новыми свойствами, а именно с высокой термической стабильностью, повышенной трещиностойкостью и высокими физико-механическими характеристиками.

НЕЛИНЕЙНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ МОНОЛИТНОЙ КЕРАМИКИ И КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ЕГО ОСНОВЕ

Каримбаев Т. Д.

ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», г. Москва, Россия

Тугоплавкость конструкционной керамики привлекает внимание специалистов в области авиационных двигателей. Проведено большое число исследований с целью освоить высокие рабочие температуры в турбинах применением керамического материала. Хрупкость керамики и непредсказуемость возможных разрушений оказались практически непреодолимым препятствием при их использовании в силовых конструкциях.

Керамические композиционные материалы обладают повышенной по сравнению с монокристаллической керамикой вязкостью разрушения, но их матрица – это та же «непредсказуемая» керамика.

В работе предполагается, что конструкционная керамика содержит множество случайно распределенных ультрамелких пор, статистически выраженный трехпараметрическим законом Вейбулла для распределения напряжений. Развитие пор в поле напряжений принято в виде степенного закона. На базе этих предположений построено уравнение

$$\varepsilon_1 - (1-p)\sigma_0 / \Delta^*(p) = [(1-p)\sigma_u / \Delta^*(p)] \{ (V_0/V) \ln[1-(p-p_0)/(1-p_0)] \}^{1/x},$$

связывающее уровень главных деформаций ε_1 с текущей пористостью p . Здесь $\Delta^*(p)$ – переменный параметр упругости, σ_0 , σ_u и x параметры, V_0/V – масштабный фактор в трехпараметрическом распределении Вейбулла; p_0 – начальная пористость и q – показатель степени в уравнении баланса пор.

Решение нелинейного уравнения при достигнутой ε_1 определяет текущую пористость p и соответствующий переменный параметр упругости $\Delta^*(p)$. Обобщенный закон Гука для упругопористой среды позволяет установить соответствующее значение напряжений ε и получить точку на кривой $\sigma \sim \varepsilon_1$. Таким образом, для всех допустимых деформаций построены кривые зависимости гидростатического давления s от средней деформации ε и интенсивности напряжений s_1 от интенсивности деформаций ε_1 , отражающие, в том числе, этап «медленного» роста статистически распределенных повреждений.

Для трансверсально-изотропного керамического композиционного материала с керамической матрицей с переменными параметрами упругости построены все пять определяющих кривых статического деформирования $\sigma_{11} \sim \varepsilon_{11}$, $\sigma_{11} \sim \varepsilon_{22}$, $\sigma_{22} \sim \varepsilon_{22}$, $\sigma_{22} \sim \varepsilon_{33}$ и $\sigma_{12} \sim \varepsilon_{12}$.

Проведен анализ опубликованных экспериментальных кривых деформирования керамических композиционных материалов и выполнены их сравнения с аналитически полученными в работе результатами.

ПРЯМОЙ СИНТЕЗ ИЗДЕЛИЙ В РЕЖИМЕ СВС ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФТОРФЛОГОПИТА

Лорян В. Э., Качин А. Р.

ФГБУН ИСМАН РАН, г. Черноголовка, Россия

В производстве цветных металлов при температурах около 1000 °С успешно работают материалы на основе фторфлогопита - $\text{KMg}_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]\text{F}_2$, которые получают путем пирогенного синтеза кристаллизацией их из расплавов, а также путём гидротермального синтеза с последующей механической обработкой рабочей поверхности [1, 2]. Материалы обладают достаточно высокой химической и термической стойкостью [2, 3], изделия из них успешно работают в среде агрессивных движущихся расплавов цветных металлов (алюминия, цинка...). Порошок синтетической слюды

применяется как диэлектрический уплотняющий материал в турбинах двигателей самолётов [3].

В фторфлогопитах возможна гомо- и гетеровалентная замена иона K^+ на ионы щелочных и щелочно-земельных металлов (Na^+ , Li^+ , Rb^+ , Ca^{2+} , Cs^+ , Sr^{2+} , Ba^{2+}) [4]. Сорбционные свойства модифицированных алюмосиликатов [5] совместно с возможностью получения в зоне горения плавнелитых и пористых конечных продуктов [6] открывают таким материалам возможность применения в проблеме иммобилизации ядерных отходов.

В настоящей работе установлено, что, изменяя соотношение реагентов исходной смеси, можно управлять технологическими характеристиками процесса, такими как температура синтеза, скорость горения. Это позволяет управлять агрегатным состоянием целевого продукта в волне горения и получать как пористый, так и плавнелитой материал.

Синтезированный продукт представляет собой многофазный материал на основе моноклинных натриевых фторфлогопитов $NaMg_3AlSi_3O_{10}F_2$ и $Na_4Mg_6Al_4Si_4O_{20}F_4$ (рис. 1).

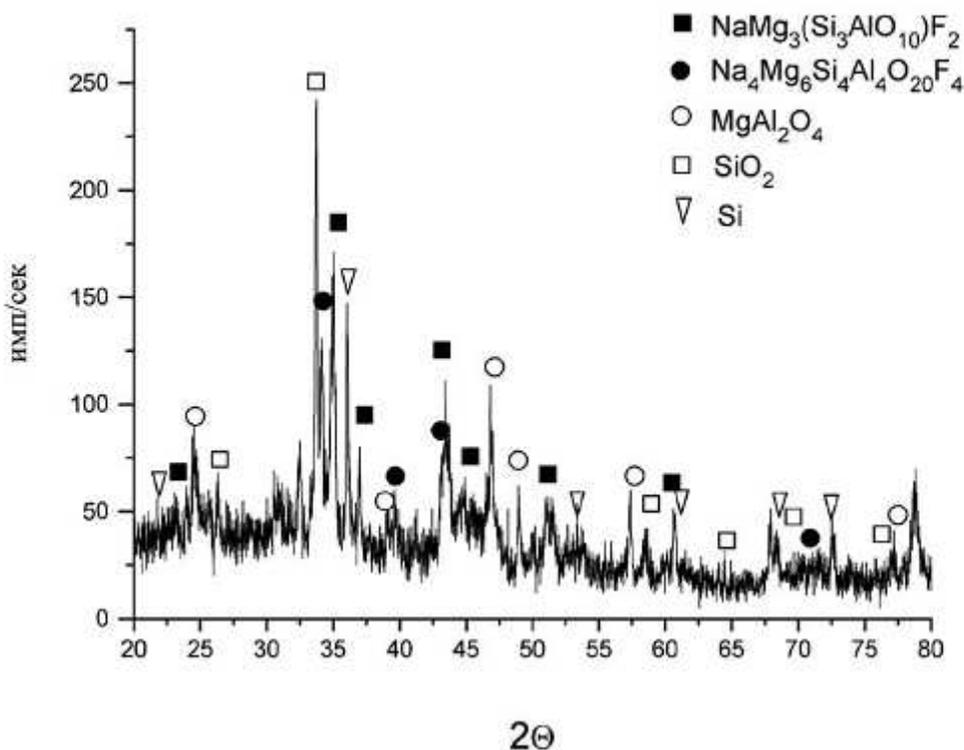


Рис. 1. Рентгенограмма синтезированного материала



Рис. 2. Изделия из синтезированного материала, геометрия которых сформирована в процессе синтеза

Литература

1. Путилин Ю. М., Белякова Ю. А. и др. Синтез минералов.– М.: Недра, 1987.– Т.2.– 255с.
2. Гордиенко П. С., Шабалин И. А., Ярусова С. Б. Способ получения сорбента цезия. Патент RU 2516639 С2 // Бюл. изобрет., 2014. № 14.
3. Липовский И. Е., Дорофеев В. А. Основы петрургии.– М.: Metallurgy, 1972.
4. Тресвятский С. Г., Пархоменко М. А., Кондратенко А. Д. Исследования в области получения микрокристаллических материалов слюдоподобной структуры // Неорганические материалы.– 1965.– Т.1, № 4.– С.449-459.
5. Гордиенко П. С., Ярусова С. Б., Шабалин И. А., Сомова С. Н. Сорбция ионов Cs⁺ из морской воды наноструктурированным алюмосиликатным сорбентом.– IV Международная конференция по химической технологии.– Ереван, 2015.– С.31-34.
6. Лорян В. Э., Качин А. Р., Боровинская И. П. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) фторфлогопитов и композиционных материалов на их основе с применением шунгита, кварцевого песка и отходов алюминиевого производства в качестве компонентов исходных смесей // Современные проблемы химической физики: сб. тез. докл.– Ереван, 2012.– С.242-243.

КЕРАМИКА В СИСТЕМЕ $\text{Li}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{TiO}_2$ С ДОБАВКОЙ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА

Макаров Н. А., Вершинин Д. И., Крыльцов И. С.

ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д. И. Менделеева», г. Москва, Россия

В настоящее время в связи с интенсивным развитием Wi-Fi и мобильной связи значительно увеличилось количество широко используемых микроволновых приборов таких, как фильтры, резонаторы и ряд иных электронных компонентов. Поскольку современные электронные приборы имеют тенденцию к миниатюризации и портативности, необходимо, чтобы электронные компоненты были также миниатюрными и высококачественными.

Технология низкотемпературного обжига керамики (LTCC) позволяет миниатюризировать многослойные компоненты, используя в качестве высокопроводящего металлического электрода серебро. Кроме того, помимо необходимости обеспечить микроволновые диэлектрические свойства, керамика, полученная методом LTCC технологии, должна иметь температуру спекания, которая не превышает температуру плавления серебра, составляющую 961 °С. Несмотря на то, что существует ряд материалов с высокими микроволновыми диэлектрическими свойствами, они не могут быть получены методом LTCC технологии, поскольку имеют температуру спекания, значительно превышающую указанную [1]. Таким образом, целью работы является синтез материала с более низкой температурой спекания при сохранении необходимого уровня электрофизических свойств: диэлектрическая проницаемость ϵ не ниже 20 и фактор диэлектрической добротности $Q \times f$, где Q – величина, обратная тангенсу угла диэлектрических потерь, а f – частота, на которой проведено измерение, 60000 – 70000 ГГц [1-2].

Известны три способа снижения температуры спекания керамических материалов: повышение дисперсности припекающихся частиц, повышение дефектности кристаллической решетки и использование добавок, которые, с одной стороны, способны повышать дефектность кристаллической решетки, а, с другой, образуют жидкую фазу при спекании, преимущественно эвтектического состава [3]. Наиболее эффективным, с точки зрения авторов, является третий способ.

В качестве спекающей добавки использовали состав, отвечающий одной из эвтектических точек в системе $\text{Li}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{B}_2\text{O}_3$. В данном исследовании, как первом этапе работ по предложенной тематике, рассмотрено влияние температуры обжига на величину средней плотности и открытой пористости керамики, а также определены диэлектрические свойства.

В качестве исходных материалов для синтеза материала в системе $\text{Li}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{TiO}_2$ использовали Li_2CO_3 , ZnO и TiO_2 квалификации не ниже «чда». Стехиометрические количества исходных компонентов в соответствии с выбранным химическим оксидным составом, с учетом их потерь при прокаливании, измельчали в шаровой мельнице в течение 8 ч в ацетоне корундовыми шарами. Суспензию высушивали в конвективной сушилке при комнатной температуре, порошок впоследствии дважды протирали через сито с размером ячеек 0,5 мм. После сушки и гомогенизации, смесь прокаливали при температуре 900 °С с выдержкой при этой температуре в течение 2 ч.

Порошок модификатора в системе $\text{Li}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{V}_2\text{O}_3$ получали методом плавления и последующей закалки. Исходными материалами для синтеза добавки служили Li_2CO_3 , ZnO и V_2O_3 квалификации не ниже «чда». Стехиометрические количества исходных компонентов в соответствии с выбранным составом, с учетом потерь при прокаливании, измельчали в шаровой мельнице в течение 8 ч в ацетоне корундовыми шарами. Суспензию высушивали в конвективной сушилке при комнатной температуре, порошок впоследствии дважды протирали через сито с размером ячеек 0,5 мм. После сушки и гомогенизации, смесь подвергали плавлению в корундовых тиглях при температуре 1000 °С с выдержкой при этой температуре в течение 1 ч. Расплав выливали из тиглей в сосуд с проточной водой. Впоследствии материал измельчали в планетарной мельнице в дистиллированной воде шарами из диоксида циркония. После измельчения порошок высушивали при температуре 85 °С и дважды протирали через сито с размером ячеек 0,5 мм.

В работе использовали составы, содержащие модификатор в количествах 1,5 и 3,0 мас. %. Материал в системе $\text{Li}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{TiO}_2$ смешивали с добавкой в шаровой мельнице в среде ацетона в течение 8 ч. После сушки и гомогенизации смесь дважды протирали через сито с размером ячеек 0,5 мм.

В качестве временной технологической связки для прессования использовали 5 мас. % раствор поливинилового спирта. После грануляции порошка, из него прессовали образцы в виде балочек размером 40х6х4 мм методом двустороннего прессования при давлении 100 МПа. Впоследствии образцы обжигали при температурах 800 – 950 °С с шагом 50 °С в печи с нагревателями из карбида кремния в воздушной среде. Выдержка при конечной температуре обжига составила 2 ч.

Результаты исследований показывают, что, независимо от вводимого количества добавки, с ростом температуры обжига средняя плотность керамики увеличивается, в то время как открытая пористость – уменьшается. Содержания добавки в 1,5 мас. % недостаточно для сколько-нибудь серьезного уплотнения во всем исследованном температурном интервале. В то же время введение модификатора в количестве 3,0 мас. % позволяет уже при температуре 900 °С добиться относительной плотности на уровне 95 %, в то время как при температуре обжига 950 °С – 97 %. Последний результат признан наиболее удовлетворительным.

В дальнейшем образцы состава, содержащего 3 мас. % модификатора, формовали в виде таблеток Ø22х5 мм и обжигали при температуре 950 °С. После нанесения на поверхность обожженных образцов металлизации определяли электрофизические свойства. Полученные результаты показывают, что для разработанного материала $\epsilon = 20,8$ и $Q \times f = 62000$ ГГц. Несколько заниженные значения диэлектрической проницаемости, а также фактора диэлектрической добротности могут быть связаны, с одной стороны, с остаточной пористостью, а, с другой, с наличием стеклофазы в материале.

В будущем необходимо детально исследовать влияние добавки $\text{Li}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{V}_2\text{O}_3$ на кинетику спекания и диэлектрические свойства материала на основе системы $\text{Li}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{TiO}_2$ с целью достижения свойств, отвечающих целям, поставленным в работе.

Литература

1. Sumesh G., Mailadil T.S. Microwave dielectric properties of novel temperature stable high Q $\text{Li}_2\text{Mg}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Ti}_3\text{O}_8$ and $\text{Li}_2\text{A}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ti}_3\text{O}_8$ ($A = \text{Mg}, \text{Zn}$) ceramics // J. Europ. Ceram. Soc. 2010. V. 30. P. 2585 – 2592.

2. Sayyadi-Shahraki A., Taheri-Nassaj E., Hassanzadeh-Tabrizi S.A., Barzegar-Bafrooei H. Microwave dielectric properties and chemical compatibility with silver electrode of Li_2CO_3 ceramics with $\text{Li}_2\text{O} - \text{ZnO} - \text{B}_2\text{O}_3$ glass additive // Physica B. 2015. V. 457. P. 57 – 61.

3. Макаров Н. А. Керамика на основе Al_2O_3 и системы $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$, модифицированная добавками эвтектических составов: дис. ... д.т.н. М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2011. 394 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Иванов Н. З.¹, Неповинных В. И.², Думанский А. М.^{2,3}

¹ ФГБОУ «МГТУ им. Н. Э. Баумана», г. Москва, Россия;

² АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

³ ФГБУН ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

Одним из важнейших элементов конструкций летательных аппаратов являются головные антенные обтекатели, которые в значительной степени определяют аэродинамические характеристики и точность наведения на цель. К ним предъявляют типичные для ЛА требования минимальной массы при обеспечении достаточного запаса прочности и надежности. Задачей обтекателя является обеспечение защиты радио-

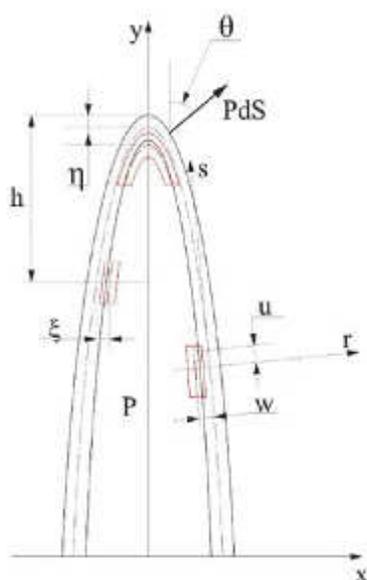


Рис. 1. Расчетная схема обтекателя

технической аппаратуры от действующих тепловых и аэродинамических нагрузок. С развитием авиационной и ракетной техники происходит постоянное увеличение скоростей и маневренности ЛА, что приводит к увеличению аэродинамических нагрузок и температуры на поверхности материала. Для поддержания работоспособности конструкций при минимуме массы требуется уменьшение коэффициентов запаса прочности изделий. Предъявляются более жесткие условия к материалам, технологии изготовления, персоналу, а также требуется развитие методов неразрушающего контроля. Последнее позволяет решить проблемы контроля и дает возможность наиболее полно оценить пригодность изделия для дальнейшего использования. В связи с вышесказанным данная тема является актуальной.

Объектами данного исследования являются обтекатели ЛА из стеклопластика. Для серии обтекателей были проведены эксперименты. Исследуемый образец устанавливается на стенд для испытаний и герметизируется, затем с помощью вакуумного насоса создается разрежение, обеспечивающее требуемую разность давлений. Изображение формируется посредством вращения изделия вместе со столом на малые углы с получением снимков (более 2000), таким образом получая набор проекций образца со всех сторон. Измерения проводились на высоте 200 и 250 мм от носка – в опасной зоне, при воздействии перепада давления на стенке 0,4 и 0,8 кгс/см². Учитывая схему нагружения изделий, можно представить обтекатель в виде тонкостенной оболочки с приложенной к ней разницей давлений (рис.1). Записав уравнение Лапласа и уравнение равновесия отсеченной части обтекателя, можно перейти к записи напряжений и деформаций:

$$\frac{\sigma_m}{R_1} + \frac{\sigma_t}{R_2} = \frac{p(y)}{\delta}; -\sigma_m \delta * 2 \pi R_2 + \iint_s p \cos \theta ds = 0; \quad (1)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E} - \nu \frac{\sigma_t}{E} = \frac{pR_2}{2E\delta} \left(1 - 2\nu \left(\frac{R_2}{2R_1} \right) \right); \quad (2)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} - \nu \frac{\sigma_m}{E} = \frac{pR_2}{E\delta} \left(1 - \frac{R_2}{2R_1} - \frac{\nu}{2} \right). \quad (3)$$

Радиальное перемещение можно выразить через окружную деформацию (3):

$$\xi = \varepsilon_t R_2 \sin \theta = \frac{pR_2^2 \sin \theta}{E\delta} \left(1 - \frac{R_2}{2R_1} - \frac{\nu}{2} \right). \quad (4)$$

Выразив модуль упругости, получим формулу для расчета по радиальному перемещению:

$$E = \frac{pR_2^2 \sin \theta}{\xi \delta} \left(1 - \frac{R_2}{2R_1} - \frac{\nu}{2} \right). \quad (5)$$

На первом этапе реализации работы были приняты допущения и проведен расчет на основе вручную измеренных параметров, что вносит существенные погрешности. Экспериментальные данные, математическая модель и ее параметры были использованы для расчета в системе Wolfram Mathematica, и был вычислен эффективный модуль упругости для каждого случая. Полученные результаты для наглядности были занесены в таблицу. Анализируя их, можно проследить увеличение значений эффективного модуля упругости E от сечения 200 к 250 мм. Кроме того, происходит небольшое снижение E при увеличении разности давлений в два раза.

Рассчитанные значения эффективных модулей упругости

№	Эффективный модуль упругости E, ГПа			
	P = 0,4 кгс/см ²		P = 0,8 кгс/см ²	
	200 мм	250 мм	200 мм	250 мм
1	10.897	13.495	9.884	10.001
2	9.156	9.386	10.173	10.214
3	7.737	9.152	5.802	8.079
4	7.692	10.004	7.380	7.779

Экспериментально полученные данные представляют собой черно-белые изображения, в которых степень черноты каждого пикселя характеризует плотность материала в данной точке. Так как сечение изделия не может иметь форму идеальной окружности, и толщина стенки не постоянна, не представляется возможным выполнить измерения параметров сечения без использования специального программного обеспечения. Изображения – томограммы представляются в виде матрицы, в которой номера столбцов и строк представляют собой координаты точки в декартовом пространстве, а значения элементов матрицы определяют плотность материала по шкале градаций серого в диапазоне от 0 до 255. На основе вышесказанного было разработано программное обеспечение, в задачи которого входит автоматическое выделение и распознавание сечений, нахождение центров внутренних и внешних контуров как фигур произвольной формы, вычисление их геометрических параметров с заданным шагом и степенью точности. Таким образом, полученные результаты позволяют сделать выводы о работоспособности конструкции в целом и прогнозировать возможную потерю устойчивости и ее характер.

ПОЛУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИ И РАДИОПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ ИЗ АЛЮМОМАГНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ

*Балабанов С. С.¹, Беляев А. В.¹, Быков Ю. В.², Егоров С. В.², Еремеев А. Г.²,
Новикова А. В.¹, Паршин В. В.², Пермин Д. А.¹, Сорокин А. А.²*

¹ ФГБУН ИХВВ им. Г. Г. Девярых РАН, г. Н. Новгород, Россия;

² ФГБУН ИПФ РАН, г. Н. Новгород, Россия

Интерес к получению оптически и радиопрозрачной керамики алюмомагниево-шпинели ($MgAl_2O_4$) обусловлен уникальным сочетанием её характеристик: высоких значений твердости и теплопроводности, химической устойчивости, низкой удельной плотности и малых диэлектрических потерь. $MgAl_2O_4$ - керамика обладает прозрачностью в ультрафиолетовой, видимой, ближней инфракрасной и миллиметровой областях спектра, и в ряде устройств может быть использована как экономически эффективная замена дорогостоящих материалов – поликристаллического алмаза или лейкосапфира.

В работе представлены результаты исследования двух подходов к получению керамики $MgAl_2O_4$ – спеканием при нагреве излучением миллиметрового диапазона и горячим прессованием. Отсутствие нагревательных элементов в СВЧ-печи обеспечивает спекание в чистых вакуумных условиях и позволяет получать керамику с минимальными диэлектрическими потерями. Горячее прессование обеспечивает дополнительную движущую силу уплотнения и позволяет достигать прозрачности в оптическом диапазоне спектра. Однако способ горячего прессования требует введения спекающей добавки – фторида лития, которая может оказывать негативное влияние на диэлектрические характеристики материала.

В качестве прекурсора для синтеза порошка $MgAl_2O_4$, использовали изопропилат магния-алюминия ($MgAl_2(O^iPr)_8$), синтез которого проводили прямым взаимодействием сплава магния-алюминия с изопропиловым спиртом. Очистку алкоксида проводили методом вакуумной дистилляции. Порошки алюмомагниевого шпинели были получены гидролизом двойного изопропилата магния-алюминия азеотропной смесью изопропиловый спирт-вода с последующей кальцинацией на воздухе при $750\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 часов. Спекающие добавки вводили путём совместного размолла в бисерной мельнице в абсолютированном изопропиловом спирте шарами из диоксида циркония. Высушенный порошок предварительно компактировали одноосным прессованием.

СВЧ-спекание компактов $MgAl_2O_4$ проводилось в рабочей камере гиротронного комплекса, работающего в непрерывном режиме генерации на частоте 24 ГГц с автоматически регулируемой микроволновой мощностью до 6 кВт. Образцы помещались в центр изготовленного из плавленного кварца тигля диаметром 100 мм, высотой 100 мм и засыпались для теплоизоляции гранулированным Al_2O_3 порошком. Тигель с образцом располагался в средней части рабочей камеры комплекса (характерный размер камеры $L \approx 50 \lambda_{\text{э.м.}}$, где $\lambda_{\text{э.м.}}$ – длина волны излучения). Температура образца измерялась неизолированной термопарой В-типа (Pt30 %Rh / Pt6%Rh), головка которой касалась нижней его поверхности. На начальной стадии спекания с целью дополнительного удаления органических примесей и адсорбированной влаги образцы нагревались до $800\text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью 10 К/мин в воздушной атмосфере и выдерживались при этой температуре в течение 20 минут. После этого рабочая камера откачивалась, и дальнейший нагрев происходил при остаточном давлении воздуха порядка 5 Па. В экспериментах варьировались: скорость нагрева от 10 до 800 К/мин, максимальная температура от 1750 до 1800 $^\circ\text{C}$ и время выдержки при максимальной температуре от 0 до 1 часа. После завершения заданного температурно-временного режима нагрева микроволновая мощность автоматически отключалась, и образцы, расположенные в теплоизоляции, остывали со скоростью порядка 100 К/мин.

В экспериментах по СВЧ-спеканию была получена высокоплотная керамика, средний размер зерна в которой изменялся от 4 до нескольких десятков микрометров в зависимости от режима СВЧ-нагрева (скорости нагрева, температуры спекания и времени изотермической выдержки). Установлено, что спекающая добавка – оксид иттрия – в концентрации 1 % масс. позволяет получать высокоплотную ($\rho = 99,9\%$ от теоретической) $MgAl_2O_4$ керамику с высокими механическими свойствами и диэлектрическими характеристиками (тангенс угла потерь $\text{tg}\delta = 7,7 \cdot 10^{-4}$ в диапазоне 206–252 ГГц).

Горячее прессование $MgAl_2O_4$ проводили при температуре 1600 °С, скорости нагрева 7,5 К/мин и давлении в камере 100 Па на установке собственной конструкции. Давление к порошкам начинали прикладывать после достижения температуры 800 °С и довели до 20 МПа в течение 30 мин. Охлаждение керамики проводили со скоростью 15 К/мин. без приложения давления. Пресс-форма с внутренним диаметром 20 мм была изготовлена из графита, компакт дополнительно изолировался прокладками из терморасширенного графита.

Керамика, полученная горячим прессованием порошка, содержащего 0,5 мас. % LiF, имела средний размер зерна, равный 25 мкм, твердость $Hv_{0,5} = 14,0 \pm 0,5$ ГПа, характерную область прозрачности от 0,2 до 6,0 мкм с уровнем линейного пропускания до 80 % на длине волны 1 мкм при толщине образца 1,5 мм.

Таким образом, керамика, полученная СВЧ-спеканием, характеризуется малой величиной диэлектрических потерь и может быть использована, в частности, для изготовления окон вывода излучения в мощных вакуумных приборах миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Керамика, полученная горячим прессованием, обладает прозрачностью в оптическом и ближнем ИК диапазонах спектра и может быть использована в качестве мультиспектральных защитных окон в технике специального назначения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-03-04299.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ АЛЮМОМАГНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ГОРЯЧИМ ОДНООСНЫМ ПРЕССОВАНИЕМ НАНОПОРОШКОВ

Гольева Е. В.^{1,2}, Михайлов М. Д.², Дунаев А. А.², Игнатенков Б. А.², Соколов И. А.¹

¹ ФГАОУ ВО «СПБПУ», г. Санкт-Петербург, Россия;

² АО «НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время высокоплотная, прозрачная в широком спектральном диапазоне керамика алюмомагниево-шпинели ($AMШ$, $MgAl_2O_4$) рассматривается как перспективный оптический материал для решения задач прикладной оптики, в частности, создания брони, обтекателей ракет, защитных окон, линз летательных аппаратов и др. [1]. Перспективность широкого спектра ее применений обусловлена сочетанием высоких оптических, механических, термических свойств. Вызывает значительный интерес использование керамики $AMШ$ для создания искусственных драгоценных камней.

Современная технология оптической керамики состоит из следующих стадий: синтеза слабоагломерированных нанопорошков, их компактирования и спекания. Для повышения твердости, трещиностойкости, а также светопропускания конечного продукта при заданном фазовом составе необходимо получать керамику с субмикронным масштабом структуры, высокой однородностью, минимальной пористостью и с хорошо сформированными межкристаллитными границами. Процесс

получения оптической керамики АМШ в значительной степени зависит от свойств исходных порошков (их структуры, химической и фазовой чистоты, морфологии поверхности, распределения частиц по размерам) и представляет собой актуальную и вместе с тем сложную научно-техническую задачу, над решением которой работают многие исследователи [1-3]. Использование нанопорошков в технологии прозрачной керамики способствует улучшению их спекаемости и уплотнения, а также значительно повышает механические и оптические свойства керамических материалов.

Целью настоящей работы являлся синтез и исследование нанокристаллических порошков АМШ и керамики на их основе.

Ранее в работах [4,5] нами рассматривались различные методы синтеза и свойства нанопорошков АМШ ($MgAl_2O_4$). Было установлено, что перспективными для изготовления оптической керамики являются порошки, синтезированные методом гидролиза двойного изопрропилата Mg-Al [6] и модифицированным методом Печини [7].

В данной работе проведено исследование зависимости свойств исходных порошков и керамики АМШ от температурно-временных режимов синтеза нанопорошков. Нанокристаллические порошки были синтезированы двумя вышеуказанными методами [6,7]. В методе гидролиза двойного изопрропилата Mg-Al в качестве исходного соединения использовалась смесь гидроксидов Mg-Al (ООО «НН Оптика»), которую подвергали термической обработке при разной скорости нагрева, температуре и времени. При синтезе порошков модифицированным методом Печини использовалась двухэтапная термическая обработка (сначала прокаливается полимер, затем порошок в расплаве инертной соли), при этом варьировались температура и время первичного и вторичного прокаливания.

Были исследованы следующие характеристики синтезированных нанопорошков: морфология поверхности с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), распределение частиц по размерам методом лазерной дифракции, удельная поверхность, фазовый состав. Для получения керамических (поликристаллических) образцов АМШ применялся метод горячего одноосного прессования. Предварительно в порошок путем совместного диспергирования вводили спекающую добавку – LiF в количестве 1 масс. %. Были изготовлены образцы керамики АМШ диаметром 16, 20 и 36 мм и толщиной до 2 мм. Для керамических образцов проведены измерения плотности, микротвердости, рентгенофазовый анализ, исследования микроструктуры, а также получены спектры пропускания в диапазоне длин волн от 300 до 6000 нм.

Исходя из влияния температуры, времени и скорости нагрева на оптические свойства керамики АМШ, были определены оптимальные условия синтеза исходных нанопорошков: $T = 1100$ °С, 4 часа, режим нагрева – быстрый.

При оптимальных условиях синтеза нанокристаллических порошков $MgAl_2O_4$ получены образцы керамики (рис. 1 а, б) с микротвердостью, равной $15,8 \pm 0,6$ ГПа. Плотность данных образцов соответствует плотности монокристалла с точностью до погрешности измерения.

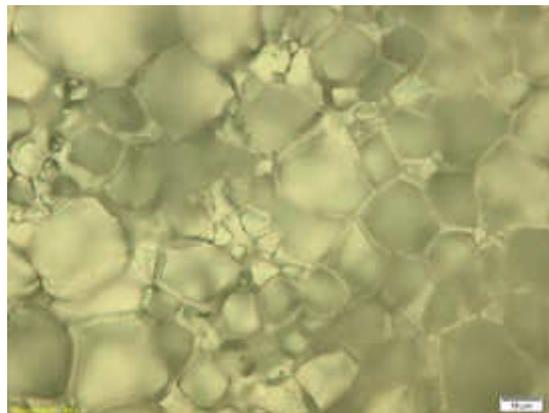
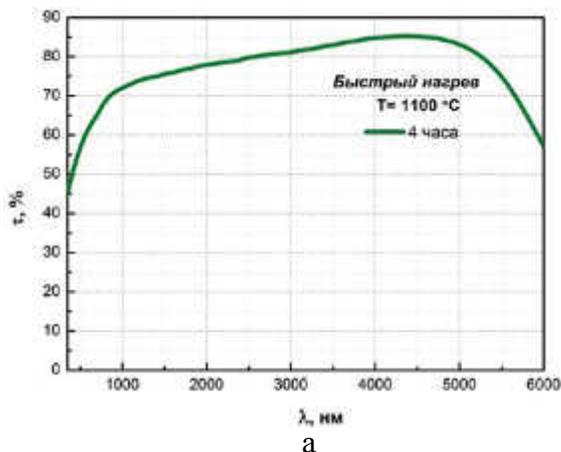


Рис. 1. Спектр пропускания (а),
и микроструктура (б) керамического образца АМШ, полученного
при оптимальных условиях синтеза исходных порошков

Измерения характеристик образцов проведены с использованием оборудования ресурсных центров СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Инновационные технологии композитных материалов», а также кафедры «Физико-химия и технологии микросистемной техники» СПбПУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы «УМНИК».

Литература

1. Kim W. et al. Overview of transparent optical ceramics for high-energy lasers at NRL // Applied optics.– 2015.– V.54, № 31.– P. F210-F221.
2. Ganesh I. A review on magnesium aluminate ($MgAl_2O_4$) spinel: synthesis, processing and applications // International Materials Reviews.– 2013.– V.58, № 2.– P. 63-112.
3. Balabanov S. S. et al. Fabrication of transparent $MgAl_2O_4$ ceramics by hot-pressing of sol-gel-derived nanopowders // Ceramics International.– 2015. – V.41, № 10.– P.13366-13371.
4. Толстикова Д.В и др. Синтез и исследование нанокристаллических порошков для оптической керамики из алюмомагниевого шпинели // Оптический журнал. – 2014.– Т.81, № 12.– С.69-73.
5. Гольева Е.В. и др. Влияние условий синтеза и структуры исходных нанокристаллических порошков на оптические свойства прозрачной керамики $MgAl_2O_4$ // Оптический журнал.– 2016.– Т.83, №. 2.– С. 67-72.
6. Дроботенко В.В., Гавришук Е. М. Способ получения двойного изопрропилата магния-алюминия. Патент России № 2471763.– 2011.
7. Kolesnikov I. E. et al. Structural and luminescence properties of $MgAl_2O_4: Eu^{3+}$ nanopowders // Journal of Alloys and Compounds.– 2016.– Т.654.– С. 32-38.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ – НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ

Томчани О. В.¹, Кашкарова Е. М.¹, Шугаев М. В.¹, Зайцев И. М.¹, Улановский А. А.²

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

² ООО «Обнинская Термоэлектрическая компания», г. Обнинск, Россия

Качественный теплоизоляционный материал (ТИМ), обладающий низкой теплопроводностью, как правило, состоит из минимального количества твердой фазы и максимального количества газообразной, что усложняет задачу создания таких материалов с высокими прочностными показателями (конструкционных) и, соответственно, высокоточных по геометрическим характеристикам изделий из них.

На протяжении нескольких десятилетий АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» выпускает волокнистые высокотемпературные конструкционные теплоизоляционные материалы марок ТЗМК и ТЗМ-23М по технологии вакуумного формования в виде простейших форм - плит и блоков. Максимальная температура эксплуатации этих материалов - 1100 °С, теплопроводность при температуре помещения - 0,055 Вт/м·К. В последние годы на предприятии разработан еще один конструкционный теплоизоляционный материал ТИМ-МП-К с более низкой теплопроводностью (0,028 Вт/м·К при температуре помещения), работоспособный до 1000 °С.

Благодаря хорошим прочностным показателям и новому современному оборудованию по механической обработке вышеперечисленные конструкционные высокотемпературные материалы находят все большее применение в виде высокоточных изделий для теплоизоляции различных конструкций и оборудования. Выпуск изделий из теплоизоляционных материалов экономически оправдан - это возможность выпуска наукоемкой, высокотехнологичной продукции, требующей наличия новейшего оборудования и высококвалифицированного персонала.

В настоящей работе представлены изделия из волокнистых конструкционных теплоизоляционных материалов, которые в последние годы изготавливаются в АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина»:

– комплекты теплоизоляционных деталей для защиты модулей памяти бортовых накопителей полетной информации различных марок, выпускаемых АО «НПО «Прибор», г. С-Петербург. Детали изготавливаются из цилиндрических заготовок материала ТЗМ-23М или ТЗМК-10М путем механической обработки на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре MINIMILL2. Изделия для накопителя полетной информации ЗБН-1-3 поставлены в серийное производство, с 2012 года изготовлено около 1000 комплектов теплоизоляционных деталей (рис. 1);

– теплоизоляционные детали для аппаратов газодинамического напыления металлов, выпускаемых ООО «Обнинский центр порошкового напыления» и используемых при проведении широчайшего спектра авторемонтных работ, исправлении дефектов литья и литьевых форм, герметизации, нанесении защитных покрытий, реставрационных работах, восстановлении электропроводящих покрытий и многих

других областях, где требуется деликатное исправление дефектов небольших локальных участков, которые нельзя подвергать нагреву (рис. 2);

– комплекты деталей из ТИМ для функциональных узлов различных испытательных установок и стендов. Среди них - элементы теплоизоляции для различных установок теплопрочностных наземных испытаний летательных аппаратов в АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» и других российских предприятиях (рис. 3а, б);

– комплекты деталей теплоизоляции для оборудования атомной промышленности, в частности, для технологических аппаратов переработки отработанного ядерного топлива.

Новый разработанный конструкционный теплоизоляционный материал ТИМ-МП-К со сверхнизкой теплопроводностью успешно испытан в качестве теплоизоляции в:

– газоанализаторах взрывчатых веществ, выпускаемых ЗАО «Химприбор», г. Тула;

– теплозащитных контейнерах, разрабатываемых ООО «Обнинская Термоэлектрическая компания» и предназначенных для защиты электронного регистратора температуры в промышленных печах при регистрации температурных полей промышленных печей (рис. 3 в).

Комплексный подход к изготовлению высокотемпературных конструкционных теплоизоляционных материалов с низкой теплопроводностью и высокоточных изделий из них позволяет быть востребованными и конкурентоспособными на рынке этого вида продукции для авиационной, атомной, приборной и других высокотехнологичных отраслей промышленности.



Рис. 1. Изделия из конструкционных теплоизоляционных материалов ТЗМ-23М и ТЗМК-10М для АО НПО «Прибор», г. Санкт-Петербург

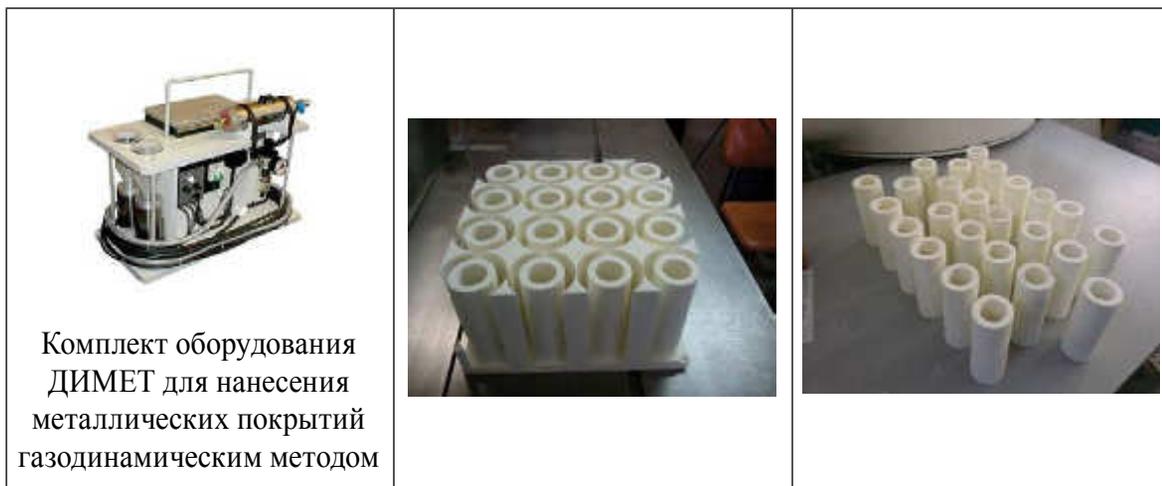


Рис. 2. Изделия из конструкционного теплоизоляционного материала ТЗМ-23М для ООО «ОЦНП», г. Обнинск

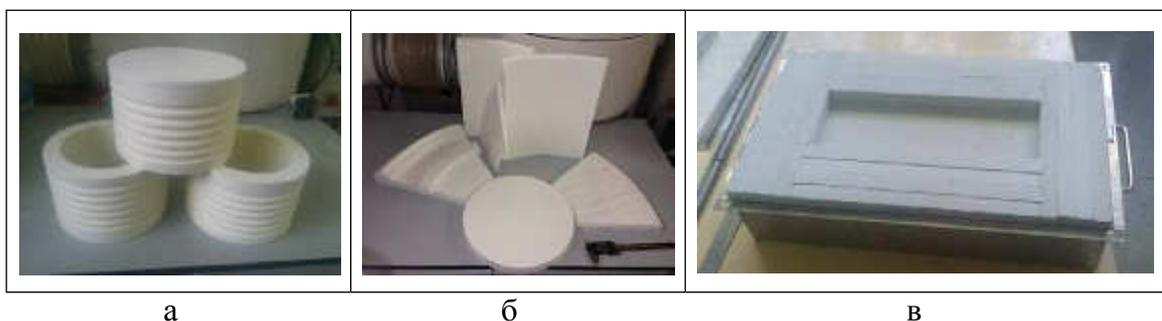


Рис. 3. Изделия из конструкционного теплоизоляционного материала ТЗМ-23М для различных испытательных установок

ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, ВЫПУСКАЕМЫЕ НА ООО «ЗТК»

Куфтырев Р. Ю., Бешенков П. С.

ООО «Завод технической керамики», г. Апрелевка, Россия

В современной технике в связи с созданием электронных приборов с большой потребляемой мощностью, высокой степенью надёжности и скоростью функционирования важной задачей является отвод теплоты, уменьшающей надёжность и срок службы электронных приборов. Эту задачу помогает решить использование теплопроводных материалов с хорошими диэлектрическими свойствами. Существуют несколько материалов, способных удовлетворить этим требованиям: керамика из оксида бериллия (BeO), нитрида бора (BN), нитрида алюминия (AlN) и поликристаллический алмаз. Производство керамики из окиси бериллия дорогостояще и высокотоксично, но ещё сложнее получить полиалмаз. Для получения плотной ке-

рамики из BN требуется применение малопроизводительного оборудования. Таким образом, керамика на основе AlN является прекрасным кандидатом в качестве материала для новой электроники, т.к. сочетает в себе ценные свойства, имеет нетоксичную природу, не является дефицитным материалом, а, кроме того, может быть получена высокопроизводительными методами. Керамика из AlN обладает набором ценных свойств, таких как высокая теплопроводность, низкая относительная диэлектрическая постоянная, низкий тангенс угла диэлектрических потерь, ТКЛР, близкий к кремнию, высокая механическая прочность и хорошая химическая стабильность.

На нашем предприятии освоен выпуск изделий из нитрида алюминия под маркой «НИТАЛ-95», полученных методом одноосного прессования. Этот метод является высокопроизводительным и позволяет получать изделия со сложным контуром, сквозными отверстиями и с различной толщиной. Кроме того, отработана технология получения высоких тонкостенных втулок.

Также разработан и внедрён в производство материал под маркой «АНБ-30». Это композиционный материал в системе AlN-BN, получаемый горячим прессованием. Композит нитрид алюминия – гексагональный нитрид бора сочетает в себе ценные свойства входящих в его состав компонентов, а именно: относительно высокую теплопроводность, высокое электросопротивление, хорошие диэлектрические характеристики и высокую коррозионную стойкость. Причём данный материал обрабатывается обычным токарным инструментом, что позволяет обойтись без использования дорогостоящей шлифовки алмазными кругами.

Материалы «НИТАЛ-95» и «АНБ-30» благодаря своим характеристикам находят применение в различных областях промышленности: в электронной технике – для деталей, требующих отвода большого количества тепла и имеющих высокое электросопротивление; в силовой электронике – для деталей, требующих высокочастотных свойств (низкие значения диэлектрической постоянной и диэлектрических потерь); в радиоэлектронике – для получения радиопрозрачных деталей; в вакуумной технике – для создания различных огнеупорных деталей и тиглей для вакуумного осаждения; в приборостроении – для создания теплоотводов, изоляторов и защитных трубок для специальных печей, деталей и огнеприпаса с низким ТКЛР и в других областях в качестве конструкционного материала. Кроме того, благодаря хорошей механической обрабатываемости «АНБ-30» существует возможность создания деталей сложной формы с высокой степенью точности, что имеет большое значение в электронике.

На «ЗТК» освоена технология получения ещё одного композиционного материала на основе AlN под маркой «АН-35Ж». Это композиционный керамико-металлический материал в системе AlN-Fe, получаемый прессованием с последующим спеканием без приложения давления. Помимо хорошей теплопроводности и механической прочности он обладает способностью поглощать электромагнитную энергию, что делает этот материал востребованным в качестве объемного поглотителя СВЧ-энергии. Он может быть применён для изготовления аттенуаторов и оконечных нагрузок в различного рода измерительных устройствах для анализа структуры и мощности выходного сигнала электронных СВЧ-приборов, а также

для изготовления эквивалента антенн в радиоаппаратуре летательных аппаратов. Кермет «АН-35Ж» является наиболее эффективным и перспективным поглощающим СВЧ-энергию материалом в качестве окончных сухих нагрузок высокого уровня мощности (до 10000 Вт).

ТЕХНОЛОГИЯ И МЕТОДЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Просовский О. Ф.¹, Гвоздев А. Б.¹, Исамов А. Н.¹, Просовский Ю. О.²

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

² ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н. Э. Баумана», г. Москва, Россия

В области физики тонких пленок, в ракурсе их применения в качестве многослойных тонкопленочных оптических покрытий, особым образом стоят пленки металлов. Свойства тонких металлических пленок сочетают в себе свойства тонких пленок диэлектрических веществ – обладают оптической прозрачностью, а распространение световой волны через них хорошо описывается уравнениями Максвелла. В отличие от пленок диэлектриков пленки металлов обладают значительным коэффициентом поглощения. Этот факт играет положительную роль при создании многофункциональных оптических покрытий. Для успешной работы в области создания и производства метало-диэлектрических покрытий технологю необходимо обладать знаниями и опытом работы в области математического моделирования оптических конструкций, опытом практического определения оптических констант получаемых покрытий диэлектрических тонких пленок и прозрачных пленок металлов, располагать особыми технологическими методиками и подходами для нанесения металлических слоев. Большое значение должно уделяться напылительной технике, которая применяется для создания метало-диэлектрических покрытий.

Исследования и производство покрытий проводились на установке электронно-лучевого и термического испарения. В качестве откачной системы использован криогенный насос. Для технологического контроля применены две оптические системы и кварцевый датчик. Одна система оптического контроля толщины покрытий построена по принципу широкополосного мониторинга неподвижного образца-спутника в центре камеры. Вторая система – по принципу пролетного мониторинга толщины наносимого покрытия непосредственно на поверхности изделия. Кварцевый датчик использовался для регулирования и стабилизации постоянной скорости испаряемых веществ и для контроля толщины напыляемых покрытий при проведении исследовательских напылений для определения оптических констант пленкообразующих веществ.

Для достижения высокой воспроизводимости результатов от процесса к процессу использовался метод ионного ассистирования напыляемых пленок диэлектрических веществ. Проведены исследования целесообразности применения ионного ассистирования для процесса напыления пленок металлов.

Обладая мощным технологическим инструментом и аппаратом математического моделирования и ре-анализа оптических конструкций был разработан ряд методов для практической реализации многослойных металлodieлектрических конструкций. Особую сложность создавал химический процесс сорбции кислорода с предыдущих слоев пленок оксидов веществ и окисление пленок металла в начальный момент напыления слоя оксида вещества. Разработан метод для определения оптических констант тонких металлических пленок.

Результатом проведенных исследований стала разработка и практическое изготовление «обратного» нейтрального светофильтра, особенностью которого является минимизация отражения с обратной стороны подложки, на которую наносится покрытие. Такой подход позволил получить изделие с повышенными эксплуатационными свойствами.

НОВЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $(\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2)-\text{SiB}_4$ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ СПЛАВОВ

Солнцев С. С., Денисова В. С., Розененкова В. А.
ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия

В конструкции деталей камеры сгорания современных газотурбинных двигателей (ГТД) используются современные жаропрочные свариваемые никелевые сплавы типа ВЖ 171, работоспособные при температурах до 1250 °С. К жаропрочным сплавам для камер сгорания предъявляются повышенные требования, так как увеличение температуры сгорания топлива позволяет повысить комплекс технических характеристик ГТД и улучшить экологию окружающей среды за счет снижения эмиссии.

При длительной эксплуатации теплонагруженных деталей из жаропрочных никелевых сплавов необходима их защита от высокотемпературной газовой коррозии, которая является основным фактором, способствующим разрушению сплавов и повреждению поверхности деталей в процессе эксплуатации.

С целью защиты деталей камер сгорания ГТД разработаны и широко внедрены жаростойкие эмалевые покрытия, которые регламентируют окисление сплавов и являются барьером на пути агрессивных сред. Формирование жаростойких эмалевых покрытий проводят при температуре на 200-300 °С выше рабочей. Серийные жаростойкие эмали типа ЭВК работоспособны при температуре до 1000 °С, что уже не отвечает требованиям современного авиастроения. Для защиты современных жаропрочных свариваемых никелевых сплавов для деталей камеры сгорания ГТД необходима разработка новых жаростойких эмалевых покрытий с повышенной рабочей температурой. При создании таких покрытий необходимо решить ряд задач, одна из которых – необходимость снижения температуры обжига, так как обжиг при температурах от 1400 °С и выше не рекомендуется ввиду коробления и разупрочнения тонкостенных деталей из сталей и никелевых сплавов при столь высоких температурах.

Целью работ, проводимых в ФГУП «ВИАМ», является исследование возможности получения жаростойких эмалевых покрытий путём реакционного отверждения составов в системе $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Разработка жаростойких реакционноотверждаемых покрытий позволяет решить проблему коробления и деформации деталей авиационных двигателей при сверхвысоких температурах обжига. Общую тугоплавкость покрытия обеспечивает использование стеклофритт в системе $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, а введение неоксидных тугоплавких соединений, прежде всего, боридов, позволяет снизить температуру обжига эмалей.

Экспериментально установлено, что введение боридов кремния в состав жаростойких эмалевых покрытий позволяет получить эмали с температурой формирования, меньшей или равной рабочей температуре. При обжиге покрытий протекает комплекс сложных физико-химических процессов, и в результате разрыва кремнекислородных связей в стекле и химических реакций боридов образуется сложная структура с сохранением связи кремний-бор. Особенности структуры реакционноотверждаемых покрытий обусловлены их уникальными свойствами. Показаны особенности структуры жаростойких реакционноотверждаемых покрытий методом сканирующей электронной микроскопии. Методами ДТА и СТА показано, что свойства реакционноотверждаемых покрытий отличаются от свойств, присущих эмалевым покрытиям на основе тугоплавких стёкол. Определена жаростойкость реакционноотверждаемых покрытий при 1200 и 1250 °С и установлено, что покрытия данного класса могут быть рекомендованы для защиты жаропрочных никелевых сплавов авиационного назначения при температурах до 1250 °С.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА СТЕКЛА НА УГОЛ СМАЧИВАНИЯ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

Тарновский Р. В.¹, Дитц А. А.²

¹ ФГАОУ ВО «ТПУ», г. Томск, Россия;

² Институт физики высоких технологий ТПУ, г. Томск, Россия

Введение

Одним из востребованных сегментов рынка в соответствии с мировыми тенденциями развития является электроника и электротехника (керамические элементы для электронной промышленности, в том числе для теплонагруженных элементов полупроводниковых приборов, мощных светодиодов; изоляторы различного применения для электротехники и энергетики). Одним из перспективных направлений является производство высокотеплопроводных материалов и изделий на основе нитрида алюминия. Нитрид алюминия обладает рядом уникальных свойств по сравнению с другими материалами, применяемыми в микроэлектронике [1]. Применение нитрида алюминия в качестве основы при изготовлении мощных светодиодов требует нанесения на него токопроводящих паст. Разработанные в большом количестве проводниковые низкотемпературные серебрясодержащие пасты рассчитаны на оксидные материалы и поэтому имеют низкую адгезию к нитриду. Увеличить адгезию металлизационных

паст к нитриду алюминия можно за счет введения в их состав стеклосвязки [2], которая бы хорошо смачивала нитрид алюминия при низких температурах.

Цель данной работы: разработать состав стеклосвязки, смачивающий нитрид алюминия при температурах до 1000 °С.

Эксперимент

В работе были использованы образцы в виде дисков из нитрида алюминия, подверженные шлифованию и очистке. Для определения угла смачивания была собрана установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

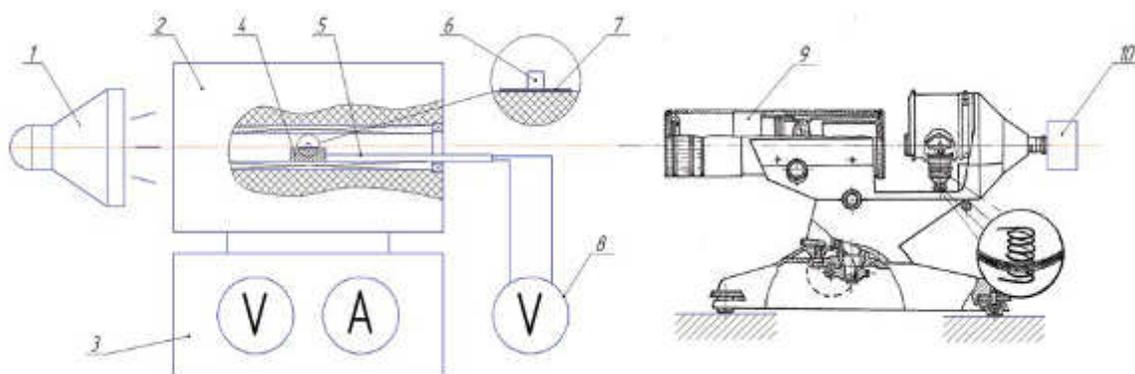


Рис. 1. Принципиальная схема установки

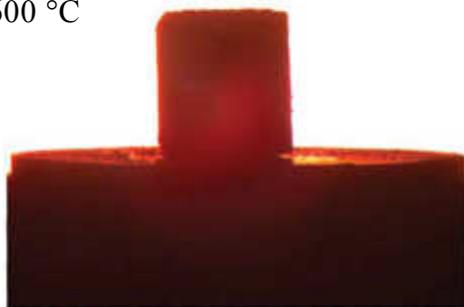
Установка состоит из: 1 – осветительной системы; 2 – трубчатой печи с регулируемой скоростью нагрева; 3 – системы контроля и управления нагревом; 4 – подставки для образцов; 5, 8 – термопары для контроля температуры образца; 6 – образца стекла; 7 – подложки (диска) из AlN; 9 – оптической системы; 10 – цифровой камеры с выводом изображения на дисплей компьютера.

Для работы были выбраны составы стёкол в системе B_2O_3 - SiO_2 - Na_2O , обеспечивающие низкие температуры варки и размягчения.

Стёкла выбранных составов варились, измельчались и прессовались в виде цилиндров диаметром 3 мм, высотой 5-6 мм. После установки образца в печи ее начинали греть со скоростью от 7 до 10 °С/мин. При достижении температуры 600 °С образец начинали фотографировать через каждые 10 °С. Обработку снимков вели в программном обеспечении, поставляемом с цифровой камерой «Микро-Анализ Про».

На рис. 2 представлены фотографии образца при разной температуре.

600 °С



860 °С



Рис. 2. Фотографии образца стекла состава «г» при температурах 600 и 860 °С

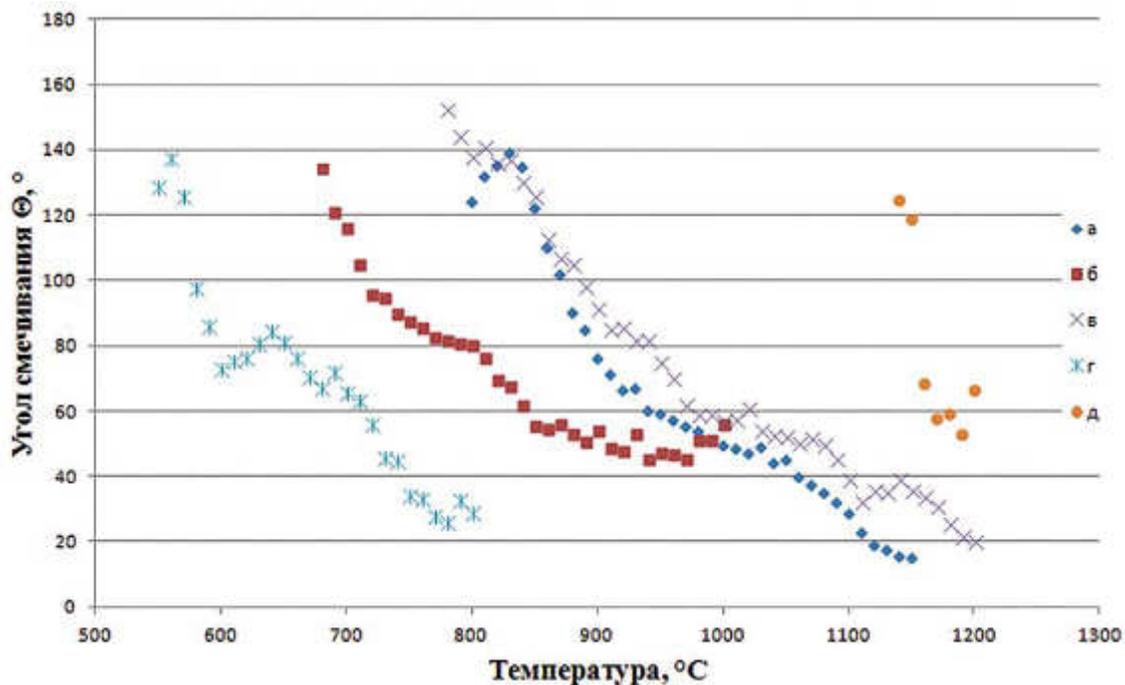


Рис. 3. Зависимость угла смачивания нитрида алюминия от температуры

На рис. 3 представлены графики зависимостей угла смачивания шлифованных образцов нитрида алюминия от температуры. Можно заметить, что эти зависимости имеют схожий характер. Сначала наблюдается максимум, когда капля приобретает шарообразную форму, затем капля начинает растекаться и угол смачивания уменьшается. Далее наблюдается перегиб, связанный со вспениванием стекла: сначала объём капли увеличивается, затем стекло начинает осветляться и пена оседает. Далее угол смачивания стремится к нулю.

Выводы

Как видно из опытных данных, представленных на рис. 3, при наименьших температурах нитрид алюминия начинают смачивать стёкла составов «г» и «б», содержащие свинец и ванадий, соответственно. Эти стёкла могут подойти для металлизационных паст на основе серебра, вжигаемых при температурах 800–920 °C. Стекло состава «д», начинает смачивать нитрид алюминия лишь при температурах порядка 1150 °C и в перспективе, возможно, может быть использовано в молибден-марганцевых металлизационных пастах, вжигаемых при температурах 1200–1300 °C.

Литература

1. Косолапов А.А., Дитц А.А., Ревва И.Б., В.М. Погребенков В.М. Высоко-теплопроводные материалы, полученные методом прессования.– Томск: ТПУ, 2015.– 5 с.
2. Макаров Н.А. Металлизация керамики: учебное пособие.– М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева.– 2004.– 76 с.
3. Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания.– М.: Химия, 1976.– 232 с.

АДАПТАЦИЯ АВИАЦИОННЫХ ДИСПЛЕЕВ К НАШЛЕМНЫМ ОЧКАМ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Кучерявый С.С.

ООО «Фотооптик», г. Обнинск, Россия

Исследовалась возможность адаптации ЖК-дисплеев к нашлемным очкам ночного видения с помощью установки в узел подсветки тонкого гибкого светофильтра (ИК адаптера). В качестве ИК-адаптера использовалась прозрачная полимерная пленка толщиной 30 мкм с нанесенным на нее оптическим многослойным интерференционным покрытием, блокирующим излучение в диапазоне спектра (660-950) нм.

Гибкая тонкая подложка из полимерной пленки обладает рядом преимуществ по сравнению со стеклянной. Она эластична, имеет высокую прочность, способна сохранять механические свойства в широком интервале температур (от -60 до +80 °С) и устойчива к ВВФ.

В качестве объектов адаптации выбраны промышленный модуль TX13D200VM5BAA фирмы КОЕ (диаг. 5") и бытовой дисплей фирмы «Rekam» (диаг. 8"). Эти дисплеи имеют схожую конструкцию узла подсветки, представленную на рис. 1.

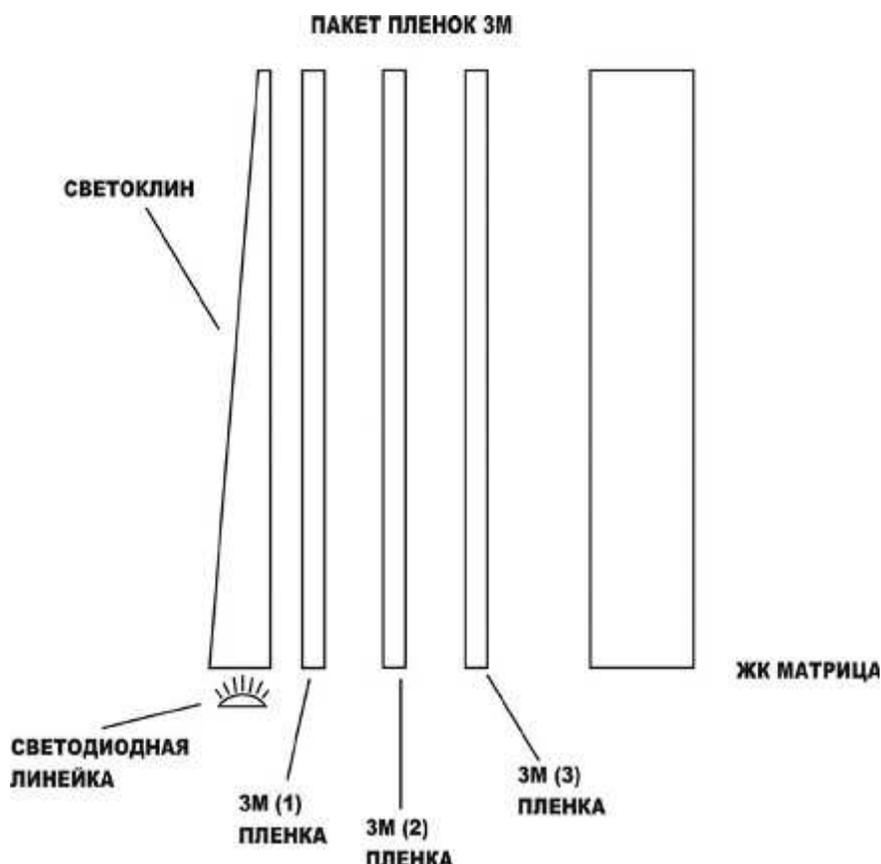


Рис 1. Схема ЖК-модуля TX13D200VM5BAA фирмы КОЕ

Установка в узел подсвета ЖК-модуля ИК-адаптера из полимерной пленки толщиной 30 мкм не требует внесения изменений в существующую конструкцию корпуса. Разборка модуля на составные части – корпус, светодиодную линейку, светоклин, блок пленок 3М и ЖК матрицу, установку дополнительного светофильтра ИК-адаптера и сборку адаптированного модуля не представляет особой сложности и требуют только аккуратности и чистого помещения.

Исследованы светотехнические характеристики (коэффициент адаптации КА, координаты цветности x, y) для всех возможных вариантов размещения ИК-адаптера в узлах подсвета в режимах белого, красного и зеленого свечения ЖК-модулей.

Выбран оптимальный по светотехническим характеристикам (КА, x, y) вариант размещения дополнительного светофильтра ИК-адаптера в узле подсвета, обеспечивающий минимальный коэффициент адаптации, соответствующий ГОСТу и сохранение цвета свечения ЖК-дисплея, в том числе при больших углах наблюдения.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ. НЕДОСТАТКИ МАТРИЧНОГО МЕТОДА АБЕЛЕ И МОДЕЛЕЙ МГУ. АДМИТТАНСНЫЙ МЕТОД

Мишина Е. Н.

ООО «Фотооптик», г. Обнинск, Россия

Многослойные оптические покрытия находят самое разнообразное применение в современной оптоэлектронике в качестве многослойных зеркал, поглотителей, поляризаторов и т.д. Высокое качество этих сложных изделий обеспечивают современные вакуумные установки, полностью автоматизированные, позволяющие с высокой точностью и воспроизводимостью осаждать в нужной последовательности тонкие диэлектрические и металлические слои.

Многослойное оптическое покрытие состоит из тонких пленок, расположенных между двумя однородными средами (рис. 1).

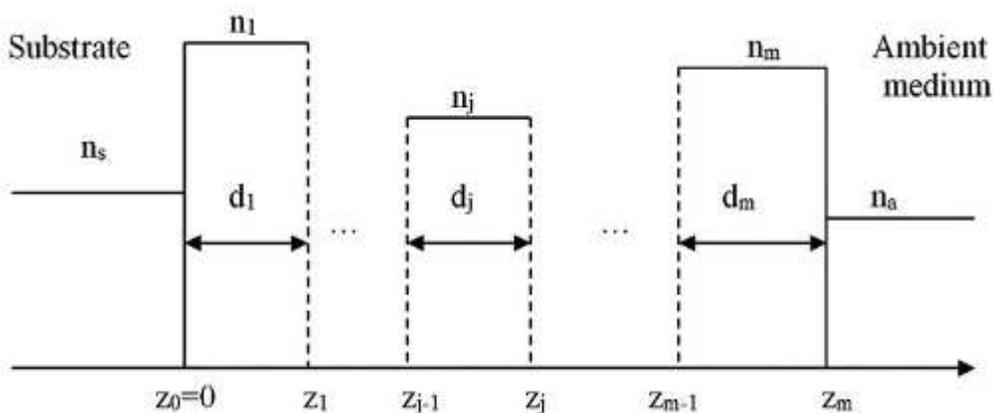


Рис. 1. Модель многослойного покрытия

Наиболее общей и распространенной схемой расчета оптических свойств многослойных оптических покрытий является классический матричный метод Абеле (ММА) [1]. Согласно ММА для каждого слоя можно рассчитать характеристическую матрицу:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \varphi_j & (i/n_j) \sin \varphi_j \\ in_j \sin \varphi_j & \cos \varphi_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\varphi_j = (2\pi/\lambda)n_j d_j$ - фазовые толщины слоев.

Характеристическая матрица многослойного покрытия представляет собой произведение характеристических матриц всех слоев:

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_m. \quad (2)$$

Амплитудные коэффициенты отражения и пропускания многослойного покрытия определяются по формулам:

$$r = \frac{n_a m_{11} - n_s m_{22} + n_a n_s m_{12} - m_{21}}{n_a m_{11} + n_s m_{22} + n_a n_s m_{12} + m_{21}}, \quad t = \frac{2n_a}{n_a m_{11} + n_s m_{22} + n_a n_s m_{12} + m_{21}}. \quad (3)$$

Наш опыт изготовления многослойных оптических покрытий показал, что ММА эффективен для диэлектрических покрытий, но не дает хороших результатов при расчете металлодиэлектрических покрытий (МДП), т.к. значения показателя преломления металлов в МДП в реальной технологии определить достаточно сложно [2].

В настоящей работе предложен новый подход к расчету МДП из тонких слоев диоксида кремния (SiO_2) и нихрома (NiCr) – адмиттансный метод. Рассмотрим, как на примере двух технологических партий Е-235 и Е-236 предложенный метод был реализован в производстве.

На первом этапе (для партии Е-235) толщины слоев в покрытии рассчитывались с помощью программы TFCalc [3]. Для нихрома использовался приближенный комплексный показатель преломления, найденный с помощью программы OptiRe [4].

В результате расчетов получили конструкцию из 6-ти слоев (рис.2), которая была напылена в вакуумной установке BALZERS BA1401. Видим, что измеренное отражение полученного покрытия велико (рис. 3).

На втором этапе (для партии Е-236) толщины слоев в покрытии модифицируются методом, основанным на измерении входного адмиттанса МДП. Для коррекции толщин с целью уменьшения отражения использовались диаграммные методы, описанные в [5].

Рассмотрим точку Е на рис. 4 – измеренное значение адмиттанса покрытия Е-235, соответствующее $\lambda=550$ нм, и попытаемся снизить отражение в этой точке до $R=0,1$ %.

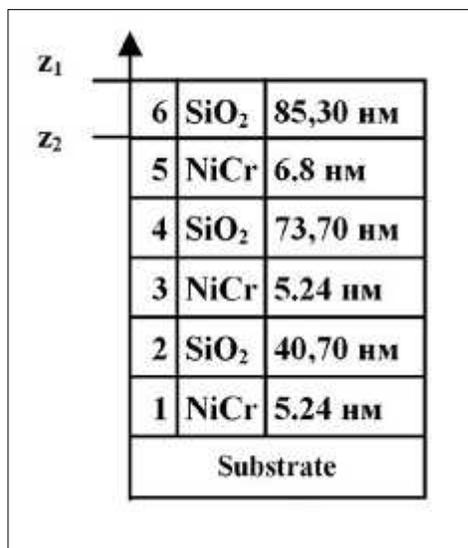


Рис. 2. Конструкция покрытия E-235

Для этого необходимо перевести значение адмиттанса из точки E в точку E4 - точку пересечения изорефлекторы $R=0,1\%$ с осью $\text{Re}(Y)$ (рис. 4). Проводим вспомогательную полуокружность, соответствующую движению точки E4 при добавлении SiO₂. Зная поверхностный адмиттанс в плоскости z_1 и толщину 6-го слоя SiO₂, находим адмиттанс в плоскости z_2 (рис.2), т.е. переходим из точки E в точку E2 (рис. 3б). Затем, добавив 2 нм NiCr, приближаем точку E2 к точке E3, лежащей на вспомогательной изорефлекторе. После этого добавляем слой SiO₂ (90 нм), чтобы перевести значение адмиттанса в точку E4.

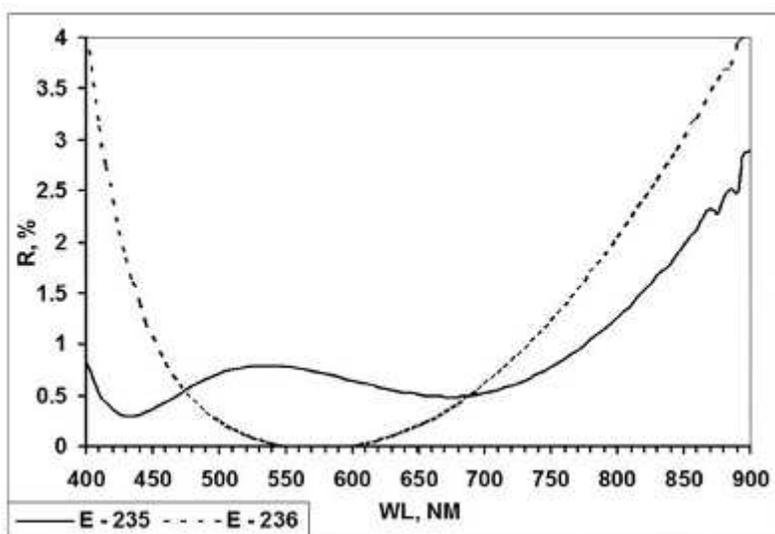


Рис. 3. Измеренные спектры отражения покрытий E-235 и E-236

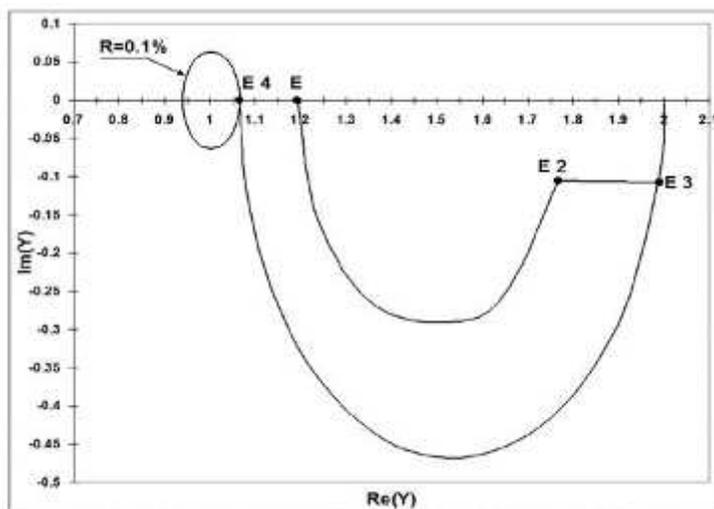


Рис. 4. Преобразование адмиттанса покрытия E-235 в точке $\lambda=550$ нм

Итак, для уменьшения отражения необходимо увеличить последний слой NiCr на 2 нм и последний слой SiO₂ на 4,7 нм. Напылив конструкцию E-236 с модифицированными толщинами слоев, получаем спектр отражения с минимальным значением $R=0,02$ % для $\lambda=550$ нм (рис. 3).

Предложенный нами способ коррекции толщин слоев в МДП адмиттансным методом позволил на практике получить металлодиэлектрическое покрытие с низким значением отражения $R_{ph}=0,1$ % для источника света с $T_{цв}=5600$ К.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 856 с.
2. Lihong Gao, Fabien Lemarchand and Michael Lequime Comparison of different dispersion models for single layer optical thin film index determination, Thin Solid Films 520(2011)501-509.
3. TFCalc Thin Film Design Software for Windows, www.sspectra.com.
4. OptiRe Thin film software, www.optilayer.com.
5. Frederic Lemarquis and Gerard Marchand Analytical achromatic design of metal-dielectric absorbers, Applied Optics 38 (1999), 4876-4884.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТВЁРДООКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Липилин А. С.¹, Чернов Е. И.², Никонов А. В.¹, Спириин А. В.¹

¹ ФГБУН Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия;

² ЗАО «ЭКОН», г. Обнинск, Россия

Твёрдооксидные топливные элементы и энергосистемы на их основе в настоящее время рассматриваются как один из наиболее эффективных способов автономной генерации электрической энергии.

В прошлом веке были предложены для стационарных устройств наиболее простые конструкции твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ): трубчатая и планарная (плоская или гофрированная), а также технологии шликерного литья в гипсовые и металлические формы (трубчатые) и литья плоских пластин из пластико-порошковых композиций (Tape Casting). Такие примитивные конструкции во всем мире формировали по хорошо разработанным керамическим технологиям, которые уже не отвечают современным требованиям по многослойности и функциональной толщине активной части генерации электроэнергии.

Современное развитие конструкций ТОТЭ направлено на увеличение удельной мощности и уменьшение веса элементов и батарей вплоть до 20 кВт/л и менее 2 кг/кВт, что позволит изготавливать мобильные энергосистемы микротрубчатой и микропланарной конструкции. Наиболее перспективными являются конструкции, объединяющие положительные свойства трубчатой и планарной, называемые «модифицированный планар» [1]. Новая конструкция естественно требует и разработки новых современных аддитивных технологий с разрешающей способностью нанесения компонентов не хуже 3-10 мкм.

Наиболее изученными, технологически проработанными материалами и широко используемыми в ЗАО «ЭКОН», являются:

- твёрдый электролит из стабилизированного в кубической фазе диоксида циркония ($ZrO_2+8\%Y_2O_3$) [YSZ];
- катод из $La_{1-x}Sz_xMnO_3$ [LSM] (отличающийся по составу и пористости слоёв, в случае многослойного катода);
- анод на основе кермета ($ZrO_2+8\%Y_2O_3$) + Ni.

Из множества подходов к конструкции ТОТЭ твердооксидные топливные элементы, где электролит является «несущим», наиболее близки к коммерческой реализации.

В последнее время интенсивно исследуются микротрубчатые и микропланарные конструкции в расчете на мобильное применение.

В докладе авторы приводят известные и наиболее освоенные технологии, позволяющие сформировать прототипы новых микропланарных конструкций – «модифицированный планар». Ниже приведена схема единичного топливного элемента и схема газораспределения в нем, а также результаты испытаний в интервале температур (800–900) °С.

При выборе способов формирования конструкции керамических деталей, авторы руководствовались также следующими основными факторами:

- конфигурацией и размерами;
- максимальной плотностью для электролита и необходимой пористостью для электродов;
- структурой и точностью размеров;
- способностью соединения (в том числе и герметичного) различных видов керамики между собой и с металлами.

Для создания планарных структур (рис.1), таких как рамки размерами 24×14×1,5 мм с внутренним окном 20×10 мм, пластины электролита размером 24×14 мм и толщиной 0,2–0,22 мм использовали метод литья керамической плёнки на движущуюся подложку, который позволяет отливать пластифицированную плёнку толщиной от 120 мкм до 1,5 мм (установка сконструирована и изготовлена в ЗАО «ЭКОН»). Из

плёнки вырезались карты размером 75×90 мм (разнотолщинность не более 0,05 мм). Карты при необходимости собирались в пакеты, «замоноличивались» при давлении 5,6–6,0 МПа и температуре 60–65 °С. Из полученного пакета-монолита с учётом усадки материала при спекании вырубались рамки и пластины, которые затем обжигались на воздухе в одну стадию при максимальной температуре 1650 °С. Во избежание деформации при обжиге изделия подгружались. Величина нагрузки 2,5–3,0 г/см². Плотность пластин 5,8–5,9 г/см³.

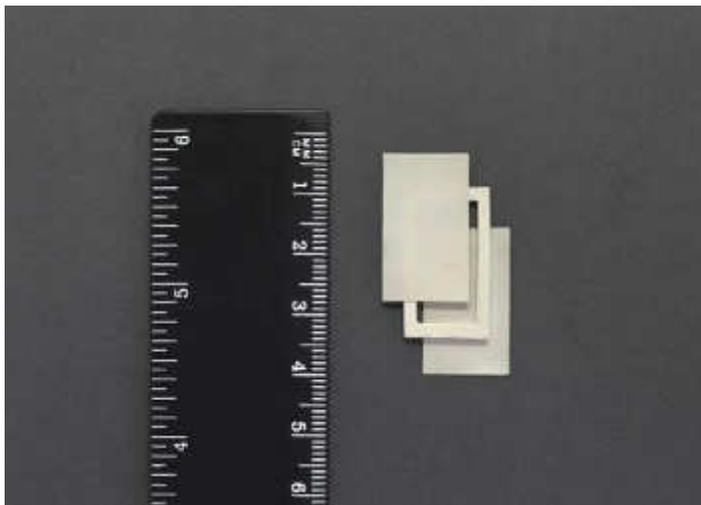
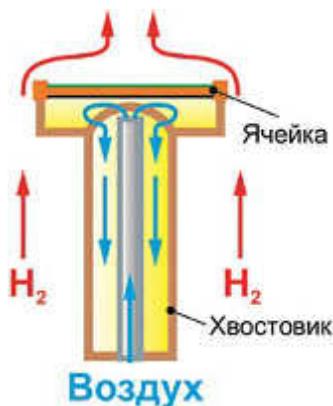


Рис. 1. Керамические заготовки для реализации прототипа микропланарной батареи топливных элементов конструкции «модифицированный планар» [1]

Из полученных деталей были изготовлены топливные элементы и электрохимическая ячейка (катод LSM, анод YSZ+Ni).

Схема топливного элемента и газораспределение в нем, а также общий вид ячейки после испытаний приведены на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Схема подачи газов топливного элемента (а) и общий вид ячейки для исследований микропланарного ТОТЭ (б)

На рис. 3 представлены вольт-амперные и мощностные характеристики водород-воздушного ТОТЭ, измеренные в температурном диапазоне 800–900 °С. Из рисунка видно, что максимальная мощность ячейки такой конфигурации при 900 °С около 0,4 Вт/см², рабочее напряжение около 0,7 В при напряжении разомкнутой цепи около 1,1 В.

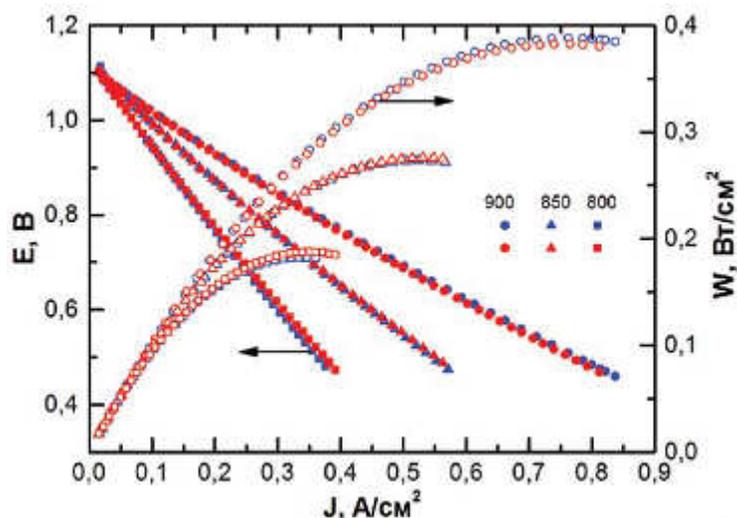


Рис. 3. Вольт-амперные и мощностные характеристики водород-воздушного ТОТЭ

Проведённые исследования показывают, что создание батарей ТОТЭ на основе топливного элемента «модифицированный планар», представленного в докладе конструкции, может быть реализовано из российских комплектующих и по технологиям, разработанным в России.

Литература

1. Modified Planar Cell and Stack of Electrochemical Devices Based thereon, and Method for Producing the Planar Cell and Stack, and a mould for producing the Planar Cell: Patent WIPO/PCT, WO2013/093607 A2 /A.S. Lipilin, V.A. Lipilina.– The applicant and the patentee A.S. Lipilin, V.A. Lipilina; anmeld. Dec. 2011; publ. 27.06.2013.
URL: <http://www.google.com/patents/WO2013093607A2?cl=en>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ПОР В КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКЕ ПО СПЕКТРАМ ПОЛНОГО ОТРАЖЕНИЯ ОТ СЛОЕВ ДВУХ ТОЛЩИН

Миронов Р. А., Забежайлов М. О., Бородай С. П.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В [1-2] развит метод, позволяющий по измеренным спектрам полного отражения от слоев частично прозрачной керамики нескольких толщин путем решения обратной задачи переноса излучения определить спектральную зависимость показателя рассеяния и поглощения. Также было показано, что рассеяние в кварцевой керамике может быть теоретически рассчитано при помощи теории рассеяния Ми на основе данных по

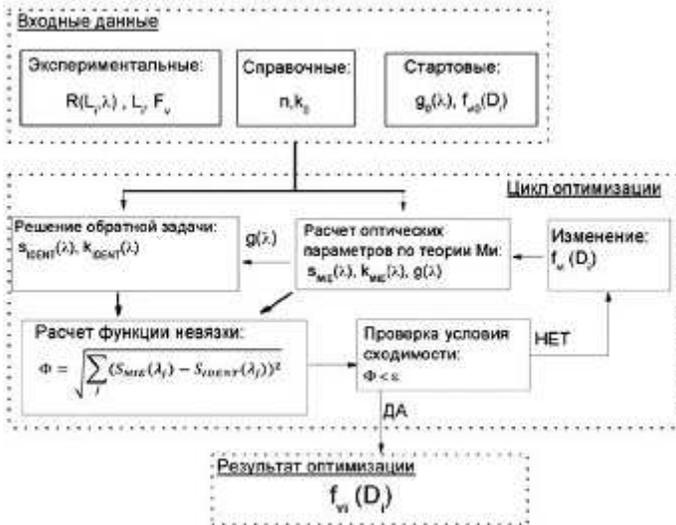


Рис. 1. Схема метода определения параметров распределения пор по размерам

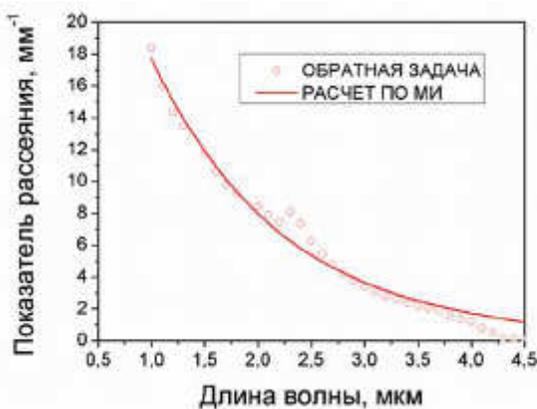
двух или более толщин определять распределение пор по размерам. Суть метода состоит в минимизации расхождения между результатом решения обратной задачи и теоретического расчета по теории Ми путем подбора параметров распределения пор по размерам.

Входными данными для минимизации служат: спектры коэффициентов полного отражения от слоев керамики различных геометрических толщин $R_i(L_p, \lambda)$, которые измеряются экспериментально в диапазоне длин волн 1 – 4,5 мкм при помощи ИК-спектрометра с интегрирующей сферой; значения геометрических толщин слоев керамики L_i ; показатель преломления n и показатель поглощения k_o материала сырья (кварцевого стекла); значение пористости материала F_v . В качестве формы функции распределения пор по размерам рассмотрено представление функции распределения (ФР) в виде двух Гауссовых пиков, задаваемых положениями максимумов $\mu_{1,2}$ и дисперсиями $\sigma_{1,2}$. Вычисление функции невязки, которая подвергается оптимизации, производится по следующему алгоритму: 1) значения параметров распределения пор по размерам (меняются в ходе оптимизации) используются для генерации функции распределения (ФР) пор по размерам ($F_{v_i}(D_i)$); 2) по ФР при помощи теории Ми согласно [3] производится расчет спектральных зависимостей показателя рассеяния $S_{MIE}(\lambda)$ и параметра асимметрии фазовой функции $g(\lambda)$; 3) спектр параметра асимметрии $g(\lambda)$ и спектры коэффициентов полного отражения от слоев нескольких толщин $R_i(L_p, \lambda)$ используются для решения обратной задачи по асимптотическим формулам [1, 2] и вычисления спектральной зависимости показателя рассеяния $S_{IDENT}(\lambda)$. Далее производится расчет функции невязки для текущих значений параметров оптимизации по формуле:

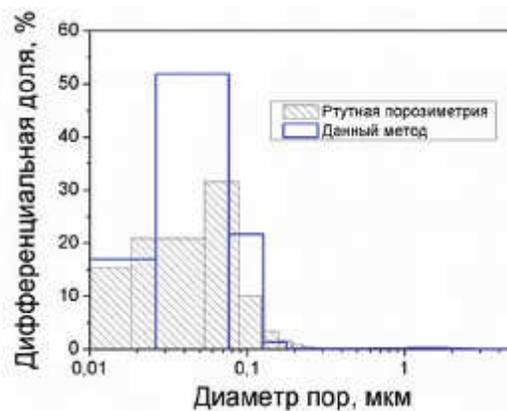
$$\Phi = \sqrt{\sum_i (S_{MIE}(\lambda_i) - S_{IDENT}(\lambda_i))^2}$$

Процесс оптимизации заканчивается, когда значение функции невязки достигает своего минимума в пространстве параметров ФР. Единственность решения задачи оптимизации исследовалась путем построения сечений функции невязки плоскостями параметров оптимизации.

распределению пор по размерам в керамике [3]. В связи с этим возможным становится использование связи: рассеяние – структура материала для определения распределения пор по размерам в частично прозрачной керамике при помощи простых спектральных измерений. В отличие от традиционных методов, таких как ртутная и газовая порозиметрия [4], предлагаемый метод позволяет анализировать закрытые поры и не требует для своей реализации специализированного оборудования. Он позволяет по измеренным спектрам полного отражения слоев



а



б

Рис. 2. Спектры показателя рассеяния согласно обратной задаче и теории Ми (а), распределение пор по размерам согласно данному методу и по данным ртутной порозиметрии (б)

На рис. 2 приведены результаты применения рассматриваемого метода для нахождения распределения пор по размерам в кварцевой керамике с пористостью 10 %. Приведенная на рис. 2а спектральная зависимость показателя рассеяния демонстрирует хорошее согласие между результатами решения обратной задачи и теоретического расчета по теории Ми, что свидетельствует о качественной оптимизации. На рис. 2б приведено сравнение распределения пор по размерам, полученного при помощи данного метода и данных ртутной порозиметрии. Средний размер пор для настоящего метода составил 0,17 при 0,12 мкм для ртутной порозиметрии. Оба метода согласуются в том, что в области размеров < 0,3 мкм сосредоточено около 90 % объема пор. Представленный метод имеет ограничения. Он позволяет анализировать только частично прозрачные материалы и только материалы пористостью не более 10 – 15 % из-за ограниченной области применимости теоретической модели. Основным достоинством рассматриваемого метода является возможность анализировать закрытые поры и простота реализации эксперимента. Применимость данного метода для анализа пор в других частично прозрачных материалах подлежит дальнейшему исследованию.

Литература

1. Забейайлов М. О. Бородай С. П. Методика определения показателей поглощения и рассеяния полупрозрачных рассеивающих материалов // Новые огнеупоры.– 2009.– Т.6.– С. 47.
2. Миронов Р. А., Забейайлов М. О., Русин М. Ю. Черепанов В. В., Бородай С. П. Расчетно-экспериментальное определение температурной зависимости спектральных и интегральных коэффициентов излучения кварцевой керамики различной пористости // ТВТ.– 2016.– Т.54, № 5.– С.724-732.
3. Миронов Р. А., Забейайлов М. О., Черепанов В. В., Бородай С. П. Моделирование оптических свойств частично прозрачной кварцевой керамики на основе данных по структуре материала // Тезисы докладов и сообщений XV Минского международного форума по тепло-, массопереносу.– Минск, 2016.– Т.2.– С. 406.
4. Allen T. Particle size measurement. // Powder Technology Series.– 1997.– V.2.– 251 p.

ОЦЕНКА КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ КВАРЦЕВОЙ КЕРАМИКИ С ПРОПИТКОЙ МФСС-8

Кордо М. Н., Ланин А. В., Забейжайлов М. О.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Давно известно, что пропитка кварцевой керамики полиметилфенилспиросилоксаном (МФСС-8) значительно улучшает многие основные свойства материала [1]. Однако до настоящего времени нет адекватных данных о кинетических параметрах термодеструкции этого материала в зависимости от стадий разложения. В связи с этим, в данной работе ставилась цель уточнить имеющиеся данные по кинетическим параметрам процессов деструкции кварцевой керамики с пропиткой МФСС-8 и самого продукта МФСС-8 [1].

Наиболее распространенным методом экспериментального исследования кинетики процессов термодеструкции является неизотермическая термогравиметрия [2]. Одним из основных преимуществ неизотермической термогравиметрии является возможность получать кинетические параметры элементарных реакций при многостадийном характере процесса термической деструкции вещества.

Предметом исследования послужили образцы кварцевой керамики с пропиткой МФСС 8 (ОТМ-609) и образцы продукта МФСС-8 (ТУ 2229–001–64570284–2011), прошедшие термическую обработку при 275 °С.

Неизотермическая термогравиметрия проводилась на установке синхронного термического анализа (СТА). Для получения достоверных результатов нужно было провести не менее трех термогравиметрических исследований с разной скоростью нагрева образцов: 5, 10, 20 град/мин. Температурный диапазон исследования каждого образца ОТМ-609 составлял от 30 до 1000 °С, а образца продукта МФСС-8 - от 30 до 600 °С. Энергия активации термодеструкции оценивалась с помощью программного обеспечения NETZSCH Thermokinetics 3 методом нелинейной регрессии [3].

По результатам термогравиметрических исследований (рис.1) ОТМ-609 и МФСС-8, проведенных в диапазоне температур от 100 до 600 °С, было выявлено, что деструкция

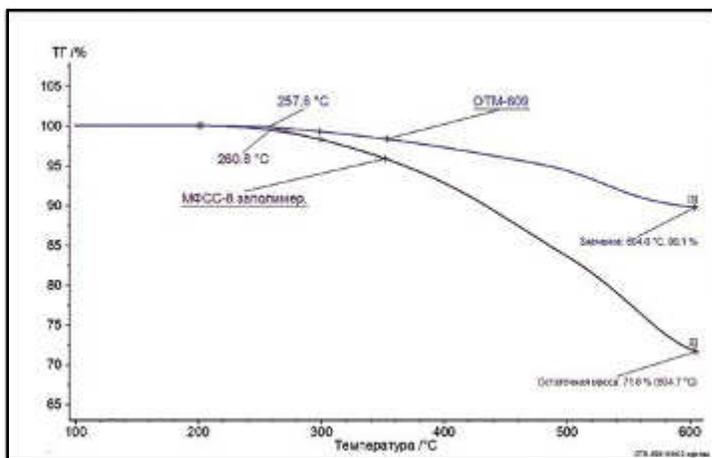


Рис. 1. Сравнение термогравиметрических кривых ОТМ-609 и МФСС-8

МФСС-8 начинается при температуре около 260 °С и совпадает по характеру с кривой термодеструкции керамики ОТМ-609. Остаточная масса образца МФСС-8 составила примерно 70 %, тогда как потеря массы образца ОТМ-609 была менее 1 %. Исходя из этого, можно предположить, что определение кинетических параметров ОТМ-609 по термогравиметрическим кривым может быть затруднено и имеет большую погрешность.

Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии (рис.2) подтвердили связь деструкции пропитки МФСС-8 с изменениями в материале ОТМ-609 в температурном диапазоне от 100 до 1000 °С.

В работе [1] был проведен расчет энергии активации (E_a) процессов деструкции МФСС-8 и поликерамов на его основе. Приводятся значения E_a для кварцевой керамики с пропиткой МФСС-8 – 10 ккал/моль и отдельно для МФСС-8 – 19 ккал/моль без указания для какой стадии термодеструкции характерны данные значения.

Так как при нагреве МФСС-8 выделяется бензол, метан и водород, то можно предположить, что деструкция МФСС-8 идет как минимум в три стадии. В связи с этим при обработке ТГ-кривых методом нелинейной регрессии (метод учитывает количество стадий деструкции, происходящих в материале) была выбрана трехстадийная модель с параллельными стадиями. Данная модель лучше всего описывает экспериментальные данные.

В таблице представлены результаты расчета кинетических параметров обоих материалов для каждой стадии термодеструкции. Видно, что на первой стадии термодеструкции величина E_a одинакова для исследуемых материалов, однако на второй и третьей стадиях величина E_a продукта МФСС-8 выше, чем у материала ОТМ-609. По-видимому, это и объясняет разницу в величинах E_a , полученных в работе [1], где приведены значения E_a , усредненные по всем трем стадиям. Меньшие значения E_a для ОТМ-609 на второй и третьей стадиях можно объяснить тем фактом, что согласно [1] подложка может являться катализатором процесса деструкции поликерамов на основе МФСС-8.

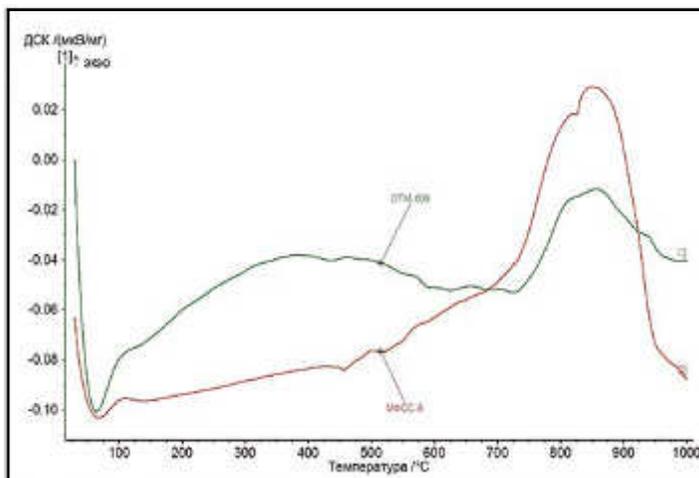


Рис. 2. Сравнение ДСК-кривых ОТМ-609 и продукта МФСС-8

Таблица

Результаты расчета кинетических параметров термической деструкции материала ОТМ-609 и продукта МФСС-8

Материал	Энергия активации E_{a1} , ккал/моль	Энергия активации E_{a2} , ккал/моль	Энергия активации E_{a3} , ккал/моль
ОТМ-609	14	42	34
МФСС-8	14	50	140

Из проведенного исследования, можно сделать вывод, что на первой стадии термодеструкции материала ОТМ-609 за процесс разложения отвечает пропитка МФСС-8. Полученный результат может быть использован при оценке сохраняемости свойств кварцевой керамики с пропиткой МФСС-8 и для определения параметров ускоренного старения.

Литература

1. Андрианов К. А., Сипягина М. А., Жердев Ю. В., Соколов В. Ф. и др. Особенности деструкции элементоорганических соединений в поликерамах // Синтез, технология производства и методы испытаний жаропрочных неорганических материалов и конструкций. Часть 2.– М., 1981.

2. Фиалко М.Б. Неизотермическая кинетика в термическом анализе.– Томск: ТГУ, 1981.– 110 с.

3. J. Opfermann, G. Wilke, W. Ludwig, S. Hagen, M. Gebhardt, E. Kaisersberger in 'Thermische Analyseverfahren in Industrie und Forschung'// VI Herbstschule Meisdorf. Friedrich-Schiller-Universität, 1991.– ISBN 3-86007-018-5.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТКЛР ПРЕЦИЗИОННОГО ЛИТЕЙНОГО СПЛАВА ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ, КОНТАКТИРУЮЩИХ С КЕРАМИКОЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Фетисов В. С.¹, Кирюшина В. В.¹, Латыш С. И.¹, Воробьев С. Б.¹, Харчук М. Д.²

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия;

² ООО НПЦ «Линвар», г. Екатеринбург, Россия

Объектом исследования в работе является прецизионный литейный сплав 32НКМБЛ [ТУ 4142-002-32115414-04] с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) в широких температурных интервалах, используемый в производстве деталей для соединений «металл – керамика» в элементах конструкций обтекателей летательных аппаратов.

Проведен статистический анализ ТКЛР заготовок шпангоутов (деталей), изготовленных за период 2013 – 2015 гг. из отливок сплава основного состава и из сплава с допускаемой заменой ниобия и молибдена углеродом (сплав с повышенным содержанием углерода). Такая замена допускается техническими условиями (ТУ) при условии сохранения регламентных значений ТКЛР и направлена на улучшение технологических литевых свойств сплава и повышения технологичности механической обработки при изготовлении деталей шпангоутов.

Анализ показал, что среднее значение ТКЛР сплава с повышенным содержанием углерода выше, чем у сплава основного состава, это различие статистически значимо и составляет $2,32 \times 10^{-6}$ и $2,72 \times 10^{-6}$ для отливок до их термообработки, а также $2,33 \times 10^{-6}$ и $2,75 \times 10^{-6}$ для этих отливок после термообработки, соответственно. В то же время для сплава с повышенным содержанием углерода не наблюдается выходов значений ТКЛР

за уровень, заданный в ТУ, как для «сырых» отливок (до термообработки), так и для этих отливок после их термообработки и процент брака по ТКЛР, прогнозируемый по теоретической функции распределения, не превышает 0,2 %. Таким образом, показано, что требования ТУ к сохранению регламентных значений ТКЛР соблюдены.

Термообработку отливок проводят с учетом результатов определения ТКЛР образцов «сырых» отливок, при этом режим последующей термообработки отливок может уточняться по термообработке «сырых» образцов. Корреляционно-регрессионный анализ, проведенный на объединенном массиве данных сплава основного состава и состава с повышенным содержанием углерода, выявил тесную линейную связь между результатами определения ТКЛР сырых отливок и отливок термообработанных. Коэффициент корреляции $R = 0,8323$ при уровне значимости $p = 0,0000$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,6928$, т.е. 69,3 % изменчивости величины ТКЛР отливок после термообработки могут быть объяснены изменчивостью величины ТКЛР отливок, по которым уточнялись режимы термообработки и, следовательно, полученная регрессионная модель обладает приемлемыми прогностическими возможностями оценки ТКЛР.

Исследование по определению степени влияния на ТКЛР химического состава отливок (содержания в отливках никеля, кобальта, углерода, расчетного содержания железа) показало, что взаимосвязь ТКЛР и содержания Ni, Co, C и Fe, а также отношения содержания указанных элементов в диапазонах их варьирования по ТУ или отсутствует, или свидетельствует лишь о некоторой тенденции изменения ТКЛР.

Оценены возможности технологического процесса изготовления отливок для изготовления деталей из рассматриваемого сплава по заданным ТУ требованиям к ТКЛР с использованием контрольных карт.

Для учета негативного влияния на ТКЛР сплава примесей в основных исходных компонентах (железо, никель) даны рекомендации по учету применяемых в плавках партий исходного сырья.

ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ГЕРМЕТИКА «ВИКСИНТ У-2-28НТ» НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛ-КЕРАМИКА

Харитонов Д. В., Анашкина А. А., Моторнова М. С.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В современном мире по мере бурного развития авиационной промышленности и создания новых высокоскоростных летательных аппаратов широкое распространение получили разработки совершенных средств их уничтожения с дальнего расстояния. Одним из основных элементов ракет с радиолокационной системой наведения является керамический радиопрозрачный антенный обтекатель. Его крепление к корпусу ракеты осуществляется посредством переходного шпангоута. Операция сборки керамической оболочки с металлическим шпангоутом осуществляется с использованием кремнийорганических герметиков «Виксинт У-2-28НТ» и «Виксинт У-1-18НТ» [1,2] и является одной из наиболее ответственных, поскольку на данном этапе необходимо обеспечить

как полную герметизацию внутреннего объема обтекателя, так и высокую прочность соединения, достаточную для того, чтобы обтекатель выдержал силовые нагрузки.

Герметик «Виксинт У-2-28НТ» представляет собой смесь трех компонентов: пасты У 2, гидрофобизирующей жидкости ГКЖ 136-41 и катализатора № 28. После соединения всех компонентов и их перемешивания в течение 5-8 минут, герметик наносят на поверхности, подлежащие склейке, с предварительно нанесенными подслоями холодной сушки П-9 и П-11, которые способствуют лучшей адгезии герметика к склеиваемым поверхностям.

Процесс перемешивания компонентов является ключевым при приготовлении герметика. Как правило, масса пасты герметика на одно изделие не превышает 400 г, при этом масса жидких компонентов – катализатора и ГКЖ, не превышает 5 г. В связи с высокой вязкостью пасты и малым количеством остальных компонентов, равномерно перемешать герметик представляется затруднительным. Таким образом, актуальной является проблема автоматизации процесса перемешивания с достижением таких характеристик, как равномерность перемешивания, отсутствие пузырей воздуха в структуре вулканизированного герметика, а также высокая прочность клеевого соединения при сдвиге.

Среди существующего стандартного оборудования не удалось найти устройства, способного справиться с этой задачей. Поэтому для этих целей была разработана установка для смешивания компонентов, перемешивание на которой осуществляется автоматически с заданной скоростью в течение определенного времени в условиях вакуума. Последний фактор позволяет избежать попадания воздуха в структуру герметика и предотвращает образование воздушных пузырей.

Для определения прочности клеевого соединения при сдвиге с использованием двух различных способов перемешивания (ручного и автоматического) были собраны образцы-спутники, представляющие собой металлическую пластину, склеенную слоем герметика с керамической призмой. На начальной стадии работы с установкой были подобраны характеристики вращения, близкие к ручному способу перемешивания (скорость перемешивания – 150 об/мин., время – 8 мин.).

Прирост прочности в случае использования установки в условиях вакуума достиг 17 % по сравнению с образцами, собранными с использованием ручного способа перемешивания без вакуума (рис. 1).

Ранее уже проводились исследования по влиянию различных технологических факторов на прочность клеевого соединения при сдвиге – площади склейки [3], толщины клеевого шва и шероховатости металлической подложки [4], вида керамики и наличия подслоев [5]. Однако данные по исследованию влияния кинематических параметров (скорости и времени перемешивания герметика) на прочность связи металл-керамика в литературе отсутствуют.

Были собраны 7 партий образцов-спутников, используя герметик «Виксинт У-2-28НТ», приготовленный на установке с различными скоростями перемешивания (50 – 350 об/мин.) в течение 8 мин., а также 5 партий образцов-спутников – со скоростью перемешивания 250 об/мин. в течение 4-12 мин. В каждом случае была измерена температура герметика, проанализированы его структура после вулканизации и адгезионные свойства к поверхностям металла и керамики, а также определена прочность клеевого соединения при сдвиге образцов-спутников.

Таким образом, проведенные исследования показали, что автоматический способ перемешивания компонентов герметика «Виксинт У-2-28НТ» на установке в условиях вакуума в среднем на 20 % эффективнее ручного. Кроме того, были подобраны оптимальные кинематические параметры перемешивания герметика (скорость и время перемешивания), а также исследовано влияние температуры герметика после приготовления на его структуру и прочностные свойства.

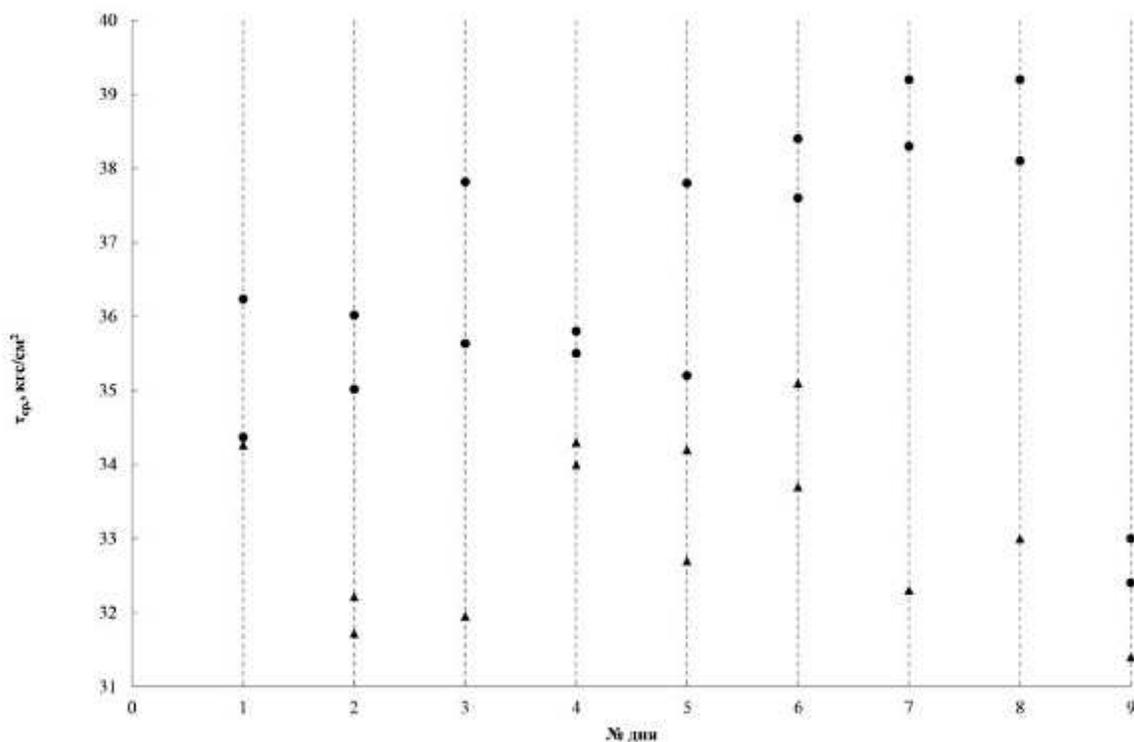


Рис. 1. Значения прочности клеевого соединения при сдвиге образцов-спутников, собранных в одинаковых условиях в одни и те же дни с использованием двух различных способов приготовления герметика (● – автоматическое перемешивание, ▲ – перемешивание вручную; Δ – разница между значениями прочности образцов-спутников, собранных с использованием установки и вручную)

Литература

1. Хора А.Н., Кубахов С.М., Русин М.Ю., Соколов В.Ф. Пат. РФ № 2168815 от 10.06.2001.
2. Харитонов Д.В., Анашкина А.А., Моторнова М.С. // Огнеупоры и техническая керамика.– 2016.– № 4-5.– С.41-46.
3. Суздальцев Е.И., Миронова Е.В. // Новые огнеупоры.– 2014.– № 4.– С.44-46.
4. Суздальцев Е.И, Миронова Е.В., Якушкин П.Ю., Фетисов В.С., Кирюшина В.В. // Все материалы. Энциклопедический справочник.– 2013.– № 8.– С.50-58.
5. Суздальцев Е.И., Миронова Е.В. // Новые огнеупоры.– 2013.– № 12.– С.40-43.

ПОЛУЧЕНИЕ И СВОЙСТВА СПЕЧЕННОЙ КОРДИЕРИТОВОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ

Суздальцев Е. И., Зайчук Т. В., Вандрай С. Н., Устинова Ю. С., Орлов А. А.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Объектом исследования является кордиеритовая стеклокерамика, полученная методом шликерного литья ВКВС с последующей термообработкой. Целью работы являлось получение материала с высокой плотностью, близкой к теоретической, и минимальным водопоглощением. В работе использованы образцы, изготовленные из суспензий на основе магнийалюмосиликатного стекла ОТМ-554 (ТУ 1-596-488-2012), содержащего: MgO – $11,8 \pm 1,3$ масс.%; Al_2O_3 – $29,8 \pm 1,0$ масс.%; SiO_2 – $45,9 \pm 2,1$ масс.%; TiO_2 – $12,0 \pm 1,0$ масс.%.

Температурные интервалы термической обработки были определены по данным дифференциальной сканирующей калориметрии (рис. 1).

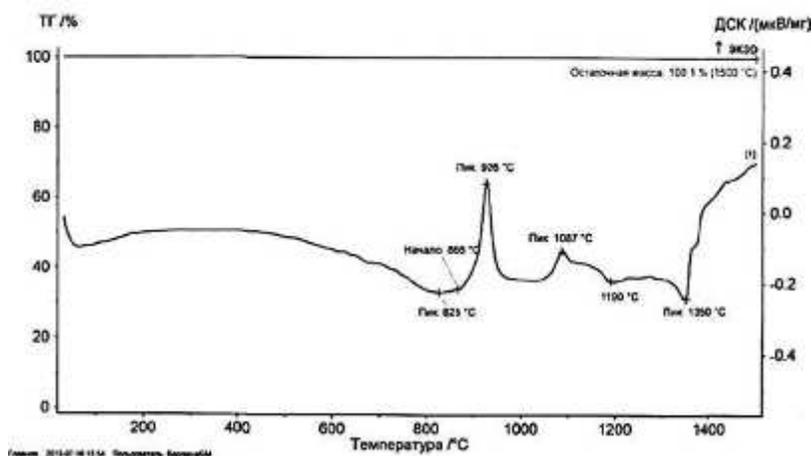


Рис. 1. Кривая ДСК порошка стекла ОТМ-554

Температура зародышеобразования, при которой появляются центры кристаллизации, подбирается экспериментально в интервале температур на 50-100 °С выше температуры стеклования. Так как температура стеклования составляет $T_g=800$ °С, то первая ступень термообработки должна находиться в интервале температур от 800 до 860 °С. При 866 °С начинается кристаллизация μ -кордиерита – экзотермический пик с максимумом при 926 °С. Следующий экзотермический пик при 1087 °С соответствует фазовому переходу μ -кордиерита в α -кордиерит. Очень слабые экзотермические пики в интервале температур приблизительно 1200-1300 °С свидетельствуют о процессах кристаллизации еще нескольких фаз. Эндотермический пик при 1350 °С соответствует плавлению образовавшихся кристаллических фаз.

Для изучения процессов, происходящих при спекании и кристаллизации, для первой ступени термической обработки была выбрана температура 850 °С, при которой, согласно нашим предыдущим исследованиям, происходит оптимальное зародышеобразование, температуру второй ступени изменяли в интервале от 930 до 1350 °С. Термическую обработку образцов проводили в высокотемпературных лабораторных печах.

Для термообработки были взяты две партии образцов с различной плотностью и пористостью. Выдержка при температуре первой ступени 850 °С составляла 3 часа, выдержку при температуре второй ступени 930-1350 °С изменяли от 0 до 5 часов. После термообработки методом гидростатического взвешивания определяли кажущуюся плотность, пористость и водопоглощение образцов.

Методами электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп EVO 40 XVP) исследовали микроструктуру полученного стеклокерамического материала (рис. 2), а методом рентгенофазового анализа (рентгеновский дифрактометр ДРОН-6,0) определяли основные кристаллические фазы: кордиерит, рутил, незначительные количества кристобалита, в некоторых образцах наблюдались следы алюмо-титаната магния.

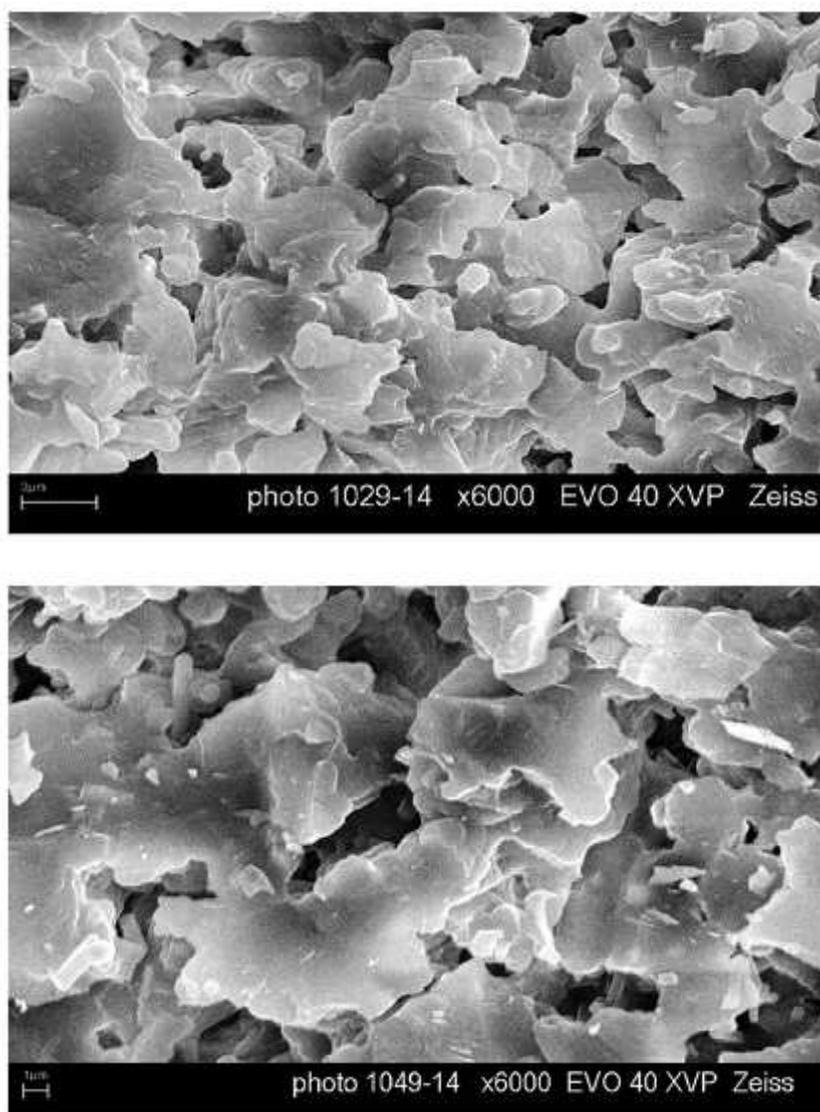


Рис. 2. Характерная микроструктура образцов стеклокристаллического материала

Микроструктура образцов рыхлая, образована крупными (~ 30-60 мкм) и мелкими (менее 30 мкм) зернами. Мелкие зерна образуют агломераты. По границам зерен и агломератов располагаются поры извилистой формы.

В табл. приведены полученные результаты.

Таблица

Кажущаяся плотность и водопоглощение образцов после термообработки

Температура	Время выдержки,	Партия 1 (сырец: $\rho = 2,168 \text{ г/см}^3$; $\Pi = 18,51 \%$)		Партия 2 (сырец: $\rho = 2,004 \text{ г/см}^3$; $\Pi = 24,66 \%$)			
		$T_1 = 850 \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau_1 = 3 \text{ ч}$	$\rho \text{ (г/см}^3\text{)}$	W, %	$\rho \text{ (г/см}^3\text{)}$	W, %
$T_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau_2, \text{ ч}$						
930	3	2,268	8,79	2,147	10,83		
1090	0	2,406	8,256	2,274	9,641		
	3	2,385	8,67	2,300	9,54		
1200	0	2,267	8,066	2,143	9,27		
	3	2,251	8,08	2,129	9,01		
1250	0	2,262	8,094	2,152	8,902		
	3	2,391	5,254	2,260	6,213		
1300	0	2,379	5,50	2,242	6,52		
	3	2,591	0,28	2,528	0,12		
1315	0	2,399	5,072	2,303	5,564		
	3	2,622	0,037	2,557	0,066		
1330	0	2,556	1,852	2,513	0,216		
	1	2,665	0,019	2,577	0,082		
	3	2,662	0,022	2,578	0,022		
1340	0	2,637	0,019	2,580	0,026		
	1	2,663	0,040	2,573	0,021		
	3	2,662	0,011	2,580	0,023		
1350	0	2,627	0,042	2,329	4,443		
	1	2,669	0,031	2,546	0,012		
	3	2,662	0,025	2,553	0,079		
	5	2,657	0,019	2,561	0,050		

Оптимальные условия спекания и кристаллизации обеспечиваются в интервале температур 1330-1340 °С при выдержке от 3 до 5 часов, при температуре первой ступени термообработки 850 °С и выдержкой 3 часа. При этом плотность материала достигает значения 2,58 г/см³, а водопоглощение менее 0,05 %.

ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФАЗООБРАЗОВАНИЯ И СПЕКАНИЯ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО БОРОМ, ПРИ ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА СТАДИИ ПОДГОТОВКИ ПОРОШКОВ

Модин С. Ю.¹, Попова Н. А.², Лебедева Ю. Е.¹

¹ ФГУП «ВИАМ» г. Москва, Россия;

² ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д. И. Менделеева», г. Москва, Россия

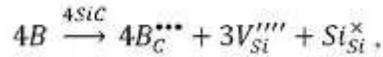
В настоящее время одним из перспективных материалов, работоспособных в «экстремальных» условиях, а именно при комплексном воздействии высоких температур и нагрузок, химически агрессивных сред, является карбид кремния. Высокая доля ковалентности связи Si-C обеспечивает данному соединению превосходные физико-механические характеристики, такие как прочность, твердость и износостойкость, но значительно усложняет процесс получения высокоплотного состояния при спекании. Одним из способов интенсификации спекания карбида кремния является легирование его бором, углеродом или их комбинацией [1]. Согласно данным различных исследований [2, 3] процесс спекания керамики из карбида кремния значительно ускоряется при введении бора в количестве не более 1 мас. %. Для обеспечения равномерного распределения данного количества добавки по объему SiC интерес представляет использование механохимической активации благодаря возможности «деформационного смешивания» компонентов смеси, т. е. перемешивания исходных компонентов на атомном уровне. Смешивание происходит, когда диффузионные процессы заторможены, и это позволяет стабилизировать различные метастабильные фазы, возникающие при механических воздействиях, которые проявляют себя в ходе последующей термообработки [4].

Целью данной работы является изучение влияния МА на процессы уплотнения при высоких температурах с применением метода дилатометрии.

В качестве исходных компонентов использовали предварительно измельченный ($D_{50} = 0,215$ мкм) промышленный порошок α -SiC марки F-1000 Волжского абразивного завода и бор аморфный (МРТУ 6-02-292-64). Механическую активацию проводили на планетарной мельнице (PM-400, Retsch, Германия) в барабанах (объем 250 мл) с мелющими телами из WC ($d = 10$ мм), соотношение материала и мелющих тел составило 1 : 10. Продолжительность МА варьировалась от 60 до 120 минут (МА60, МА90, МА120). Содержание вводимого бора составило 0,5 мас. %. Из полученных порошков формовали образцы одноосным прессованием в виде цилиндров размерами 10×10 мм при давлении 300 МПа. Кинетику спекания и процессы фазообразования полученных образцов исследовали с помощью высокотемпературного дилатометра (DIL 402 C/7/G, Netzch, Германия) в атмосфере Ar. Максимальная температура обжига составила 1950 °С, скорость нагрева 20 °С/мин.

На рис. 1 представлены результаты дилатометрических измерений образцов МА60, МА90 и МА120. Особенностью, наблюдающейся на кривых усадки всех исследуемых образцов, является перегиб на кривой усадки, условно разделяющий две стадии твердофазового спекания: стадию проскальзывания частиц по границам зерен и припекания частиц и стадию изолирования межзеренной пористости и интенсивного расширения площади контактов между зернами. Сравнение результатов позволяет сделать следующие выводы.

При легировании SiC бором и углеродом процесс спекания интенсифицируется за счет образования твердого раствора замещения бора в SiC согласно реакции:



который, сегрегируясь на поверхности частиц, понижает поверхностную энергию и энергию активации процесса атомной диффузии. Благодаря полноценному образованию твердого раствора, стадия проскальзывания зерен друг относительно друга (начальная стадия твердофазного спекания, на которой поры открытые и сообщающиеся между собой – макропоры, начинается при температурах выше 1200 °С) протекает значительно быстрее в случае, когда время МА составляет 120 мин. Завершение образования твердого раствора бора в карбиде кремния происходит на стадии механической активации, если время обработки составляет 120 минут. На это указывает тот факт, что у смесей МА60 и МА90 наблюдается пик снижения скорости усадки при 1195 и 1213 °С, соответственно (тонкая фиолетовая линия на рис. 1а и б), в то время как у смеси МА120 пик снижения скорости на этапе начала усадки отсутствует (рис. 1в).

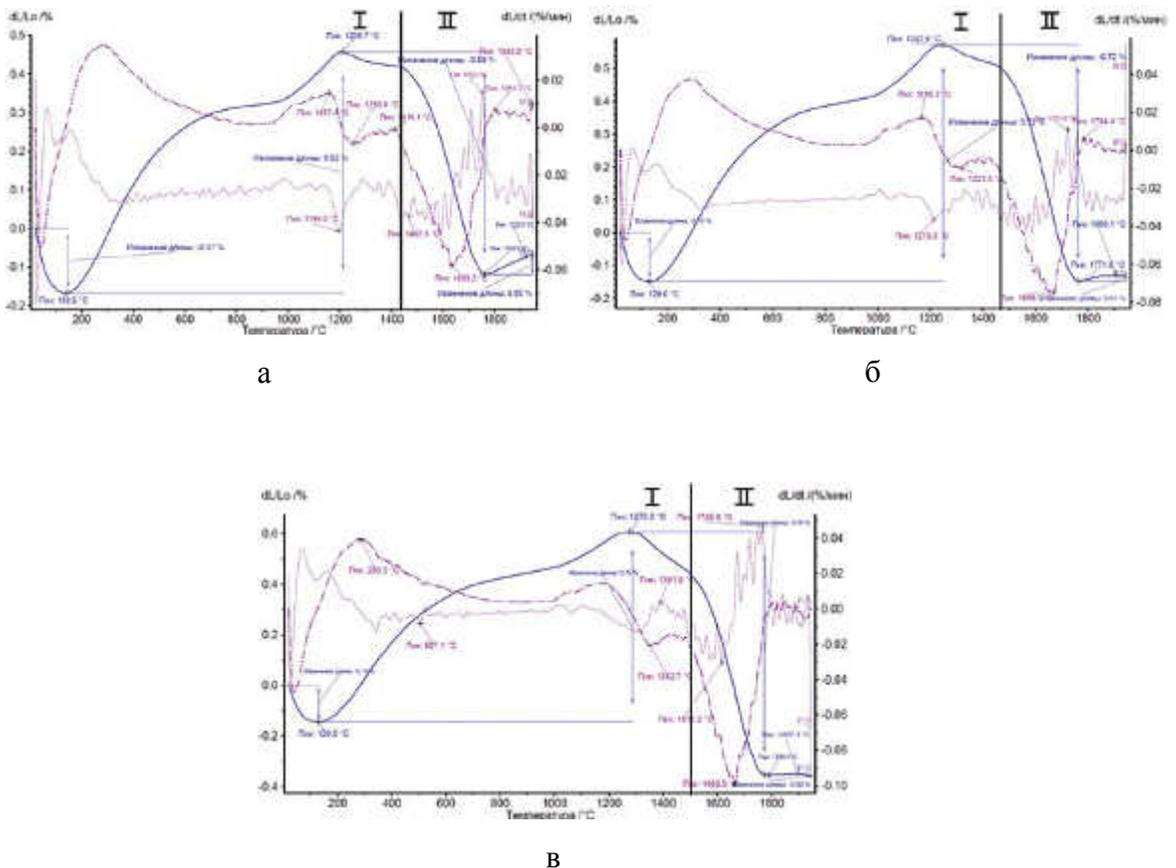


Рис. 1. Кривые дилатометрической усадки образцов системы SiC-B: а – после 60 мин. МА, б – после 90 мин. МА, в – после 120 мин. МА; I – стадия проскальзывания зерен; II – стадия изолирования пор

При дальнейшем повышении температуры вплоть до 1950 °С данный факт приводит к большему уплотнению и спеканию по механизму диффузионно-вязкого течения, конечная плотность образцов, спеченных при таких условиях, повышается более чем на 5 % по сравнению с МА60 и МА90.

Таким образом, время механической активации, необходимое для полного растворения бора в карбиде кремния и образования твердого раствора замещения, составляет 120 мин.

Литература

1. Malinge A., Pressureless sintering of beta silicon carbide nanoparticles / A. Malinge, A. Coupe, Y. Le Petitcorps, R. Pailler // Journal of the European ceramic society.– 2012.– V.32.– P. 4393–4400.
2. Elzbieta E., Influence of sintering activators on structure of silicon carbide / E. Elzbieta, W. Ptak, L. Stobierski // Solid state ionics.– 2001.– V.141-142.– P.523–528.
3. Gu H., Detection of boron segregation to grain boundaries in silicon carbide by spartially resolved electron energy-loss spectroscopy / H. Gu, Y. Shinoda, F. Wakai // J. Am. Ceram. Soc.– 1999.– V.82(2). – P.469–472.
4. Аввакумов Е. Г., Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья / Е. Г. Аввакумов, А. А. Гусев // РАН.– Новосибирск: «Гео».– 2009.– 155 с.

АНАЛИЗ ПОРОВОЙ СТРУКТУРЫ ПРОНИЦАЕМОЙ КЕРАМИКИ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОТОМОГРАФИИ

*Тарасовский В. П.^{1,2}, Красный Б. Л.², Кошкин В. И.³, Боровин Ю. М.¹,
Васин А. А.¹, Смирнов А. Д.¹*

¹ Университет машиностроения, г. Москва, Россия;

² ЗАО «НТЦ «Бакор», г. Щербинка, Россия;

³ ФГАОУ ВО «СевГУ», г. Севастополь, Россия

Накопленные к настоящему времени экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что свойства пористой проницаемой керамики однозначно определяются её структурой независимо от того, какими путями эта структура была получена (т.е. независимо от предыстории получения конечного состояния). Поэтому возникает особый интерес к задаче нахождения путей регулирования свойств материалов за счёт изменения их структуры. Для того, чтобы целенаправленно конструировать структуру керамического материала необходимо знать количественные характеристики этой структуры.

Метод рентгеновской микротомографии хорошо зарекомендовал себя во многих областях науки для исследования различных материалов и сред как естественных, так и изготовленных человеком. Провести лабораторные измерения эффективных свойств материалов иногда трудно из-за хрупкости образца, возможных необратимых его изменений, сложности или трудоемкости процедуры. Томография не нарушает изначальной структуры образца и не приводит к растворению или преобразованию составляющих

его веществ. В отличие от таких методов исследования порового пространства, как капиллярметрия или ртутная порометрия, результатами которых являются полуинтегральные характеристики, рентгеновская микротомография предоставляет информацию о связности и распределении пор в пространстве. Для исследования взаимосвязи структуры порового пространства, методов изготовления керамики и ее фильтрационных свойств данная характеристика является наиболее важной.

В качестве объектов для исследования использовали образцы из пористой проницаемой керамики, изготовленные из узкофракционированных порошков: электрокорундов марки Alodur F240, WSK, ZWSK и SWSK, выпускаемых фирмой Traibacher Schleifmittel, Австрия.

Образцы керамики для исследования формовали методом полусухого прессования при удельном давлении 30 МПа. Температура обжига 1280 °С, время выдержки при максимальной температуре 2 ч. Соотношение компонентов в шихте для формования – электрокорунд : алюмосиликатная связка образцов составляло 85 : 15 (мас. %). В качестве временной технологической связки использовали связку фирмы Zscimmer&Schwarz GmbH, Германия, марки KB 2097, которую вводили в количестве 10 мас. % сверх 100 мас. % по отношению к шихте. Полученные образцы исследовали с помощью микротомографа SkyScan 1172 с разрешением 1,0 мкм. Из полученных для каждого образца стеков двумерных изображений вырезали области размером 500 вокселей, которые в дальнейшем использовали в качестве входных данных для визуализации структуры. Полученные трехмерные изображения бинаризировали (выделяли две фазы: твердое вещество и поры) на основе одного значения порога сегментации, выбираемого по гистограмме градаций серого оригинального томографического изображения. Сегментированные изображения использовали для визуализации трехмерного строения порового пространства. Для того чтобы сравнить поры в исследуемых образцах из пористой керамики, из трехмерных изображений порового пространства при помощи метода вписанных сфер выделили сеточные модели. С помощью полученных таким образом сеточных моделей рассчитано распределение длин, радиусов и объемов каналов и пор.

Очевидно, что трехмерное исследование структуры материала не только позволяет точно определить эффективные свойства численными методами, но часто необходимо для обнаружения и объяснения различий в кажущихся одинаковыми на первый взгляд материалах.

Полученные трехмерные данные о структуре порового пространства использованы для определения эффективного свойства керамического материала – проницаемости. Для всех трех исследуемых образцов, изготовленных из порошка электрокорунда различной формы, полученные численным методом величины проницаемости хорошо соответствовали результатам лабораторных измерений. На основе морфологического анализа структуры образцов показано, что наблюдаемые значения проницаемости можно легко объяснить строением пор и каналов.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания № 11.2504.2014/К от 18 июля 2014 г. с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наукоемкие технологии в машиностроении».

Наименование параметра	Марка керамики		
	ZWSK	SWSK	WSK
Пористость, %	38,4	40,1	38,6
Число пор	11.499	9.461	10.361
Число каналов	39.212	31.460	35.101
Координационное число поры	6,72	6,55	6,68
Число изолированных пор	66	206	153
Среднее отношение длины канала к радиусу	12,28	12,41	12,38
Объём поры (мкм ³)			
- минимальный	$2,5 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^2$	$0,7 \cdot 10^2$
- максимальный	$8,2 \cdot 10^5$	$9,4 \cdot 10^5$	$9,6 \cdot 10^5$
- средний	$4,3 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^4$
Объём канала, мкм ³)			
- минимальный	$1,1 \cdot 10$	$1,1 \cdot 10$	$1,1 \cdot 10$
- максимальный	$7,9 \cdot 10^4$	$12,3 \cdot 10^4$	$14,9 \cdot 10^4$
- средний	$1,0 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$
Радиус поры, мкм			
- минимальный	1,0	0,2	0,2
- максимальный	24,1	25,3	24,0
- средний	9,9	10,3	10,2
Радиус канала, мкм			
- минимальный	0,2	0,2	0,2
- максимальный	21,7	19,6	21,5
- средний	4,7	5,1	4,9
Длина канала, мкм			
- минимальная	2,2	2,2	2,2
- максимальная	261,0	300,8	346,9
- средняя	73,7	80,5	76,9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ И КОНСТРУКЦИИ ПУЛИ НА БРОНЕВЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Беспалов И. А.

ОАО «НИИ стали», г. Москва, Россия

Предложенная в работе [1] методика измерения остаточной длины сердечника пули после пробития свободно подвешенной керамической пластины для оценки ее броневых свойств имеет ряд недостатков. Она позволяет сравнивать материалы, испытанные только одним типом пуль. А также эта методика не учитывает падение скорости пули при ее срабатывании на керамике в течение первой стадии взаимодействия.

В работе [2] приведена система уравнений, описывающая срабатывание цилиндрико-конического ударника на абсолютно жесткой стенке.

$$\begin{cases} \frac{dv_{\text{н}}}{dt} = -\frac{\sigma_{\text{н}} S(l)}{M_{\text{н}}(l)}, \\ \frac{dl}{dt} = -v_{\text{н}} \end{cases}, \quad (1)$$

где $v_{\text{н}}$ – скорость ударника, t – время, l – расстояние от дна ударника до жесткой стенки, $\sigma_{\text{н}}$ – предел текучести материала ударника, $S(l)$ – зависимость площади сечения пули от расстояния от дна, $M_{\text{н}}(l)$ – зависимость массы донной части ударника от расстояния от дна.

Решение системы уравнений (1) в пределах $t = 0 \dots t_p$ (где t_p – время задержки проникания ударника в керамику) позволяет путем подбора восстановить время задержки проникания по известному укорочению ударника. Такой подход позволяет построить для любого сердечника набор зависимостей времени задержки проникания от укорочения сердечника для различных скоростей взаимодействия (например, рис. 1).

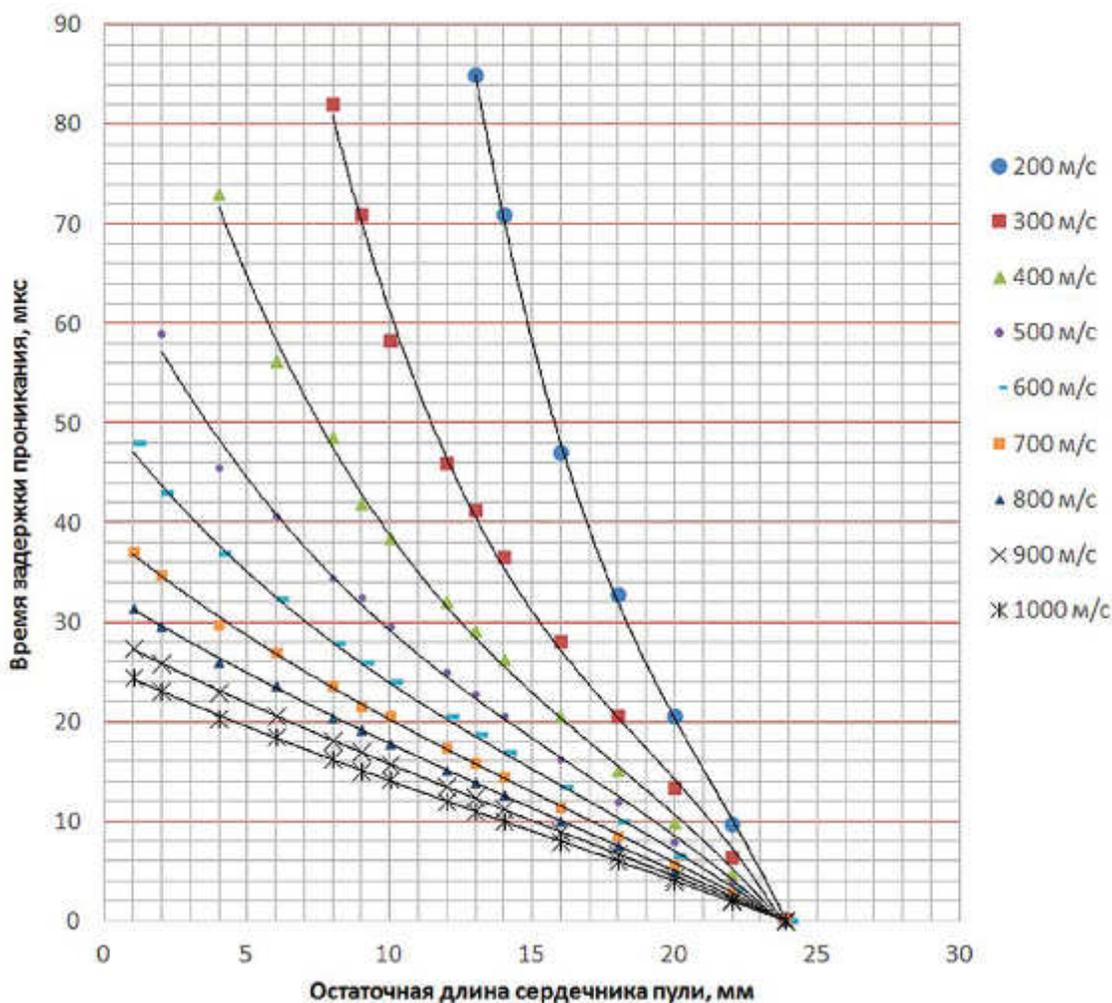


Рис. 1. Расчетные зависимости времени задержки проникания от остаточной длины сердечника при пробитии керамической пластины пулей ЛПС

Анализ этих кривых позволяет сделать три вывода:

- 1) если укорочения сердечника малы, то они очень слабо зависят от скорости ударника;
- 2) при малых скоростях ударника точность определения времени задержки мала;
- 3) зависимости остаточной длины сердечника от времени задержки практически линейны при скорости взаимодействия 700 м/с и более.

Еще одна важная особенность состоит в том, что в условиях принятых приближений прочность ударника оказывает очень слабое влияние на укорочение сердечника, но достаточно сильное влияние на его остаточную скорость.

Поэтому для низкопрочных сердечников характерно полное срабатывание при большом времени задержки, а не полная остановка несработавшейся части сердечника.

В связи с этим, считая, что мягкая сталь и свинец головной части пули не влияют на ее скорость при их срабатывании, можно построить зависимость дополнительного времени задержки проникания от начальной скорости для каждого типа пули. Можно сказать, что дополнительное время задержки определяется только временем пролета пулей расстояния от ее носика до носика сердечника, то есть зависит от конструкции пули и ее скорости (2):

$$t_{др} = \frac{l_{гч}}{v_0}, \quad (2)$$

где $t_{др}$ – дополнительное время задержки проникания, $l_{гч}$ – длина головной части пули от носика оболочки до носика сердечника, v_0 – начальная скорость пули.

Таким образом, сложив время задержки, обусловленное смятием головной части, и время задержки, обусловленное разрушением сердечника и определяемое по номограмме типа рис. 1, можно получить полное время задержки проникания. Приведя его к безразмерному виду (3), получаем полное безразмерное время задержки проникания $n_{пр}$:

$$n_{пр} = (t_p + t_{др}) \frac{c_k}{h_k}, \quad (3)$$

где c_k – скорость звука в керамике, h_k – толщина керамики.

На основе вышесказанного было проведено сравнение действия пуль Б-32 и 7Н26 из винтовки СВД по пластинам горячепрессованного карбида бора толщиной 9 мм (табл.). Головные части сердечников этих пуль идентичны, но цилиндрическая часть сердечника пули 7Н26 на 2 мм длиннее (30,5 мм против 28,5 мм у Б-32). С другой стороны, у пули Б-32 расстояние от носика пули до носика сердечника 5,2 мм, а у пули 7Н26 всего 3,9 мм.

Таблица

Параметр	Пуля Б-32		Пуля 7Н26	
	Без учета головной части	С учетом головной части	Без учета головной части	С учетом головной части
Остаточная длина сердечника, мм		17,3		17,7
Время задержки проникания, мкс	13,5	19,8	15,3	20,0
Безразмерное время задержки	17,6	25,9	20,0	26,1

Из таблицы видно, что без учета головной части пули разница в безразмерном времени задержки проникания составляет 12 %, а с учетом головной части безразмерное время задержки оказывается практически одинаковым (погрешность 0,7 %).

Литература

1. Беспалов И. А., Григорян В. А., Кобылкин И. Ф. Экспериментальное определение времени задержки проникания высокоскоростных ударников в керамическую броню // Вопросы оборонной техники.– 2011.– Сер.15, вып.1–2.– С.34–38.

2. Беспалов И. А., Кобылкин И. Ф. Комплексная инженерная методика оценки пулестойкости многослойных защитных структур с лицевым керамическим слоем // Вопросы оборонной техники.– 2013.– Сер.15, вып.1–2.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ВЫСОКОПЛОТНОЙ НАНОСТРУКТУРНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ $ZrO_2-Y_2O_3$

Кораблева Е. А., Майзик М. А., Саванина Н. Н.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Твердые растворы системы $ZrO_2 - Y_2O_3$ являются самыми стабильными и достаточно технологичными при длительном температурном применении среди других систем на основе диоксида циркония, поэтому материалы этой системы остаются востребованными в качестве твердых электролитов для длительного применения в электрохимических устройствах (ЭХУ):

- (твердооксидные топливные элементы) ТОТЭ для выработки электроэнергии;
- для производства химических веществ;
- для производства чистого кислорода с целью жизнеобеспечения;
- для контроля газовых сред.

В Японии, Германии, США эти устройства нашли широкое применение в датчиках контроля кислорода отработавших газов автомобильных двигателей. Развитие массового производства стало возможным благодаря техническим достижениям в материаловедении.

Создание новых технических объектов (датчиков контроля газовых сред в самолетах, генераторов чистого кислорода) с использованием электрохимических устройств выдвигает потребности в новых функциональных материалах. На новом витке развития материаловедения, применяя методы нанотехнологий, возможно даже в этой хорошо известной системе $ZrO_2-Y_2O_3$ получить новые функциональные материалы.

Элементарная теория проводимости твердых электролитов предполагает однородность дефектной структуры электролитов и применима лишь к монокристаллам. Поликристаллические твердые электролиты получены из порошков формованием и спеканием. В этих случаях большую роль в проводимости играют транспортные свойства границ зерен. Проводимость складывается из проводимости зерна и границы. Чем меньше размер зерна, тем больше сопротивление границ зерен, тем меньше суммарная ионная проводимость [1].

Но в наноструктурных материалах эта зависимость не соблюдается. В сегрегациях у наноструктурных материалов возникает вакансионное перенасыщение, которое вызывает неравновесное зернограничное состояние, что приводит к изменению многих свойств материала, в данном случае - ионной проводимости. Наноструктурное состояние частиц характеризуется уникальным строением границ частиц, дефектностью границ (вакансионным насыщением). Это влечет за собой высокую химическую активность поверхности частиц. Сохранение наноструктурных элементов в структуре диоксида циркония изменяет свойства твердого электролита по сравнению со свойствами макроструктуры [1, 2, 3].

Целью работы являлось получение высокоплотной керамики в системе $ZrO_2 - Y_2O_3$ с наноструктурой и изучение ее влияния на физико-механические и проводящие свойства.

В работе были изучены закономерности формирования кристаллических фаз и определены условия получения химосажденных наноразмерных порошков в системе $ZrO_2 - Y_2O_3$ с высокой активностью к спеканию и оптимальными размерами агломератов для сохранения наноструктуры после спекания. Проведен сравнительный анализ свойств порошков, полученных химическим осаждением из растворов солей и порошков, механоактивированных при различных помолах: в бисерной, в струйной и шаровой мельницах.

В качестве технологии, позволяющей сохранить наноразмерность кристаллитов, в работе была применена планарная технология, включающая следующие технологические операции: пленочное литье, нанесение электродных покрытий трафаретной печатью, изостатическое прессование пленок для получения монолита и последующее удаление связующих с одновременным окончательным спеканием.

Определены оптимальные свойства исходных порошков для получения качественных плотных пленок толщиной до 170 мкм методом литья на движущуюся подложку. Порошок должен иметь:

- пикнометрическую плотность – более 5,98 г/см³;
- удельную поверхность – в пределах 7-10 м²/г;
- сферическую форму частиц;
- кристаллитное строение и размер кристаллитов – не более 30 нм;
- содержание агломератов размером до 2 мкм – не менее 90 %.

Литература

1. Чеботин В. Н., Перфильев М. В. Электрохимия твердых электролитов.– М.:Химия, 1978.– С.293-308.
2. Кораблёва Е. А., Русин М. Ю., Саванина Н. Н. Создание ионопроводящей керамики на основе диоксида циркония для твердооксидных топливных элементов // Огнеупоры и техническая керамика.– 2010.– № 9.– С.26-31.
3. Кораблева Е. А., Майзик М. А., Саванина Н. Н. Формирование пленочных структур – твердых электролитов // Новые огнеупоры.– 2014.– № 14.– С.47-50.

ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОМПЛЕКТУЮЩИХ КЕРАМИЧЕСКОГО ОБТЕКАТЕЛЯ

Райлян В. С., Антонов В. В., Фокин В. И., Тесленко Е. А., Мешков С. А.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Керамический обтекатель в процессе эксплуатации подвергается не только силовым, но и значительным тепловым воздействиям. При этом уровень напряжений в керамической оболочке, возникающих от тепловых воздействий, может превышать напряжения от силовых воздействий.

Наибольшие напряжения в оболочке возникают в районе соединения обтекателя, представляющем собой многослойную конструкцию из элементов, значительно отличающихся по своим теплофизическим свойствам. Величину напряжений в оболочке при нагреве определяет как температурный градиент по толщине конструкции, так и разница в тепловом расширении и жесткости элементов конструкции обтекателя.

В последнее время в конструкции стали применять новые композиционные материалы, для которых сложно обеспечить стабильность теплофизических свойств. Использование элементов конструкции из подобных материалов в узле соединения без контроля и свойств недопустимо.

В этих условиях актуальной задачей является создание методики и устройства контроля элементов конструкции (комплектующих) обтекателя на предмет соответствия их параметров жесткости и теплового расширения требуемым значениям.

В данной работе авторы предлагают тестовый метод контроля, включающий нагрев элемента конструкции или сборки из нескольких элементов и измерение изменения его диаметра в нескольких направлениях. На основе результатов измерения можно определить как тепловое расширение отдельного элемента конструкции, так и термоупругие свойства сборки из нескольких элементов. Кроме того, оценивается равномерность распределения указанных свойств по направлениям.

Изложена методика проведения контроля, способы измерения малых перемещений и описана действующая установка контроля. Приведены результаты экспериментальных исследований комплектующих обтекателя из различных материалов.

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В СИСТЕМЕ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ РАКЕТ

Райлян В. С., Харитонов Д. В., Фокин В. И., Харахонов Г. А., Ерошин Д. В., Нозарев М. В.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Механическая обработка керамических оболочек при производстве обтекателей ракет является одной из ключевых операций. Этой операцией достигаются требуемые аэродинамические и радиотехнические параметры всей конструкции. Кроме того, от качества механической обработки зависят и прочностные параметры, поэтому постоянное ее совершенствование является одним из необходимых условий повышения надежности всей ракеты в целом.

Вероятность безотказной работы ответственных изделий из керамики зависит от параметров дефектного слоя их поверхности. При шлифовании на этапе выбора схемы обработки, характеристик шлифовального круга и режимов резания необходимо исходить из условий снижения уровня силового действия инструмента на формирующуюся поверхность, который обеспечивает уменьшение вероятности развития дефектного слоя, обусловленного процессом механической обработки. По данным авторов работы, создание обтекателей с селективным пропусканием электромагнитной энергии в заданном интервале частот в настоящее время связано с усовершенствованием методов их механической обработки.

Исследованию причин формирования дефектного слоя при механической обработке ситаллокерамических и кварцевых обтекателей посвящено много работ. Основной целью этих работ является выявление зависимости силы взаимодействия шлифовального круга с оболочкой в зависимости от режимов обработки, однако этого недостаточно для кардинального повышения качества механической обработки.

В настоящее время подсистема механической обработки большинства серийных керамических обтекателей имеет следующие недостатки:

- 1) оборудование не адаптировано для регистрации и оценки силового взаимодействия между шлифовальным кругом и изделием;
- 2) отсутствуют средства постоянного контроля технического состояния станка и шлифовального инструмента;
- 3) отсутствуют средства объективного постоянного контроля взаимодействия человека с оборудованием для механической обработки;
- 4) недостаточно средств диагностирования керамической оболочки в процессе выполнения механической обработки.

В данной работе приведены результаты исследования возможности создания средств для диагностирования подсистемы механической обработки керамических изделий методами тензометрирования.

Результаты экспериментальных исследований дают основание утверждать, что подсистему постоянного диагностирования оборудования для механической обработки керамических изделий можно выполнить на основе измерительно-вычислительного комплекса МИС-400 российского производства.

СИНТЕЗ НИТРИДА ЦИРКОНИЯ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ В РЕЖИМЕ ГОРЕНИЯ

*Закоржевский В. В., Лорян В. Э., Боровинская И. П.,
Кириллов А. В., Санникова С. Н.*
ФГБУН ИСМАН РАН, г. Черноголовка, Россия

Показаны результаты исследований получения порошков нитрида циркония в режиме горения в лабораторном реакторе из элементов. Для проведения исследований были использованы порошки циркония двух марок, которые отличаются чистотой и дисперсностью. Определены оптимальные условия синтеза нитрида циркония по таким

параметрам, как состав шихты и начальное давление азота. Установлено, что наиболее чистый порошок нитрида циркония получается из порошка циркония, полученного методом электрохимического осаждения. Изготовлены опытные образцы порошков нитрида циркония с содержанием основного вещества до 99,5 %.

Введение

Порошок нитрида циркония нашел широкое применение в качестве компонента при получении металлокерамики и для создания защитных износостойких или декоративных покрытий на металле или графите и других целей.

В настоящее время порошок нитрида циркония в основном производится печным способом. Данный метод является очень энергоемким имеет длительный и технологический цикл. Возросшие требования к керамическим материалам ужесточили требования к качеству исходных порошков, что в свою очередь потребовало развития существующих методов и разработки новых способов производства.

В предлагаемой статье показаны результаты исследований по получению порошков нитрида циркония в режиме горения из элементов.

Экспериментальная часть

Эксперименты проводили в лабораторном реакторе СВС-8 с рабочим объемом 8 литров. Исходные порошки циркония сушили при температуре 50-70 °С в течение 24 часов. Дозирование компонентов шихты осуществляли с помощью электронных весов с точностью ± 2 г. Масса навески шихты для одного синтеза – 2,0 кг.

Смешивание компонентов шихты проводили в барабане из нержавеющей стали емкостью 3 литра, без использования мелющих тел.

Реакционную шихту засыпали на лодочку. Затем лодочку с шихтой помещали в реактор. Реактор герметизировали, заполняли азотом до необходимого давления. После чего осуществляли инициирование горение. После охлаждения спек извлекали из реактора и подвергали зачистке, дроблению и измельчению.

Для проведения исследований были использованы две марки порошка циркония: марки ПЦрК-1, ТУ 48-4-234-84, полученный методом кальций-термического восстановления двуокиси циркония, и марки ПЦЭ-ЗР, ТУ 95 259-99, полученный методом электрохимического осаждения.

Основные характеристики порошков циркония представлены в таблице.

Таблица

№ п/п	Марка порошка циркония	Содержание элемента, % масс.						Размер частиц, мкм	Вторичная фаза ZrH_2 , %
		Zr	O	Fe	Ca	Cl	C		
1	ПЦрК-1	96,4-97,6	0,9-1,2	0,04-0,05	0,05	0,001	0,01	<50	12-13
2	ПЦЭ-ЗР	99,8	0,1	0,01	0,01	0,003	0,01	<700	~2

Как видно из таблицы, наиболее чистым является порошок марки ПЦЭ-ЗР. Особенностью данного порошка является крупный размер частиц по сравнению с порошком марки ПЦрК-1.

Результаты и обсуждение

Для определения оптимального состава шихты были проведены эксперименты по синтезу нитрида циркония с разным содержанием циркония. Содержание циркония изменяли от 30 до 100 % масс. Начальное давление азота – 50 атм. В результате экспериментов установлено, что при снижении доли порошка циркония марки ПЦрК-1 в шихте с 60 до 50 % масс. содержание азота возрастает и достигает максимального значения 11,6 % масс. при содержании 50 % масс. порошка циркония в шихте. При дальнейшем снижении доли циркония в шихте содержание азота падает и при 30 % масс. циркония шихта не воспламеняется. Таким образом, наиболее оптимальным составом является шихта с содержанием порошка циркония 50 % масс.

При использовании порошка циркония марки ПЦЭ-ЗР наблюдался рост содержания азота в продукте синтеза при снижении доли порошка Zr в шихте. Максимальное содержание азота, 13,1 % масс., было достигнуто при 60 % масс. При дальнейшем снижении Zr в шихте до 55 % масс. процесс горения не инициировался, что объясняется крупным размером частиц.

Для изучения влияния начального давления азота на степень азотирования были использованы составы с оптимальным содержанием порошка циркония. Начальное давление азота изменяли от 30 до 80 атм. Эксперименты показали, что с увеличением начального давления азота степень азотирования возрастает. Максимальное содержание азота в ZrN, полученном из порошка циркония марки ПЦрК-1, составило 12,0 % масс. при начальном давлении синтеза 80 атм. Максимальное содержание азота в ZrN, полученном из порошка циркония марки ПЦЭ-ЗР, составило 13,1 % масс. при том же давлении.

Сравнительный анализ порошков, полученных в оптимальных условиях по таким параметрам, как содержание азота, примесь кислорода и фазовый состав, показал, что порошок ZrN, полученный из порошка циркония марки ПЦЭ-ЗР, имеет наилучшие показатели. Содержание азота – 13,1 % масс., кислорода 0,35 % масс., отсутствие вторичных фаз. В то же время наилучший порошок ZrN, полученный из порошка циркония марки ПЦрК-1, имеет содержание азота – 12,0 % масс., кислорода – 1,84 % масс., наличие вторичной фазы ZrO₂ – 8,5 %, что обусловлено чистотой исходных компонентов.

Заключение

По результатам исследований определены оптимальные условия получения порошков нитрида циркония в режиме горения. Разработана методика получения порошка нитрида циркония. Изготовлены и исследованы опытные образцы порошков нитрида циркония.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Кирюшина В. В., Ковалева Ю. Ю., Фетисов В. С., Анашкина А. А.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Технологические процессы (ТП) формируют свойства материала, закладываемого в изделие, поэтому их нестабильность сказывается на увеличении интенсивности повреждения материала под нагрузкой и, соответственно, качестве изделия.

Эффективной формой управления качеством является применение статистических методов, позволяющих предупреждать появление брака и минимизировать его еще в процессе производства. Кроме этого большое значение приобретают исследования динамики изменения свойств материала и характеристик изделия под действием технологических факторов, что особенно важно для высоконагруженных изделий, имеющих рабочие напряжения или нагрузки, близкие к расчетным.

В работе демонстрируются статистические средства для анализа ТП производства изделий из керамических материалов. Показано, что любой анализ качества и поиск причин возникновения брака необходимо начинать с построения причинно-следственной диаграммы (диаграммы Исикавы). Стратификация данных с помощью таблиц частот, круговых диаграмм, диаграмм Парето и других статистических приемов позволяет выявлять узкие места ТП и оперативно реагировать на наметившиеся изменения качества. С помощью функций распределения свойств материала становится возможным прогнозирование количества изделий, выходящих за установленные по техническим условиям допустимые границы, а также применение в расчетах надежности конструкций различных моделей разрушения. Дисперсионный и регрессионный анализы незаменимы в нахождении значимых взаимосвязей между основными параметрами и характеристиками изделий, а контрольные карты Шухарта – в управлении их разбросом.

На основе проведенного исследования сформулирована система оценки качества и стабильности ТП производства изделий, которая базируется на основных этапах статистической методики «шесть сигм» (DMAIC) и включает:

- сбор и накопление информации о ТП в электронной базе данных;
- выявление основных причин проблем с качеством и их подтверждение;
- устранение проблем и совершенствование ТП;
- вычисление показателей пригодности и воспроизводимости;
- оценку результатов и контроль над процессами с использованием контрольных карт.

Приведены результаты статистического анализа ТП производства изделий с оболочками из стеклокерамики ОТМ-357 на примере серийно выпускаемых изделий. Установлено, что в большинстве случаев анализируемые технологические параметры и основные свойства материала изделий за исследуемый период времени находятся в установленных технологической документацией допусках и не противоречат нормальным функциям распределения.

На основе анализа динамики изменения индексов возможности ТП по одному из важнейших свойств материала – прочности при изгибе, оцененной на образцах материала, показана стабильность рассматриваемого ТП.

Средствами статистического анализа рассмотрено влияние технологических параметров на физико-технические свойства материала ОТМ-357. Наличие в серийном производстве устойчивых взаимосвязей между физико-техническими характеристиками материала в изделиях, которые были замечены и установлены ранее, также подтверждает стабильность технологии производства и качество изделий в настоящее время.

СИНТЕЗ УЛЬТРАДИСПЕРНОГО ПОРОШКА Al_2O_3 ПАРОФАЗНЫМ ГИДРОЛИЗОМ ИЗОПРОПИЛАТА АЛЮМИНИЯ

Погодин В. А.

ООО «Кемико», г. Обнинск, Россия

В настоящее время алкоксидный метод получения ультрадисперсных порошков (УДП) является перспективным методом синтеза наноразмерных порошков, в том числе порошка оксида алюминия (Al_2O_3). В связи с высокой стоимостью этот метод не получил широкого применения в технологии производства керамических материалов. Алкоксилаты алюминия ($Al(OR)_3$) применяются в органическом синтезе, а также в синтезе Al_2O_3 для получения лейкосапфира.

Алкоксидная технология включает 4 стадии: синтез $Al(OR)_3$, очистка $Al(OR)_3$, синтез $Al(OH)_3$ (с гидролизом $Al(OR)_3$), термообработка $Al(OH)_3$ с получением Al_2O_3 . Чистота Al_2O_3 зависит от первых двух стадий технологии, а размер и форма частиц определяются следующими двумя стадиями.

Для получения УДП Al_2O_3 необходима реализация «золь-гель» технологии в процессе жидкофазного гидролиза $Al(OR)_3$. На практике гидролиз проводится в избытке воды, протекает на границе раздела фаз и является гетерофазным процессом. Это создаёт трудности в реализации «золь-гель» технологии и, соответственно, снижает потребительские качества получаемого УДП Al_2O_3 .

Целью настоящей работы было получение ультрадисперсного порошка Al_2O_3 высокой чистоты парофазным гидролизом $Al(OR)_3$. Процесс парофазного гидролиза, как и «золь-гель» процесс, используется для получения наноразмерных порошков: оксида кремния, оксида титана.

Для проведения парофазного гидролиза был синтезирован изопропилат алюминия путем прямого взаимодействия алюминия с изопропанолом. Индивидуальность, чистота, структура полученного соединения была подтверждена методами ЯМР ^{27}Al , элементным анализом, масс-спектрометрией с ИСП.

Эксперименты проводились на лабораторной установке, созданной на базе прибора для вакуумной дистилляции, снабженной обогреваемой реакционной камерой с вводом для подачи паров воды и аргона. Разрежение обеспечивалось форвакуумным масляным насосом. В вакуумную линию, соединяющую лабораторную установку и форвакуумный насос, включили каскад ловушек для улавливания продуктов реакции.

Процесс парофазного гидролиза проводился при остаточном давлении 40 мм ртутного столба. Пары изопропилата алюминия поступали из куба-испарителя, подогретого до 220 °С, в реакционную камеру, нагретую до 200 °С. Вместе с ними подавались пары воды с мольным соотношением $H_2O/Al(OiPr)_3=1-10$.

Образующийся порошок $AlO(OH)$ осаждался на стенках реактора. Часть порошка (25-30 % масс.) уносилась из зоны реакции и улавливалась в ловушках. Пары не прореагировавшей воды и изопропанола конденсировались в низкотемпературных ловушках.

Реакция проводилась в течение 6-8 часов. После окончания процесса порошок $AlO(OH)$ переносили в корундовый тигель и выдерживали при 600 °С в течение 3-4 часов. В результате получался УДП $\gamma-Al_2O_3$ (по данным РФА) с размером частиц менее 1 мкм (по данным электроакустической спектроскопии). Выход УДП Al_2O_3 составил 89 % масс. от теоретического. Чистота полученного порошка оксида алюминия составила 99,999 %. Содержание основных примесей в УДП Al_2O_3 кремния и железа составило 1,0 и 0,5 ppm, соответственно.

Таким образом, нами реализован альтернативный метод получения УДП Al_2O_3 парофазным гидролизом изопропилата алюминия.

Показано, что данный метод позволяет синтезировать УДП Al_2O_3 с высокими потребительскими свойствами и доступной ценой для использования в технологии изготовления керамики с заданными свойствами.

ПРОИЗВОДСТВО НАКОНЕЧНИКОВ ОПТИЧЕСКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ (НОК) НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ (Zr ферул) МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В ЖЕСТКИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Осипова Ю. Н., Каргина Е. А., Бекренев А. С.
АО «ЦНИТИ «Техномаш», г. Москва, Россия

В последнее время использование волоконно-оптических кабелей в связной технике взамен электрических все более актуально. В оптических системах связи применяют разные способы соединения между собой оптических волокон, в том числе способ разъемного соединения, основанный на использовании волоконно-оптического соединителя. Важнейшим элементом, определяющим основные технические характеристики волоконно-оптического соединителя, является наконечник оптический керамический (НОК). НОК предназначены для обеспечения физического контакта соединяемых оптических волокон, фиксации и точного позиционирования оптического волокна в канале наконечника разъемного оптического соединителя. НОК (Zr ферулы) для военного и специального назначения ранее закупались в Японии и Китае. На сегодняшний день в России АО «ЦНИТИ «Техномаш» является единственным производителем НОК для оптических соединителей, работающих в жестких условиях эксплуатации.

НОК – прецизионные детали с высокой степенью чистоты наружной и внутренней поверхностей (с шероховатостью поверхности до 0,05 мкм), высокоточными

размерами и точностными характеристиками взаимного расположения наружной и внутренней поверхностей деталей, с предельно малыми (до 0,5 мкм) допусками на размер, обладающие повышенной износостойкостью.

Цель нашего производства – получение качественного конечного продукта с заданными параметрами. Для достижения этой цели нами был разработан технологический процесс производства НОК, который включает следующие стадии:

1) изготовление заготовок для НОК (смешивание наноструктурированного порошка на основе частично стабилизированного диоксида циркония со связующими компонентами, литье и спекание заготовок для НОК);

2) механическую обработку наружной (цилиндрической, торцевых) и внутренней поверхностей спеченных заготовок для НОК.

В настоящее время освоен выпуск НОК (рис.1 и 2) диаметром 2,5 мм (SC) и 1,25 мм (LC).



Рис. 1. Восьмиместная заготовка НОК 2,5 мм с литником (слева) и НОК 2,5 мм (справа)



Рис. 2. Наконечники оптические керамические, запрессованные во фланцы

Качество конечного продукта зависит от режимов механической обработки и качества производства заготовок для НОК. Все заготовки для НОК в АО «ЦНИТИ «Техномаш» проходят комплексную систему контроля качества после каждой технологической операции. В ПТЦ «ВОС» (АО «ЦНИТИ «Техномаш») были изготовлены три серии заготовок для НОК разного состава при разных значениях давления ($P_1 = 46$ МПа; $P_2 = 40$ МПа; $P_3 = 52$ МПа) подачи смеси в пресс-форму методом литья под давлением. Результаты измерений геометрических параметров спеченных заготовок для НОК, прошедших визуальный контроль, представлены на рис. 3. Геометрические параметры – диаметр внутренний ($d_{\text{внутр.}}$), диаметр внешний ($d_{\text{внешн.}}$), длина внутренняя (l), длина заготовки (L), соосность (φ) – всех трех серий спеченных заготовок для НОК соответствуют предъявляемым к ним техническим требованиям: $d_{\text{внутр.}} = 118 - 123$ нм, $d_{\text{внешн.}} = 2,6 - 2,66$ мм, $l = 11,48 - 11,68$ мкм, $L = 12,3 - 13,3$ мм, $\varphi < 30$ нм.

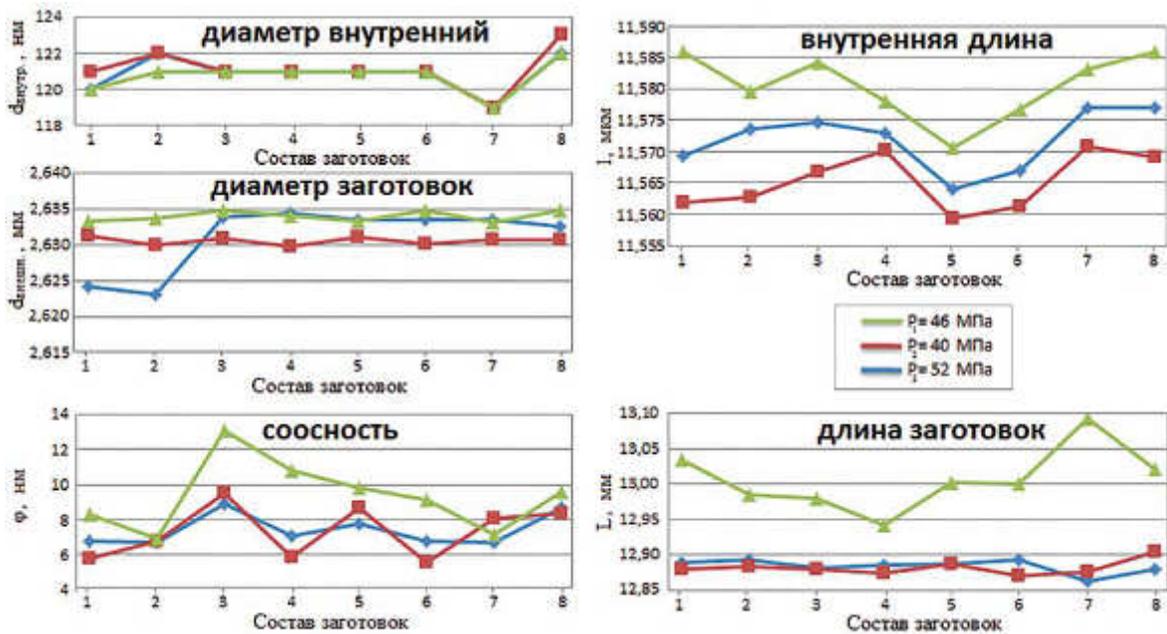


Рис. 3. Зависимость геометрических параметров заготовок для НОК при разных давлениях подачи смеси от состава заготовок

Все серии качественных спеченных заготовок для НОК прошли вторую стадию производства НОК при одинаковых режимах механической обработки. В результате проверки качества готовых НОК была выявлена доля бракованной продукции, содержащей трещины. В готовой продукции, полученной при обработке заготовок для НОК первой серии (при давлении $P_1 = 46$ МПа), доля брака составляла 6,2 %. В готовой продукции, полученной при обработке заготовок для НОК второй серии (при давлении $P_1 = 40$ МПа), доля брака составляла 4,9 %. В готовой продукции, полученной при обработке заготовок для НОК третьей серии (при давлении $P_1 = 52$ МПа), доля брака составляла 2,1%. Очевидно, что в готовых НОК, полученных при обработке заготовок для НОК третьей серии (при давлении $P_1 = 52$ МПа), доля бракованной продукции минимальна. Дальнейшее увеличение давления подачи смеси в пресс-форму при производстве заготовок для НОК может привести к механической поломке оборудования для литья.

Таким образом, для получения качественных НОК на основе диоксида циркония (Zr ферул), работающих в жестких условиях эксплуатации, необходимо при производстве заготовок для НОК методом литья под давлением проводить подачу смеси в пресс-форму под давлением $P = 46\text{--}52$ МПа, но не превышающим 52 МПа. Однако определение точной величины давления впрыска требует дальнейших исследований.

СТРУКТУРА И УПРУГИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В СИСТЕМЕ SiC-BeO

Сафаралиев Г. К., Шабанов Ш. Ш., Кардашова Г. Д., Билалов Б. А.

ГАОУ ВО «Дагестанский государственный университет народного хозяйства», г. Махачкала, Россия

Керамика на основе карбида кремния является одним из наиболее перспективных материалов для высокотемпературной электроники элементов горячей зоны двигателей и установок новых поколений. Вследствие ковалентной природы связи SiC спекание карбида кремния без использования активаторов спекания заканчивается при достижении плотности порядка 70 % от теоретической (ТП), что резко снижает прочностные свойства керамики. Известно, что эффективной добавкой для спекания карбида кремния являются материалы, имеющие высокую растворимость в SiC и образующие с ним твёрдые растворы. К числу таких соединений относится, в частности, оксид бериллия, имеющий структуру вюртцита, характерную для альфа-модификации карбида кремния, и образующий вследствие этого твёрдые растворы в системе SiC-BeO.

Керамика SiC-BeO была получена методом горячего прессования при температуре 2420 К и давлении до 35 МПа в течение 1 часа в атмосфере N₂ с различным содержанием основных компонентов: 0,5-2 % масс. BeO в SiC. Структуру полученных керамик изучали по интегральной интенсивности рентгеновского излучения CuK_α на дифрактометре ДРОН 2,0 при ускоряющем напряжении 20 кВ. Модули упругости рассчитаны нами по измеренным значениям плотности и скоростей распространения продольной C_L и поперечной C_T ультразвуковых волн (УЗВ).

Общей закономерностью для керамики SiC-BeO является повышение от 2,77 г/см³ (~1 % масс. BeO) до 2,98 г/см³ (~2 % масс. BeO) плотности матрицы.

Рентгеноструктурный анализ образцов керамики на основе SiC-BeO проводился как на прессованных шайбах, так и на порошках, изготовленных из горячепрессованных образцов.

Исследование параметров кристаллической структуры SiC-BeO от состава показало, что в диапазоне 0,5-2 % масс. BeO пики на дифрактограммах, присущие чистому SiC, сдвигались на 0,1-0,2° в сторону малых углов, что, возможно, свидетельствует об изменении параметров кристаллической структуры ввиду образования твёрдого раствора SiC-BeO. Из зависимости параметра элементарной ячейки «с» керамики SiC-BeO от состава установлено, что минимальное значение параметра (~15,05 Å) наблюдается для образцов с добавками 1,4-1,5 % масс. BeO.

Результаты измерений продольной и поперечной скоростей ультразвука и модулей упругости для поликристаллических твёрдых растворов SiC-BeO представлены в табл. 1 и на рис. 1. Доверительный интервал с вероятностью 0,95 содержит неучтенные систематические и случайные погрешности измерения времени распространения ультразвука в образце и длины образца.

Исследование модулей упругости поликристаллических твёрдых растворов SiC-BeO показало, что основным фактором, влияющим на их упругие свойства, является пористость. При таких небольших добавках оксида бериллия его влияние ву-

ализируется влиянием пористости. На рис. 2 показано корреляционное поле модуля Юнга (E) и пористости, полученное на нескольких партиях образцов карбидокремниевой керамики.

Таблица 1

N n/n	C_l , м/с	C_t , м/с	μ	E, ГПа	M, ГПа	G, ГПа	BeO, % масс
1	11,5276+110	7373+30	0,153	374	180	162	2
2	11,252+80	7229+30	0,148	345	163,35	150	1,8
3	10,909+90	7034+20	0,145	322	151,17	141	1,6
4	10,53295+80	7272+25	0,131	333	150,406	147	1,5
5	11,293+110	7293+50	0,143	342	153,664	150	1,4
6	10,874+110	7071+30	0,136	316	144,7	139	1,2
7	10,8987+150	7058+50	0,136	316	145,03	138	1
8	9,1966+90	6030+80	0,124	306	91,3	92	0

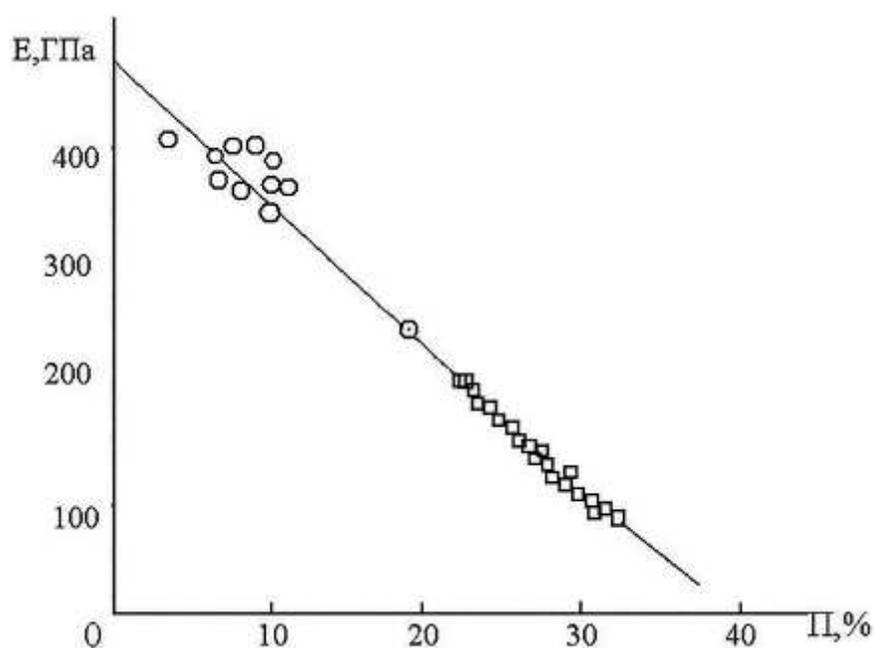


Рис. 1. Зависимость модуля Юнга в керамике SiC-BeO от пористости:

- - керамические материалы SiC-BeO,
- - партия образцов азотированного карбида кремния

Видно, что данные для образцов SiC-BeO ложатся удовлетворительно на единую регрессионную кривую, но прослеживается незначительное положительное отклонение. Можно сделать вывод, что наблюдается тенденция к увеличению модулей упругости матрицы SiC с добавлением BeO. Хорошая корреляция модулей упругости с пористостью позволяет использовать акустические измерения для экспресс-оценки

пористости получаемой керамики на основе SiC. С другой стороны, зная упругие свойства образца и его пористость, можно оценить упругие свойства матрицы керамики и делать выводы о влиянии той или иной примеси на ее свойства.

Заключение

Получена плотная керамика в системе SiC-BeO методом горячего прессования. Рентгеноструктурные исследования керамики SiC-BeO показали изменения параметра решетки от состава оксида бериллия, а также активационный характер спекания керамики SiC-BeO. Размер зерна в результате рекристаллизации увеличивался до 20 мкм. Основным фактором влияния на упругие свойства керамики SiC-BeO является пористость.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания Минобрнауки России в сфере научной деятельности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРОСТОЙКОЙ ЭМАЛИ ТИПА ЭВК-103 ДЛЯ ЗАЩИТЫ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Солнцев С. С., Розененкова В. А., Прокофьев В. А., Денисова В. С.
ФГУП «ВИАМ», г. Москва, Россия

Детали газотурбинных двигателей (ГТД) эксплуатируются в условиях высоких температур (до 1000 °С) и подвергаются жестким местным нагревам. Металл узлов ГТД должен иметь умеренную жаропрочность, высокое сопротивление окислению (жаростойкость) и коррозии в продуктах сгорания топлива. Жаропрочные материалы для деталей ГТД разработаны на Ni-основе с введением в твердый раствор значительного количества легирующих добавок, которые увеличивают прочность, сопротивление ползучести и жаропрочность. При эксплуатации газотурбинных двигателей основным повреждением поверхности деталей (камер сгорания, форсажных камер, жаровых труб и др.) является высокотемпературная газовая коррозия, которая сопровождается процессом образования на поверхности металлов окалины, состоящей из фаз переменного состава, а также рыхлых подокалинных слоев и зон внутреннего окисления, что вызывает существенное изменение химического состава и снижение прочностных характеристик сплавов. Потеря прочности сплавов происходит под действием поверхностной и межкристаллитной коррозии. Жаропрочные сплавы при высоких температурах имеют тенденцию к активному окислению: привес за 100 часов при температуре 1000 °С составляет 0,19-0,25 г/м², при температуре 1100 °С – 0,8-1,6 г/м². Для повышения сопротивляемости сплавов высокотемпературной газовой коррозии эффективны защитные жаростойкие силикатные эмалевые покрытия, регламентирующие процесс окисления металла при высоких температурах и являющиеся барьером на пути компонентов агрессивной газовой среды и продуктов сгорания топлива.

Жаростойкие силикатные эмалевые покрытия для защиты деталей горячего тракта газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых, высокохромистых и железо-никелевых сплавов занимают особое место в обеспечении работоспособно-

сти, ресурса и надежности изделий авиационной техники. В настоящее время для защиты деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов типа ВЖ98, ЭП648 от высокотемпературной газовой коррозии при температурах до 1000 °С серийно применяются эмалевые покрытия типа ЭВК на основе тугоплавких стеклофритт. Высокие эксплуатационные характеристики покрытий достигаются оптимизацией химического состава и соотношением кристаллической и стекловидной составляющей в процессе формирования и эксплуатации.

В работе исследована жаростойкая эмаль типа ЭВК-103 для защиты жаропрочных никелевых сплавов. Покрытия отличаются прочным сцеплением с металлической подложкой, газоплотностью, прочной химической связью, высокой жаростойкостью, термостойкостью в широком температурном интервале 600-1100 °С. При этом покрытие выдерживает циклические нагрузки и тепловой удар без разрушения и одновременное воздействие высоких температур и агрессивных компонентов продуктов сгорания топлива (соединения серы, хлора и др.).

Применение стеклокристаллических покрытий для защиты деталей газотурбинных двигателей (камер сгорания, жаровых труб, форсажных камер, стабилизаторов и др.) и деталей планера (патрубки выхлопных систем и др.), а также покрытий, полученных с использованием реакционного отверждения, для защиты тонкостенных деталей сложной конфигурации позволяет снизить окисляемость сплавов при 1000 °С в 6-10 раз. Применение покрытий позволяет повысить ресурс и надежность работы изделий в 1,5-2 раза.

СТОХАСТИЧЕСКИЕ И ДЕТЕРМИНИСТСКИЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Корзунин А. В., Фурминский А. А.

ООО «Фотооптик», г. Обнинск, Россия

Многослойные оптические покрытия представляют собой последовательность тонких слоёв (~3-300 нм) из диэлектриков или металлов, нанесённых на подложку. Для расчёта характеристик такого покрытия в работе используется алгоритм, основанный на матричном методе Абеле [1]. Практический интерес представляют покрытия с минимальным/максимальным отражением или пропусканием на определённых длинах волн. Для синтеза таких покрытий в настоящее время используются численные алгоритмы методов оптимизации. Математические модели, которые описывают оптические свойства многослойных структур, являются существенно нелинейными, таким образом, оптимизация сводится к поиску среди множества локальных минимумов. Как показано в работе, стохастические и детерминистские методы оптимизации могут приводить к различным результатам при решении данных задач.

В качестве детерминистского алгоритма используется градиентный метод наискорейшего спуска [2].

В работе рассматриваются два алгоритма стохастической оптимизации: простой случайный поиск и метод имитации отжига. В отличие от простого случайного поис-

ка, где шаг делается только в том случае если значение целевой функции уменьшается, алгоритм имитации отжига, предложенный Н. Метрополисом [3] в 1953 г. и впоследствии доработанный [4], позволяет на начальных этапах расчета делать шаги в сторону повышения целевой функции.

Целью работы является исследование возможностей методов по достижению минимального значения целевой функции. Для математических экспериментов с использованием созданного программного комплекса, реализующего описанные выше алгоритмы, ставились задачи получения различных оптических покрытий.

В ходе исследований обнаружено:

– как для градиентного, так и для стохастических методов «преградой» является случай перехода в процессе оптимизации толщины слоя через нулевое значение, причём стохастический метод может находить другое решение;

– стохастический метод гораздо менее чувствителен к начальным значениям вектора толщин слоёв;

– в ряде случаев, когда вероятность повышения целевой функции мала, к положительному результату приводит остановка оптимизации методом имитации отжига и окончание спуска до ожидаемого минимума с помощью градиентного метода.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Использование стохастического метода даёт лучшее с точки зрения минимума целевой функции решение, но требует больших затрат машинного времени;

2. Перспективным представляется сочетание стохастических и детерминистских методов для решения подобных задач.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики.– М.: Наука, 1970.– 856 с.
2. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач.– М.: 1988.
3. Metropolis N., Rosenbluth A. W., Rosenbluth M. N., Teller A. H., and Teller E. Equation of State Calculations by Fast Computer Machines // J. Chemical Physics.– 1953.– P.1087-1092.
4. Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C. D., Vecchi M. P. Optimization by Simulated Annealing // Science.– 1983.– V.220.– P.671-680.

МЕТОД СЕКЦИОННОГО АНАЛИЗА В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКЕ С МАССОВОЙ СИСТЕМОЙ КОНТРОЛЯ

Антропова Е. В.

ООО «Фотооптик», г. Обнинск, Россия

В данной работе описан метод секционного анализа многослойных оптических покрытий, полученных на вакуумной установке Balzers 1401 с массовой системой контроля толщин осаждаемых материалов, а также его преимущества и недостатки. Основная цель применения метода - улучшение такой важнейшей характеристики

отрезающих многослойных светофильтров, как крутизна склона. Степень крутизны склона оптического покрытия можно охарактеризовать с помощью параметра десятичный отрезок, который определяется как длина отрезка на шкале длин волн, на котором пропускание покрытия изменяется в 10 раз (например, с 60 до 6 %). В работе подводятся итоги практического применения метода на примере серий процессов в 2015-2016 гг.

При изготовлении многослойных отрезающих покрытий для видимой и ближней ИК-областей спектра, как правило, используются пленкообразующие материалы (ПОМ) SiO_2 и TiO_2 . Проведенные в ООО «Фотооптик» исследования показали, что при напылении 30-39-слойных оптических покрытий степень окисления, осажденного на подложку ПОМ TiO_2 , не остается постоянной на протяжении процесса напыления.

При анализе готового покрытия этот эффект моделируется путем задания на разных этапах напыления покрытия разных значений эффективной плотности (ЭПЛ) TiO_2 .

При подготовке процесса напыления многослойного отрезающего покрытия с номером N выбирается температура подложек, парциальное давление кислорода, толщины слоев покрытия и эффективные плотности ЭПЛ^{i, N} ПОМ. За основу берутся плотности ЭПЛ^{i, N-1}, найденные в ходе анализа предыдущего аналогичного процесса (N-1). Толщины осаждаемых на подложку чередующихся слоев ПОМ контролируются с помощью кварцевого монитора с учетом заданных ЭПЛ.

Для контроля изменения свойств слоев TiO_2 в ходе напыления многослойного оптического покрытия предложен метод секционного анализа, заключающийся в том, что в процессе напыления на стекла-спутники, находящиеся в вакуумной камере, осаждаются так называемые «секции» покрытия. Для этого конструкция покрытия разбивается на несколько частей. Обычно 30-39-слойное покрытие разбивается на четыре или пять частей, каждая из которых является i-ой секцией. Разбивка делается таким образом, что спектр пропускания каждой секции имеет ярко выраженный склон и точку минимума в диапазоне от 400 до 1100 нм. На этапе анализа покрытия, полученного в процессе N, определяются секционные ошибки ОПРⁱ по измеренным на стеклах-спутниках спектрам пропускания и ошибки ОПР^N в среднем по коммерческим стеклам.

Ошибка первого рода (ОПР) описывает одинаковое изменение толщин всех чередующихся слоев с низким (L) и высоким (H) показателями преломления в покрытии, ведущее к смещению измеренной точки склона $\lambda_{0,5}^m$ по сравнению с расчетной $\lambda_{0,5}^c$:

$$ОПР = (\lambda_{0,5}^m - \lambda_{0,5}^c) / \lambda_{0,5}^c \quad (1)$$

Ошибка второго рода (ОВР) характеризует дисбаланс между толщинами слоев с низким (L) и высоким (H) показателями преломления. Проявляется он в форме острого провала в спектре пропускания в пасс-зоне на длине волны $\lambda^* \approx \lambda_{\min} / 2$.

С учетом найденных секционных ОПРⁱ рассчитываются плотности ЭПЛ^{i, N} ПОМ, которые используются для коррекции следующего аналогичного процесса с номером (N+1).

Секционные ЭПЛ для материала TiO_2 в N+1 процессе рассчитываются по формуле:

$$\begin{aligned} \text{ЭПЛ}^{i,N+1}(TiO_2) &= \overline{\text{ЭПЛ}^N(TiO_2)} \cdot \text{НБК}^{i,N+1} \cdot (1 - (\text{ОПР}_N + \text{ОВР}_N)), \\ \text{НБК}^{i,N+1} &= \frac{P^{i,N}}{P^{i,N}}, \quad P^{i,N} = \frac{\text{НБК}^{i,N}(TiO_2)}{(1 + \text{ОПР}^{i,N})}, \quad \text{НБК}^{i,N}(TiO_2) = \frac{\text{ЭПЛ}^{i,N}(TiO_2)}{\text{ЭПЛ}^N(TiO_2)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Оксид кремния SiO_2 не доокисляется в процессе испарения в вакуумной камере и не претерпевает значительных структурных изменений, поэтому его ЭПЛ во всех секциях считается одинаковой:

$$\text{ЭПЛ}^{N+1}(SiO_2) = \text{ЭПЛ}^N(SiO_2) \cdot (1 - (\text{ОПР}_N - \text{ОВР}_N)). \quad (3)$$

Метод секционного анализа применялся в технологии напыления многослойных оптических покрытий на установке Balzers 1401 в 2015-2016 гг. Было отмечено, что после применения метода децимальный отрезок склона покрытия уменьшается в среднем в 1,6 раза. Примеры применения приведены в таблице. Для оценки работоспособности метода были выбраны несколько пар процессов. Одинаковыми для каждой пары процессов являлись следующие параметры: температура подложек и парциальное давление кислорода. При этом первый процесс в каждой паре имеет аномальный склон и большую величину децимального отрезка $\Delta(60:6)$; для второго процесса брались секционные ЭПЛ, скорректированные по результатам секционного анализа первого процесса с помощью формул (2) и (3).

Таблица

Примеры применения секционного анализа в технологии напыления многослойных оптических покрытий на установке Balzers 1401 в 2015-2016 гг.

№ пары однотипных процессов	Номер процесса	Код покрытия	Количество секций	Децимальный отрезок $\Delta^m(60:6)$, нм	Относительное изменение децимального отрезка $\Delta^m_N(60:6) / \Delta^m_{N+1}(60:6)$
1	N	SP680W33 4S	4	22,35	2,11
	N+1	SP690W33 4S	4	10,6	
2	N	SP690W33 4S	4	10,6	1,12
	N+1	SP690W33 4S	4	9,44	
3	N	SP 652L39 5S	5	8,4	1,09
	N+1	SP 652L39 5S	5	7,7	
4	N	SP 670L39 5S	5	12,7	1,51
	N+1	SP 670L39 5S	5	8,4	
5	N	SP580W28 4S	4	9,5	1,19
	N+1	SP580W28 4S	4	7,96	
6	N	SP587W33 4S	4	22,2	2,47
	N+1	SP585W33 4S	4	9,0	

Преимуществом применения метода секционного анализа является существенное улучшение крутизны склона многослойных отрезающих покрытий, получаемых на вакуумных установках с массовой системой контроля.

Недостатком метода можно считать необходимость проведения одного пробного процесса перед серией из нескольких однотипных, так как на основе анализа N процесса можно улучшить характеристики лишь следующего $N+1$ процесса.

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ УПАКОВКИ СЫРЦА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАКЦИОННОСВЯЗАННОГО НИТРИДА КРЕМНИЯ

Лисаченко М. Г., Рудыкина В. Н., Ганичев А. И., Забейжайлов А. О., Келина И. Ю.
АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Метод термопластичного литья кремниевых шликеров под давлением является одним из самых распространенных при формовании заготовок-сырцов для получения изделий из реакционносвязанного нитрида кремния (РСНК). Часто при литье сложнопрофильных или крупногабаритных изделий приходится вынужденно увеличивать долю связующего в шликере для улучшения его литейных характеристик. При этом уменьшается плотность упаковки частиц кремния в заготовках, что в дальнейшем сказывается на физико-механических свойствах конечных изделий. Исследованию влияния относительной плотности упаковки кремниевых частиц в сырце (коэффициента упаковки $K_{уп}$) на поведение изделий на дальнейших технологических этапах, а также свойствам получаемого материала посвящена данная работа.

Для приготовления шликера шихта на основе кремния смешивалась с временной технологической связкой, обеспечивающей хорошие литейные параметры при формовании образцов. В качестве связки была выбрана стандартная смесь углеводородов – воск (94 %) и парафин (6 %). Данная связка обеспечивает достаточные вязкостные параметры для формования изделий широкого профиля и удаляется из заготовок при термообработке на температурах ниже окисления кремния.

Были получены шликеры с массовой долей связки в интервале от 12,5 до 19 % (что соответствует изменению $K_{уп}$ с 73 до 62 %), из которых были отформованы шесть серий тестовых образцов – балок 10x10x65 мм. Состав минеральной части шликера не менялся. Каждая серия состояла из 25 образцов.

Определялись величины линейных усадок материала для всех серий на этапах формования и после реакционного спекания (азотирования) образцов. Средние по партиям усадки после формования не превышали 1 %. Наблюдалось небольшое увеличение величин усадок с ростом количества связки шликера, однако эффект очень слаб и сравним по величине с вариациями внутри одной партии.

Имеется значительное влияние плотности упаковки на степень усадки материала после удаления связки и азотирования. С уменьшением $K_{уп}$ величина усадки увеличивается и может достигать 2 %. Интересно, что при $K_{уп} = 70$ % и выше усадка после азотирования отрицательна. Т.е. после обжига наблюдается увеличение линейных

размеров образцов. По-видимому, в данном случае увеличение объема материала при азотировании уже не полностью компенсируется уменьшением пористости структуры.

Величина полной усадки сохраняет тенденцию к увеличению с уменьшением $K_{уп}$ кремния в шликере (рис. 1). Для исследованного интервала среднее по партии значение полной усадки изменяется от 0,5 до 2,3 %. При этом усадка по отдельным образцам варьируется от 0,2 до 2,6 %.

Усадка материала в ходе процесса изготовления образцов, а также исходная плотность сырцов, которые в свою очередь зависят от плотности упаковки кремния в шликере, определяют конечную плотность материала после азотирования. Поскольку плотность сырца линейно возрастает, а величина полной усадки монотонно падает с увеличением $K_{уп}$, то следует ожидать немонотонной зависимости плотности обожженных образцов от $K_{уп}$. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными (рис. 2).

При $K_{уп} = 68 - 69\%$ наблюдается минимум плотности конечного материала. При меньших $K_{уп}$ рост плотности обожженных образцов обусловлен более сильным уплотнением материала в результате усадки. Увеличение плотности при $K_{уп} > 69\%$ связано с преобладанием эффекта увеличения исходной плотности сырца над эффектом, связанным с усадкой.

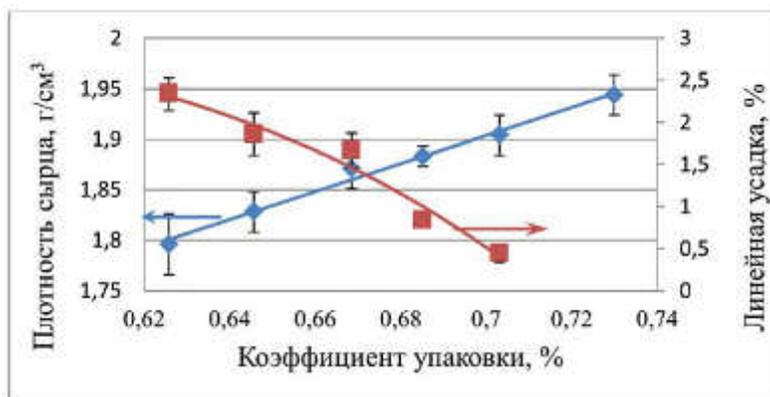


Рис. 1. Зависимости величин плотности сырца и линейной усадки материала от относительной плотности упаковки кремния в шликере

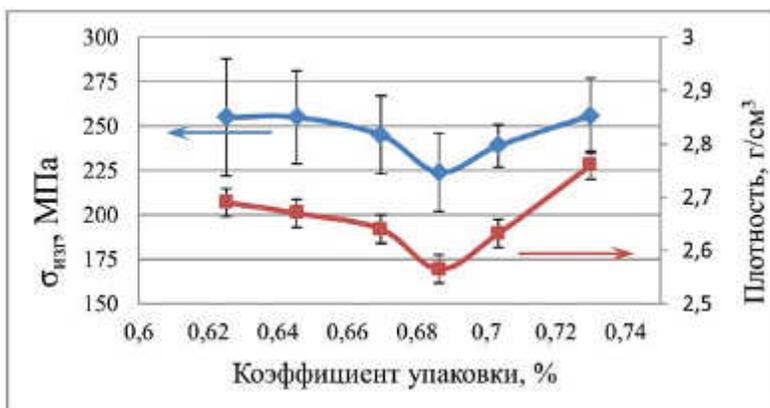


Рис. 2. Зависимости величин плотности и прочности на изгиб РСНК от относительной плотности упаковки кремния в шликере

Похожим образом ведет себя и величина средней прочности образцов на изгиб. Из приведенных данных можно сделать вывод о корреляции прочностных свойств материала с его плотностью. С увеличением плотности растет и прочность материала. Содержание связки в шликере сказывается также на стабильности прочностных свойств: увеличение доли связки приводит к росту коэффициента вариации величины прочности. Данный факт является следствием наблюдаемой нестабильности как исходной плотности сырца, так и усадки материала с повышенным содержанием связки. Такая особенность поведения материала может играть существенную роль в выборе количества связки при использовании материала для конкретного вида изделий.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕРМОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Строева О. А.¹, Апрощенко И. Г.¹, Никулина О. В.¹, Тюшина Н. Б.¹,
Степанов П. А.¹, Степанов В. А.²*

¹ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина»;

² ФГАОУ ВО «ИАТЭ НИЯУ МИФИ», г. Обнинск, Россия

Создание композиционных материалов с применением неорганических связующих является перспективным направлением в производстве высокотеплонагруженных конструкций ЛА. Материалы этого класса все шире используются в промышленности благодаря высоким физико-техническим свойствам, низкому коэффициенту термического расширения, высоким температурам эксплуатации. Для разработки перспективных КМ, материалов и технологий изготовления из них высокотермонагруженных элементов ЛА необходимо решение целого комплекса задач, таких как обеспечение герметичности и низкого влагопоглощения конструкции радиотехнического назначения. Одной из проблем использования данных типов материалов является сравнительно высокая пористость. Применяемые в настоящее время кремнийорганические системы ЛКМ типа КО, эмали и шпатлевки при температурах выше 600 °С не могут обеспечить заданные характеристики.

В последнее время определилась новая область материаловедения – высокотемпературные покрытия. К ним относятся стеклообразные, стеклокерамические, керамические и другие неорганические покрытия. Однако данный вид покрытий отработан и изучен только для защиты деталей из металлических сплавов. Что же касается применения для КМ, основными вопросами являются:

– проблема сцепления/адгезии покрытия с покрываемым композиционным материалом;

– технологии нанесения и термообработки покрытия остаются не разрешенными.

При разработке перспективных термостойких радиопрозрачных КМ в АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» было получено высокотермостойкое диэлектрическое покрытие на основе кварцевого шликера, кремнезоля и алюмохромфосфатного связующего марки КФШ-60.

Проведены исследования по оптимизации фазового состава покрытия и его структуры, работы по определению радиотехнических характеристик изделия с раз-

работанным покрытием, а также технологическая отработка метода нанесения, режимов термообработки покрытия. Проведена оценка эффективности выбранного покрытия и возможность его использования для перспективных элементов летательных аппаратов (РПО) из термостойких композиционных материалов.



Рис. 1. Образец (слева) с нанесенным неорганическим покрытием КФСШ-60, образец из КМ ХАФСкв (справа) без покрытия

Отработаны технологии получения КМ с нанесенным покрытием и изготовление на его основе различных конструкций ЛА, в том числе оболочек вращения сложной кривизны и широкополосных многослойных конструкций. Испытания в условиях высокоскоростного нагрева (скорость нагрева 200 °С/с) до 1500 °С показали сохранение конструкционной прочности композиционного материала. Перепад температуры при высокоскоростном одностороннем нагреве по толщине стенки образца ($d=8$ мм) из полученного КМ превышал 1300 °С.

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕРМОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАДИОПРОЗРАЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Атрощенко И. Г., Бородай Ф. Я., Мельников Д. А., Неповинных Л. К., Никулина О. В., Стародубцева Н. И., Степанов П. А.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Создание композиционных материалов с применением неорганических связующих является перспективным направлением в производстве высокотеплонагруженных конструкций ЛА. Материалы этого класса все шире используются в промышленности благодаря высоким физико-техническим свойствам и высоким температурам эксплуатации. Технология получения таких материалов сравнительно простая и не требует больших энергетических и материальных затрат.

В ходе научно-исследовательских работ по созданию перспективных термостойких радиопрозрачных КМ в АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» были получены различные типы неорганических материалов.

Композиционный материал ХАФС и его модификации представляют собой получаемые методами вакуумного или контактного формования стеклотекстолиты на основе неорганического связующего и текстурированного стеклонаполнителя (тканевого или цельнотканого). Для получения материалов разработаны разные виды аппретирующих составов текстурированных стеклонаполнителей на основе растворов кремнийорганических смол и неорганических аппретов. Отработаны технологии получения КМ и создание на его основе различных конструкций ЛА, в том числе оболочек вращения сложной кривизны и широкополосных многослойных конструкций.

При необходимости, для уменьшения пористости и обеспечения герметичности, КМ и конструкции на его основе могут быть дополнительно импрегнированы кремнийорганическими продуктами типа МФСС-8 или покрыты неорганическими составами (в виде шпатлевок). Также для обеспечения однородности структуры КМ апробированы методы ультразвуковой, вакуумной пропитки наполнителей при выкладке и заготовок после отверждения.

Испытания в условиях высокоскоростного нагрева (скорость нагрева до 200 °С/с) до 1500 °С показали сохранение конструкционной прочности композиционных материалов. На рис.1 приведена схема испытания. Перепад температуры при высокоскоростном одностороннем нагреве по толщине стенки образца ($d \sim 8$ мм) из полученного КМ превышал 1300 °С (на внутренней поверхности $\sim 100-150$ °С).



Рис. 1. Схема испытания образца при высокоскоростном одностороннем нагреве

В ходе проводимых научно-исследовательских работ из композитного материала ХАФС и его модификаций были изготовлены макеты перспективных теплонагруженных конструкций ЛА. На рис. 2 показана теплозащитная вставка для узла соединения шпангоут-обтекатель из композиционного материала ХАФС, на рис. 3 – многослойная радиопрозрачная широкополосная конструкция с применением композиционного материала ХАФС, на рис. 4 – макет трехслойного теплозащитного радиопрозрачного укрытия из композиционного материала ХАФС.



Рис. 2. Теплозащитная вставка для узла соединения шпангоут-обтекатель из КМ ХАФС

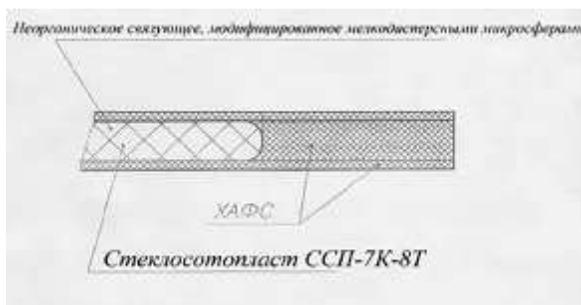


Рис. 3. Многослойная радиопрозрачная широкополосная конструкция из КМ ХАФС

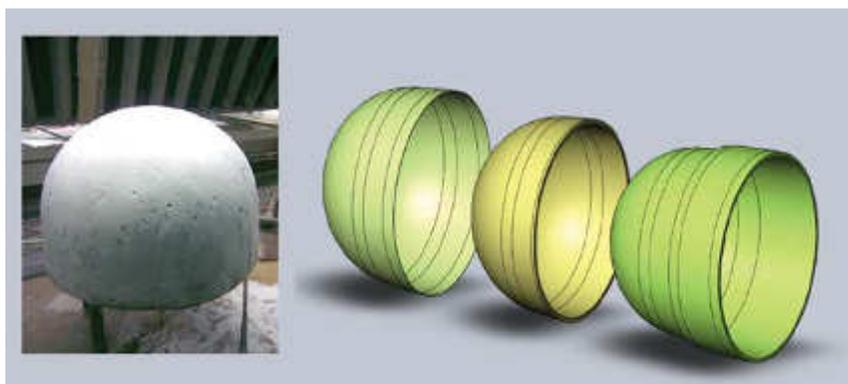


Рис.4. Макет трехслойного теплозащитного радиопрозрачного укрытия из КМ ХАФС

Экспериментальные исследования, проведенные на макетах и образцах, показали высокие диэлектрические и физико-механические характеристики как самих КМ ХАФС и его модификаций, так и изготовленных с его применением конструкций. Работоспособность таких элементов ЛА возможна при температурах 1300 °С (кратковременно до 60 с), 800 °С (длительно).

ВЫСОКОПЛОТНАЯ МЕЛКОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ КОРУНДОВАЯ КЕРАМИКА

*Алексеев М. К., Бизин И. Н., Куликова Г. И., Русин М. Ю., Саванина Н. Н.,
Горчакова Л. И., Шер Н. Е.*

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Для многих применений технической конструкционной керамики ключевыми свойствами являются плотность, прочность и твердость. Уровень значений этих характеристик во многом определяется размером кристаллов и количеством дефектов структуры материала.

Корундовая керамика, производимая в России, в большинстве случаев имеет относительную плотность до 97 %, остаточную пористость выше 3 % и размер зерна более 5 мкм. Для большинства объектов применения свойства такого уровня достаточны, однако существуют задачи, где требуются более высокие показатели.

К числу задач, где востребована высокоплотная мелкозернистая керамика, относится создание бронеконструкций. В этом случае такие характеристики, как плотность, прочность и твердость имеют определяющее значение.

В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» серийно производится керамика ТСМ-303 преимущественно электроизоляционного назначения с уровнем свойств, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Свойства корундовой керамики ТСМ-303

Содержание Al_2O_3 , масс. %	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Прочность при изгибе, МПа	Твердость, HV, ГПа	Размер зерна, мкм	Скорость звука, м/с
97,0	3,70-3,80	5,8	до 380	до 14	10 – 30	9600

Для создания высокоэффективных бронеконструкций требуется беспористый материал с более высокой прочностью и твердостью.

С целью получения материала с повышенным уровнем свойств были опробованы мелкозернистый высокочистый порошок глинозема марки «СТ 3000 LS SG» фирмы «ALMATIS» (Германия). Такой порошок содержит малое количество примесей (содержание Al_2O_3 – 99,8 %), имеет высокую удельную поверхность (~ 8 м²/г) и небольшой размер зерен (d_{50} ~ 0,5 мкм), что создает хорошие предпосылки для получения высокоплотной мелкокристаллической керамики.

Изучение поведения таких порошков в диапазоне температур 1200 – 1640 °С показало их высокую активность к спеканию, что позволяет достигать высоких значений плотности керамики без использования каких-либо спекающих добавок. Заметные процессы уплотнения и усадки скомпактированных образцов наблюдаются начиная с 1200 °С. Высокие значения плотности керамики (3,91–3,95 г/см³), близкие к теоретической, достигаются при обжиге 1540–1600 °С.

Технология изготовления образцов материала в виде пластин размерами 82×82×11 мм включает холодное полусухое прессование шихты на основе порошка

«ALMATIS» с добавлением небольших количеств водного раствора органического пластификатора, сушку образцов и обжиг при 1600 °С по режиму, обеспечивающему равномерный темп усадки образцов и максимальную плотность. Оптимизация режима была проведена на основе результатов исследования кинетики спекания и моделирования усадки при нелинейном подъеме температуры.

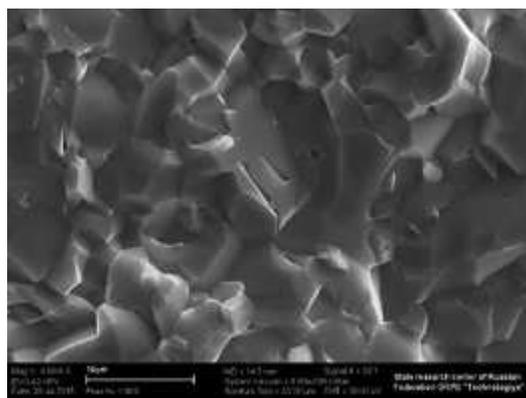
После спекания при температуре 1600 °С керамика имеет характеристики, указанные в табл. 2.

Таблица 2

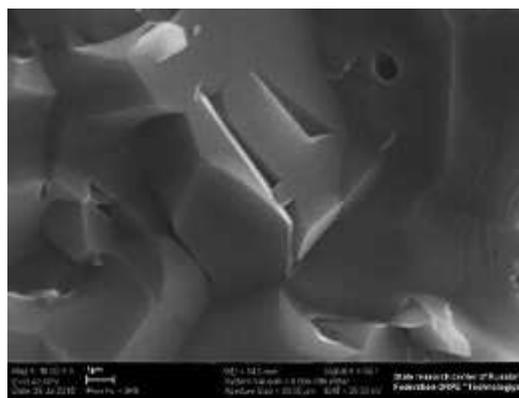
Свойства корундовой керамики, полученной из глинозема
«СТ 3000 LS SG»

Содержание Al_2O_3 , масс. %	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Прочность при изгибе, МПа	Средняя твердость, HV ГПа	Размер зерна, мкм	Скорость звука, м/с
99,8	3,95	0	400 – 440	18,8	1 – 7	10710

Микроструктура материала показывает высокую однородность по всему объему образцов при малом размере кристаллов (рис. 1а). Изучение поверхностей разрушения при механических испытаниях показало транскристаллитный характер разрушения материала. На поверхностях разрушения обнаруживаются единичные округлые поры субмикронного размера, которые можно отнести к закрытой пористости, но их количество крайне мало и может быть оценено величиной менее десятых долей процента от объема материала.



а



б

Рис. 1. Микроструктура материала при разных увеличениях

Дефектов, связанных с концентрацией примесей на границах зерен материала и выделением инородных фаз, не выявлено даже при увеличениях, позволяющих хорошо видеть субмикронную структуру (рис. 1б). Такая микроструктура обеспечивает высокие показатели прочности, микротвердости и скорости звука в керамике, которые определяют перспективу использования материала в бронеконструкциях, а также в керамических парах трения с высоким ресурсом работы.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ЗАДЕЛКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТЕРМОПАР НА ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА УСТАНОВКАХ РАДИАЦИОННОГО НАГРЕВА

Анучин С. А., Просунцов П. В., Забейайлов М. О., Ланин А. В., Кордо М. Н.
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

При измерении температуры поверхности контактными датчиками неизбежно возникает методическая погрешность, связанная с искажением температурного поля в месте установки датчика рядом факторов, таких как различие теплофизических характеристик материала образца и термопары (ТП), неидеальный тепловой контакт ТП с поверхностью образца, наличие термоцемента (ТЦ). Температура спаия термопары отличается от истинной, которую имел бы материал образца в той же точке, где расположена термопара, при ее отсутствии. В таких случаях измерение выполняется с методической погрешностью измерения температуры (МПИТ), величина которой может быть особенно большой в частично прозрачных материалах, нагреваемых излучением [1-4]. Как правило, эта погрешность возрастает с увеличением скорости нагрева и ее оценка крайне важна при испытаниях керамических материалов, работающих в экстремальных условиях.

Известные подходы [5, 6], основанные на использовании аналитических зависимостей, не учитывают многих особенностей реального процесса, например, теплообмен излучением между корольком ТП и образцом, наличие и геометрию слоя ТЦ. Использование для моделирования программ конечно-элементного анализа, например, Siemens PLM NX [7, 8], открывает новые возможности для расчетного определения методической погрешности и возможности её минимизации. В этой системе были построены восемь геометрических моделей крепления ТП (рис. 1а), после чего были созданы соответствующие конечно-элементные модели. Для моделирования применялся решатель «Space Systems Thermal». Моделировался нагрев образца галогеновыми инфракрасными лампами при плотности потока излучения 35 Вт/см^2 в течение 20 с (рис. 1б).

Для подтверждения результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования на установке радиационного нагрева, в которую устанавливался образец из кварцевой керамики. Источником нагрева служил блок галогеновых инфракрасных ламп. На поверхности образца устанавливались ТП типа К (хромель-алюмель) с диаметром термоэлектродов 0,2 мм, которые крепились ТЦ из жидкого натриевого стекла (ГОСТ 13078-81) с наполнителем из мелкодисперсного порошка Al_2O_3 . Для увеличения эффективности радиационного нагрева поверхность образца покрывалась поглощающим покрытием из оксида хрома.

Получено хорошее качественное и количественное подтверждение величины МПИТ поверхности термопарами при проведении тепловых испытаний на стендах радиационного нагрева. В результате расчетно-экспериментальных исследований выявлено, что из рассмотренных вариантов установки термопары для определения температуры поверхности образца при высокоинтенсивном одностороннем нагреве галогеновыми лампами рациональным является применение сваренной встык термопары с

нанесенным на нее тонким слоем ТЦ. Максимальная погрешность составила 59 К на момент времени 0,2 с, которая спадает практически до нуля на 5 секунде.

Для предотвращения отрыва термопары от поверхности образца вследствие различия ТКЛР материалов образца и термопары термоэлектроды на расстоянии 15 мм от спая следует помещать в кварцевые трубки, которые также закрываются слоем ТЦ. Использование термопар с корольком при отсутствии его надежного контакта с поверхностью образца может приводить к МПИТ более 200 К. Если корольк термопары имеет контакт с поверхностью образца, то МПИТ становится меньше 200 К. Дополнительное снижение методической погрешности (до – 108 К на начальном этапе и до + 10 К к концу режима) достигается полным закрытием королька термопары слоем ТЦ 1 мм.

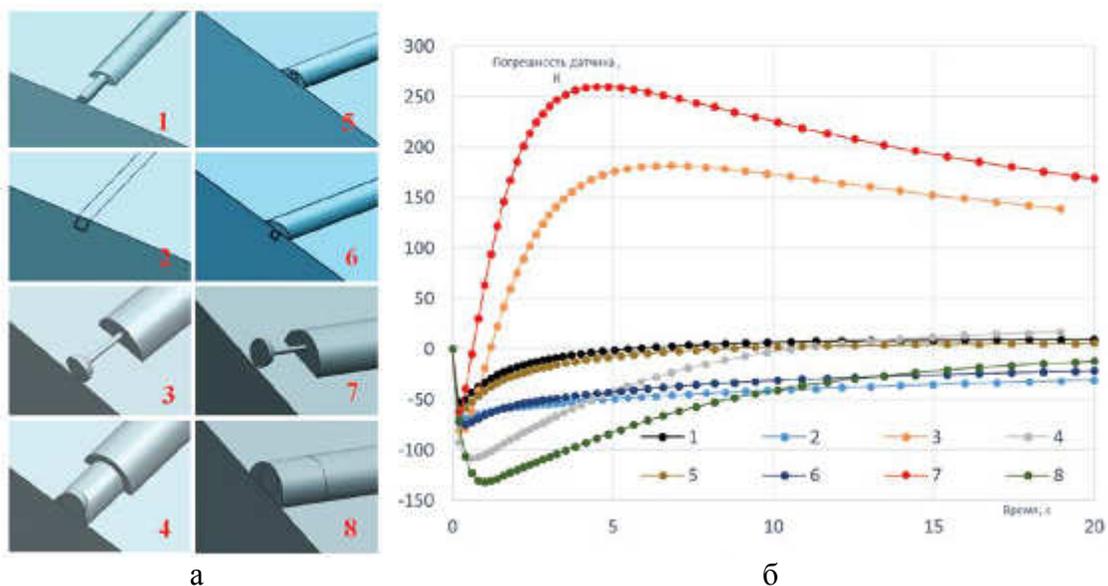


Рис. 1. Геометрические модели крепления ТП (а) и соответствующие им погрешности измерения температуры (б). Цифры на графике соответствуют номеру модели

Литература

1. Аверков Е.И., Емельянов А.А. Экспериментальная установка и методика измерения спектральных характеристик отражения теплозащитных материалов // Теплофизические исследования.– Новосибирск, 1977.– С.133–138.
2. Товстоног В.А. Оценка корректности расчетной модели теплопередачи в полупрозрачном светорассеивающем материале при нестационарном радиационном нагреве // Изв. вузов. Машиностроение.– 1983.– № 11.– С.42–44.
3. Анучин С.А. Физические закономерности изменения теплопроводности кварцевой керамики при интенсивных тепловых воздействиях.– Дис. ... канд. физ.мат. наук. Обнинск, 2015.– 155 с.
4. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Теплообмен и тепловые испытания материалов и конструкций аэрокосмической техники при радиационном нагреве.– М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.– 396 с.– ISBN 978-5-7038-3947-8.

5. Геращенко О.А. Температурные измерения: справочник.– Киев: Наук. Думка, 1989.– 704 с.

6. Гордов А.В. [и др.]. Точность контактных методов измерения температуры.– М.: Изд-во стандартов, 1975.– 232 с.

7. Гончаров П.С. [и др.]. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ.– М.: ДМК Пресс, 2014.– 504 с.

8. Жилкин В.А. Азбука инженерных расчетов в MSC.Patran-Nastran-Marc: учебное пособие.– СПб.: Проспект Науки, 2013.– 576 с.

РАСЧЁТ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ТИГЛЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА

Шкарупа И. Л., Рогов Д. А.

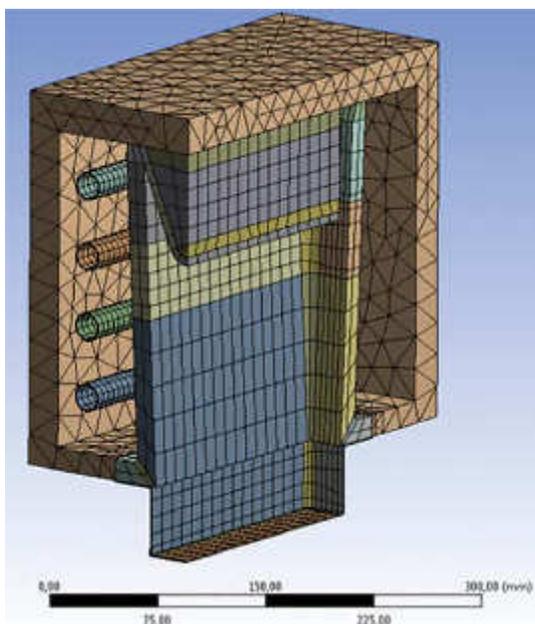
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В настоящее время не решена задача создания бесплатиновой технологии получения стекловолокна. Принимая во внимание высокую стоимость платиновых сплавов, проблема создания дешёвых керамических стеклоплавильных аппаратов (КСПА) требует скорейшего решения.

С целью определения оптимальной конструкции КСПА были проведены расчёты различных возможных вариантов.

КСПА должен обеспечивать:

- 1) возможность свободной загрузки в него стеклошариков;
- 2) эффективность разогрева и плавления стекла в плавильной камере (для обеспечения необходимой производительности), при этом недопущение попадания холодных шаров на горячую фильерную пластину;
- 3) равномерность нагрева стекломассы во всём объёме КСПА;



- 4) возможность свободного удаления газов из расплавленной стекломассы;

5) неравномерность температуры в нижнем сечении КСПА не более 5 °С. Ресурс работы КСПА должен составлять не менее 120 суток при температуре эксплуатации около 1450 °С.

Была выбрана расчетная модель ¼ части конструкции КСПА совместно с внешними теплоизолирующими стенками электронагревательной установки, а также четырьмя нагревательными элементами, представляющими собой полые металлические цилиндры (рис. 1).

Рис. 1. Расчетная модель ¼ части конструкции СЕТКА (30 тыс. узлов)

На расчетную конечно-элементную модель наложены граничные условия, имитирующие нагрев фильеры КСПА: полный прогрев нагревательных элементов до 1450 °С, прогрев нижней фильерной пластины до 1250 °С и условия радиационного теплообмена между стенками конструкции внутри двух ограниченных областей – полостью между стенками КСПА и внешней теплоизоляцией и полостью внутри КСПА, включающую в себя нижнюю фильерную пластину и керамический сепаратор. На рис. 2 представлено распределение температур в стекломассе, находящейся внутри конического сепаратора. Данный объем нагревается только за счет переизлучения между соответствующими поверхностями и выполняет роль предварительной камеры для размягчения и дальнейшего расплавления стеклянных шаров.

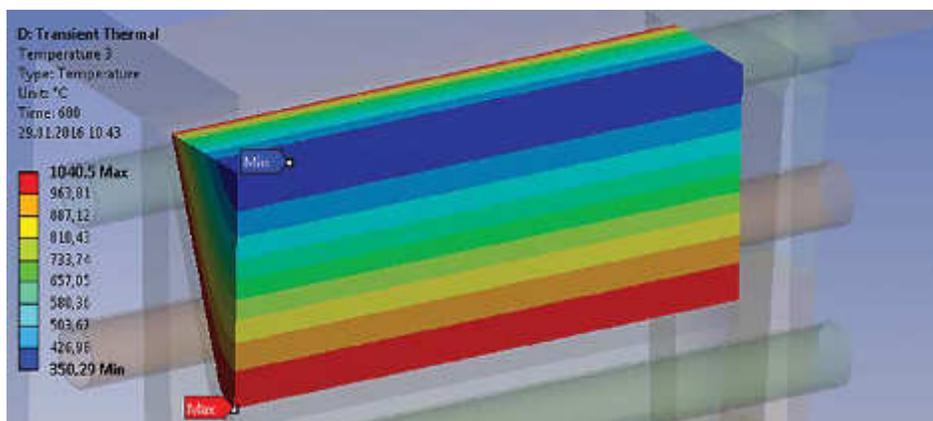


Рис. 2. Расчетная температура стекломассы в сепараторе на 600-ой секунде разогрева внутри сепаратора. Данное время соответствует массовому расходу $2,8 \text{ кг}/600 \text{ с} = 4,67 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{с} = 403 \text{ кг}/\text{сут}$.

В сравнении с аналогичным рисунком расчета идеального нагрева видно, что стекломасса прогрелась почти на 300 °С меньше (снижение за счет охлаждения внешних стенок тигля более чем на 40 %).

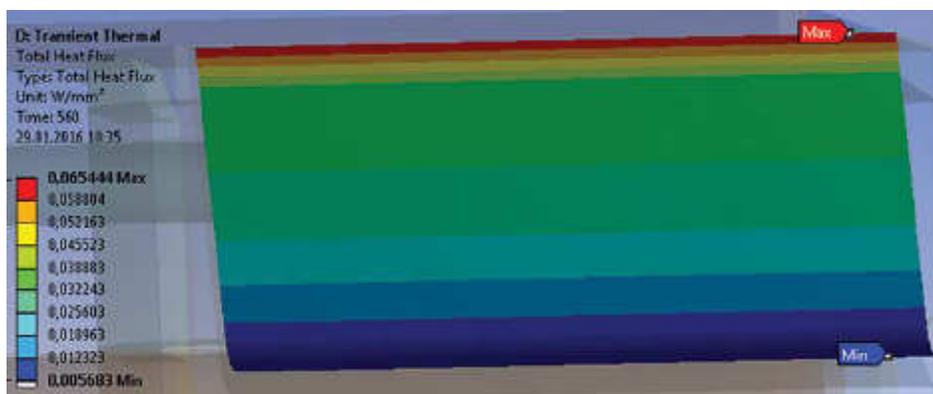


Рис. 3. Суммарный тепловой поток через стенку сепаратора на установившемся режиме прогрева, Вт/мм²

В сравнении с аналогичным рисунком расчета идеального нагрева видно, что тепловой поток почти на $10 \cdot 10^{-2}$ Вт/мм² меньше (снижение за счет охлаждения внешних стенок тигля более чем на 15 %).

Рекомендации по увеличению плавильной способности плавильной печи

Требуется изменить конструкцию плавильной части путём:

- 1) увеличения её объёма в 3 раза;
- 2) ухода от «двойной теплоизоляции» стенками самого тигля и стенками конуса;
- 3) организации «просвечивания» её лучистой энергией снизу, и, следовательно, её более эффективного прогрева, т.к. при данных температурах доля тепла, передаваемого за счёт лучистого теплообмена, во много раз больше, чем за счёт теплопередачи.

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ИНДЕНТИРОВАНИЯ

Фролова Т. С., Бородай С. П., Мишинова Т. А., Забейжайлов М. О.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Конструкционная керамика – хрупкий материал и её слабое сопротивление разрушению (распространению трещины) является зачастую основным фактором, сдерживающим её широкое применение в технике.

Технологам и конструкторам требуются дополнительные сведения о зависимости хрупкости от структурных факторов материала, поэтому необходима характеристика, определяющая сопротивляемость материала распространению имеющейся в нём трещины (инициированию начала разрушения). Трещиностойкость материала – способность материала работать в конструкции с трещиной, характеризуется величиной K_{1c} – коэффициентом интенсивности напряжений при плоской деформации [1]. Эта характеристика – важнейший количественный критерий разрушения высокопрочных материалов и характеризует сопротивляемость материала хрупкому разрушению.

Измерения и расчеты критических коэффициентов интенсивности напряжений, по которым оценивается трещиностойкость керамики, проводятся несколькими методами.

1. Метод поперечных надрезов в прямоугольных балочках, сущность которого заключается в определении величины критической нагрузки при изгибе образцов с надрезом в условиях хрупкого разрушения. Образец нагружается по схеме трехточечного изгиба силой, приложенной в сечении надреза. В процессе испытания ведется запись диаграммы деформирования образца. Данный метод хорош для определения коэффициента трещиностойкости материала в целом. Для вычисления коэффициента трещиностойкости используется формула:

$$K_{1c} = \frac{3Pl}{2bh} * Y \left(\frac{a}{h} \right) * \sqrt{a}, \quad (1)$$

где P - величина критической нагрузки, кгс;

l - расстояние между опорами, мм;

b - ширина образца, мм;

h - высота образца, мм;

a - глубина надреза образца, мм;

$Y(a/h)$ – функция, которая рассчитывается в зависимости от соотношения l/h .

2. Метод индентирования, суть которого состоит во внедрении в исследуемый образец индентора Виккерса с последующим измерением длины радиальных трещин (трещин Палмквиста) у отпечатков. Метод индентирования позволяет определять трещиностойкость отдельных зерен, если их размер больше размера отпечатка от пирамидки Виккерса хотя бы в 3-4 раза. Для вычисления коэффициента трещиностойкости используется формула:

$$K_{1C} = k * \left(\frac{HP}{l} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где k – безразмерная величина, зависящая только от геометрии индентора, и для пирамиды Виккерса равна 0,0446;

P – нагрузка на индентор, Н;

l – длина трещины от угла отпечатка, мкм;

H – микротвердость, МПа.

Для того чтобы измерения можно было проводить только с использованием твердомера, в расчетной формуле для коэффициента трещиностойкости игнорировался модуль Юнга (модуль нормальной упругости), вследствие чего результаты, полученные методом индентирования и методом поперечных надрезов отличаются на 20-40%. Однако модуль Юнга характеризует меру сопротивления материала упругой деформации и, соответственно, является существенной физической величиной, т.к. отражает многообразную структуру керамики и способен меняться благодаря наличию пор, второй фазы и т.д. [1]. Для вычисления коэффициента трещиностойкости с учетом модуля Юнга используется формула, представляющая собой полуэмпирическую зависимость Эванса - Чарльза:

$$K_{1C} = k * \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} * \left(\frac{P}{a^{3/2}} \right), \quad (3)$$

где k – безразмерная величина, зависящая только от геометрии индентора и для пирамиды Виккерса равна 0,016;

E – модуль упругости, МПа;

H – твердость, МПа;

P – нагрузка на индентор, кгс;

a – длина радиальных трещин, мкм.

Из сравнительной таблицы видно, что при использовании расчетной формулы для K_{1C} с учетом модуля упругости результаты, полученные двумя разными методами, согласуются очень хорошо.

Сравнение результатов K_{Ic} , полученных разными методами

Материал	K_{Ic} методом поперечных надрезов, МПа · м ^{1/2}	K_{Ic} методом без учета модуля Юнга, МПа · м ^{1/2}	K_{Ic} методом с учетом модуля Юнга, МПа · м ^{1/2}
Стеклокерамика (ОТМ-357)	1,3-1,5	2,2-2,5	1,4-1,5
ZrO ₂ +Y ₂ O ₃ (ОТМ-363)	7,6-8,1	6,4-7,1	7,8-8,0
Si ₃ N ₄ уплотненный (ОТМ-907)	4,3-5,2	5,2-5,6	4,2-5,3
B ₄ C (ОТМ-934)	3,1-3,3	3,5-4,3	3,0-3,3
SiC (ОТМ-933)	4,1-5,0	4,2-4,6	4,2-4,7
РСНК (ОТМ-931)	1,8-2,2	2,8-3,2	1,6-2,2

Таким образом, при расчете коэффициента интенсивности напряжений по формуле (3) разброс между результатами K_{Ic} , полученными разными методами, сократился до 5 – 10 %, что говорит о достаточно большой точности метода индентирования. При расчете без учета модуля Юнга (формула (2)) данный метод можно использовать как экспресс-метод для оценки трещиностойкости материала, отличающийся простотой измерений и относительной оперативностью. Для более точной оценки прочности как отдельных зерен и межзеренных границ, так и материала в целом необходимо принимать во внимание и определять модуль Юнга для каждого конкретного материала.

Литература

1. Хасанов О. Л., Струц В. К., Соколов В. М. и др. Методы измерения микротвёрдости и трещиностойкости наноструктурной керамики.– Томск: ТПУ, 2011.– 101 с.

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПЛОТНОЙ КЕРАМИКИ ИЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ МЕТОДОМ ИНЖЕКЦИОННОГО ФОРМОВАНИЯ

Якушкина В. С., Кораблева Е. А., Саванина Н. Н., Короткий С. А., Осипова М. Е., Плясункова Л. А., Бизин И. Н.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Керамика на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия, представляет интерес в качестве конструкционного материала, обладающего высокими механическими свойствами, такими как микротвёрдость, прочность при изгибе.

Создание и сохранение мелкозернистой (нано) структуры является условием высокой прочности материала и зависит от многих факторов: свойств исходного нанопорошка, его гранулометрического состава, морфологии, степени кристалличности, агломерированности, методов компактирования и высокотемпературного спекания.

Достижение высоких значений механических свойств керамики возможно при условии получения плотности материала, близкой к теоретической, и отсутствии пористости, которые зависят от всех этапов технологии – подготовки исходного порошка, режимов спекания, но определяющим является этап компактирования.

В данной работе проведено исследование влияния гранулирования наноразмерного порошка состава $ZrO_2 + 3 \text{ mol.}\% Y_2O_3$ в распылительной сушилке и компактирования методом инъекционного формования на получение максимальной плотности (близкой к теоретической) керамического материала при сохранении наноструктуры.

Получение наноразмерных порошков состава $ZrO_2 + 3 \text{ mol.}\% Y_2O_3$ проводили методом химического соосаждения из растворов хлористых солей циркония и иттрия. Для гранулирования наноразмерного порошка использовалась распылительная сушилка. Проведены фазовый и электронно-микроскопический анализы частиц и агломератов наночастиц гранулированного и негранулированного порошков. Изучены морфологическое строение, гранулометрический состав и удельная поверхность гранулированных и негранулированных порошков.

Установлено, что образцы, полученные из гранулированного наноразмерного порошка, спекаются до максимальной кажущейся плотности 5,98-6,0 г/см³ (или 98-99 % от теоретической плотности) в интервале температур 1450-1500 °С, что на 150-200 °С ниже, чем образцы, полученные из негранулированного наноразмерного порошка.

Показано, что керамический материал, полученный из гранулированного порошка и спечённый в интервале температур 1450-1500 °С, сохраняет наноструктуру и состоит из кристаллитов ~ 100 нм. Микроструктура керамического материала, полученного из негранулированного порошка, образована агломератами с размером зерен 1-4 мкм.

Установлено, что метод инъекционного формования обеспечивает однородное компактирование порошка состава $ZrO_2 + 3 \text{ mol.}\% Y_2O_3$, что подтверждается данными измерения микротвёрдости спечённой керамики. Приведены графики изменений значений микротвёрдости керамических материалов, полученных из гранулированного и негранулированного порошков, по сечению образцов. Электронно-микроскопическое исследование структуры различных зон поверхностей скола образцов, полученных из гранулированных и негранулированных порошков, выявило различие. В структуре образцов, полученных из негранулированных порошков, наблюдаются зоны неоднородностей в виде локальных уплотнений агломератов частиц и пористости различного типа. Структура керамики, полученной из гранулированных порошков, во всех исследуемых зонах достаточно равномерная и однородная по размеру и морфологии зерен.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИИ ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ МАГНИЙАЛЮМОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА

Судальцев Е. И., Зайчук Т. В., Вандрай С. Н., Устинова Ю. С.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Исследованы реологические характеристики ВКВС на основе магнийалюмосиликатного стекла с использованием в качестве диспергатора натриевой соли полиакриловой кислоты, условно обозначенной Р1, имеющей плотность – 1,25 г/см³, рН=7,5 и среднюю молекулярную массу 5200 г/моль.

Для приготовления водных суспензий использовали стекло магнийалюмосиликатного состава ОТМ-554 (ТУ 1-596-488-2012). Стекло измельчали в шаровой мельнице с корундовой футеровкой путем мокрого помола при загрузке мелющих тел и материала 4:1 с поэтапной загрузкой измельчаемого материала (1/2, 1/4 и 1/4 от общей загрузки материала). Весь объем водного раствора диспергатора вводили на первой стадии помола.

Основными критериями при подборе необходимых количеств дисперсионной среды (воды) и натриевой соли полиакриловой кислоты Р1 служили значения плотности и условной вязкости суспензии, обеспечивающие получение отливок с высокой плотностью и низкой пористостью, для получения высокоплотного беспористого материала при термической обработке.

Для достижения оптимальных литейных параметров суспензий потребовалось вводить от 19 до 25 % дистиллированной воды и от 0,2 до 0,4 % натриевой соли полиакриловой кислоты Р1, рассчитанных от массы измельчаемого материала.

В таблице представлены примеры суспензий, их параметры в зависимости от длительности стабилизации, содержание твердой фазы и свойства полученных отливок.

Таблица

Параметры суспензий и свойства отливок

$\tau_{\text{стаб.ч}}$	Свойства суспензий		C_V	Свойства отливок	
	$\eta_{\text{усл.}}$, Па·с	$\rho_{\text{сусп.}}$, г/см ³		$\rho_{\text{каст.}}$, г/см ³	Π , %
0,2 мас.% Р1 – 25 % H ₂ O					
23	0,10	1,96	0,56	1,90	28,76
43	0,11	1,98	0,58	1,86	30,23
65	0,14	1,99	0,59	1,85	30,61
0,3 мас.% Р1 – 19,5 % H ₂ O					
16	0,33	2,13	0,65	-	-
22	0,27	2,12	0,64	2,06	22,64
40	0,24	2,12	0,63	2,06	22,68
47	0,25	2,12	0,65	-	-
65	0,23	2,12	0,65	2,05	22,87
0,4 мас.% Р1 – 23 % H ₂ O					
29	0,25	2,07	0,64	-	-
47	0,19	2,07	0,63	-	-
71	0,18	2,07	0,63	1,90	28,70

В таблице использованы следующие обозначения:

$\tau_{\text{стаб}}$ - длительность стабилизации суспензии;

$\eta_{\text{усл}}$ - условная вязкость суспензии;

$\rho_{\text{сусп}}$ - плотность суспензии;

C_V - объемная концентрация твердой фазы;

$\rho_{\text{каж}}$ - кажущаяся плотность отливок;

Π - открытая пористость отливок.

Отливки с наибольшей плотностью и наименьшей пористостью получены из суспензий с добавлением P1 в количестве 0,3 мас.% и дистиллированной воды в количестве 19,5 %.

Реологические кривые, построенные для суспензий, стабилизированных в течение 16 – 65 часов, представлены на рис. 1.

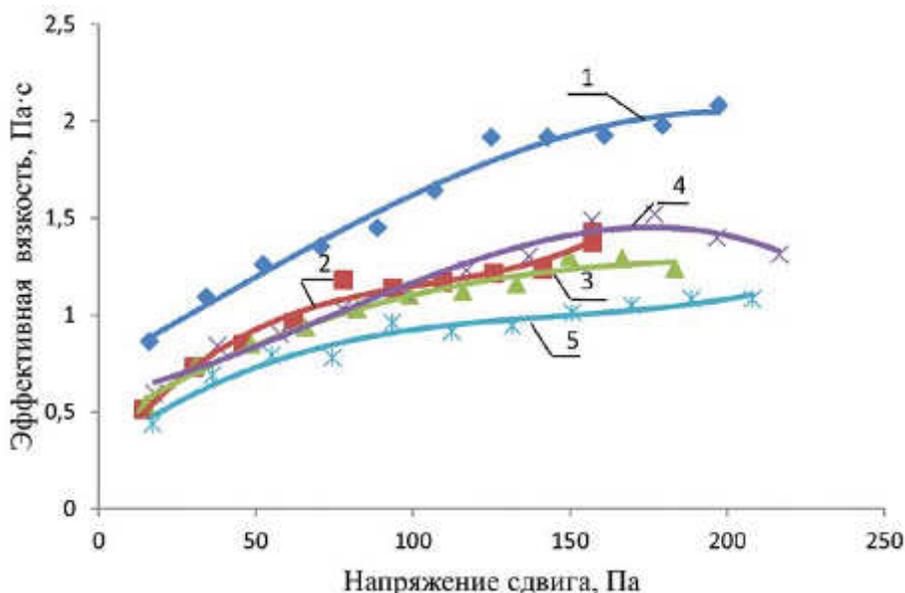


Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости от напряжения сдвига стабилизированных суспензий (содержание P1 – 0,3 мас.%, время стабилизации: 1 - 16 ч, 2 - 22 ч, 3 - 40 ч, 4 - 47 ч, 5 – 65 ч)

Суспензия, стабилизированная в течение 65 часов, имеет дилатантное течение с установившейся равновесной вязкостью дилатантного деформирования. На графике вязкости можно выделить участок относительно постоянной вязкости при достижении определенных граничных значений напряжения сдвига. При стабилизации удаляется рыхлосвязанная вода с частиц твердой фазы и переходит в свободное состояние, что позволяет снизить вязкость и дилатансию суспензии. Высокая плотность и продолжительное время набора отливок указывают на агрегативную устойчивость суспензии.

Наилучшими свойствами обладает суспензия, полученная при минимальном количестве введенной воды – 19,5 % с добавкой P1 в количестве 0,3 мас.%. Суспензия имеет высокую плотность – до 2,13 г/см³ и высокое содержание твердой фазы – 0,65.

Отливки, отформованные из данной суспензии, обладают высокой плотностью 2,06 г/см³ и низкой пористостью, менее 23 %, которые обеспечивают получение высокоплотного материала с минимальными усадочными явлениями.

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ МОНОХРОМАТИЧЕСКОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ НЕПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Миронов Р. А., Ланин А. В., Крюков А. Е., Забейжайлов М. О.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Основной характеристикой излучающей поверхности непрозрачного материала является ее излучательная способность, которая характеризует спектральную плотность потока теплового излучения поверхности нагретого объекта по отношению к спектральной плотности потока теплового излучения абсолютно черного тела. Нормальная монохроматическая излучательная способность (далее ИС) характеризует излучение объекта, измеренное в направлении нормали к его поверхности в узком интервале длин волн [1].

В работе рассмотрен простой метод определения ИС непрозрачных для теплового излучения материалов, основанный на одновременном измерении температуры поверхности объекта при помощи термопары и пирометра частичного излучения. Приведены результаты для керамики на основе нитрида кремния в диапазоне температур 770 – 1300 °С и оценка погрешности.

Измерения проводились при помощи пирометра частичного излучения modline 5 (IRCON) с эффективной длиной волны 0,85 – 1,1 мкм в режиме одностороннего нагрева (рис. 1).

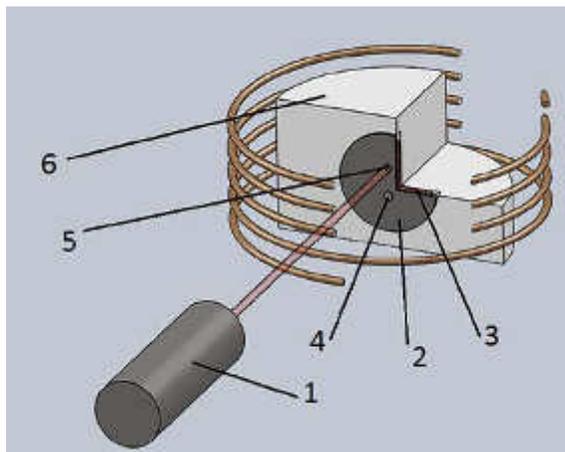


Рис. 1. Измерение монохроматической излучательной способности.

- 1 – пирометр,
- 2 – исследуемый образец,
- 3 – промежуточный нагреватель,
- 4 – место крепления термопар,
- 5 – область регистрации,
- 6 – теплоизоляция

Исследуемый образец представлял собой диск диаметром 40 мм и толщиной 1 мм. Он нагревался при помощи промежуточного элемента - диска из нихрома толщиной 2,5 мм и диаметром 30 мм. Оба диска располагались соосно и находились в непосредственном контакте друг с другом. Нагрев производился индуктором с автоподстройкой частоты. Температура образца измерялась термопарой (ХА). Пирометр располагался на расстоянии ~330 мм от поверхности образца таким образом, чтобы размер области регистрации составлял ~1,5 мм. Область регистрации располагалась симметрично положению термопар относительно центра образца. При каждом значении температуры на образце (по показаниям термопары) производилась подстройка ИС пирометра таким образом, чтобы показания пирометра и термопары совпадали. Максимальная температура рассматриваемого способа ограничена тремя факторами. Во-первых, температурой

плавления нагревателя, которая для нихрома составляет ~ 1400 °С. Во-вторых, диапазоном работы термопар ХА, который ограничен температурой ~ 1350 °С. В-третьих, максимальной температурой работы теплоизоляционного материала. Температурный диапазон может быть расширен до 1800 °С и более при использовании промежуточного нагревателя из проводящей высокотемпературной керамики и платинородиевых термопар или спектральных пирометров [2] в качестве датчика температуры.

Сигнал пирометра частичного излучения (Φ) пропорционален тепловому потоку, падающему на него. Тогда для ИС (ε):

$$\varepsilon = \Phi \cdot A / B; \quad B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b(\lambda, T) d\lambda,$$

где $b(\lambda, T)$ – спектральная плотность излучения абсолютно черного тела, λ_1 и λ_2 – длины волн, ограничивающие диапазон чувствительности приемника, A – коэффициент пропорциональности.

Вариация излучательной способности с температурой выражается:

$$\delta\varepsilon = \frac{\Phi \cdot A}{B^2} \cdot \frac{\partial B}{\partial T} \delta T$$

Отсюда для относительной погрешности определения излучательной способности получим:

$$\delta\varepsilon/\varepsilon = \left(\frac{B' \cdot T}{B}\right) \cdot \delta T/T, \quad B' = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial b(\lambda, T)}{\partial T} d\lambda$$

Относительная погрешность определения температуры складывается из двух составляющих: погрешности термопарных измерений ($\delta T/T = 0,005$) и погрешности измерения температуры пирометром ($\delta T/T = 0,006$).

Суммарная относительная погрешность определения температуры составляет, таким образом, 0,011. Расчет по формуле (1) показал, что относительная погрешность метода в диапазоне температур 800-2000 °С падает с 14 до 7 % (рис. 2б).

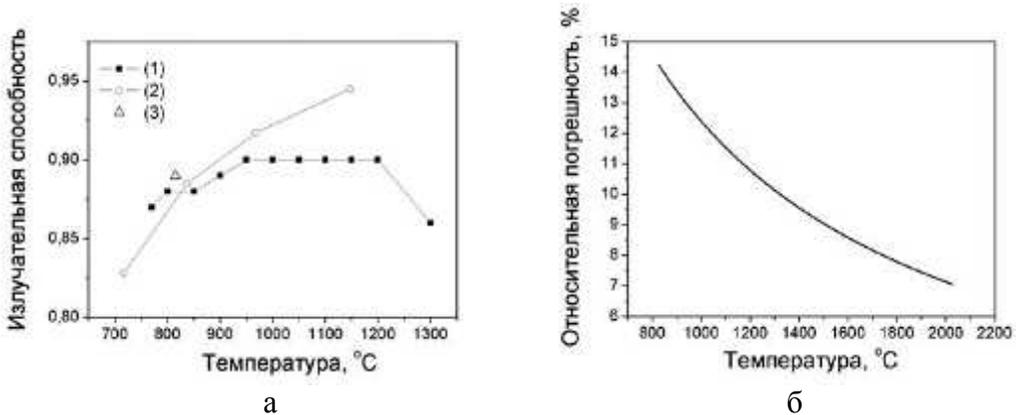


Рис. 2. – Температурная зависимость монохроматической излучательной способности керамики на основе нитрида кремния (а): результаты настоящей работы (1), литературные данные работ [3]⁽²⁾ и [4]⁽³⁾, относительная погрешность определения излучательной способности, рассчитанная по формуле (1) – (б)

Апробация данного способа на керамике на основе нитрида кремния (рис. 2а) показала результаты, близкие к литературным данным [3, 4]. Преимуществом метода является простота его реализации и то, что измерения проводятся в воздушной атмосфере.

Литература

1. Оцисик М.Н. Сложный теплообмен.– М.: МИР, 1976.– 615 с.
2. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия // Приборы и техника эксперимента.– 2009.– № 4.– С.5–28.
3. Neuer G. Spectral and Total Emissivity Measurements of Highly Emitting Materials // Int. J. Thermophysics.– 1995.– V.16(1).– P.257-265.
4. Ravindra N.M. et al. Temperature - dependent emissivity of silicon - related materials and structures // IEEE Trans.on Semiconductor Manufacturing.– 1998.– V.11(1).– P.30-39.

СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕАКЦИОННОСВЯЗАННОГО КАРБИДА БОРА

Голубева Н. А., Келина И. Ю., Плясункова Л. А., Журавлев А. А.
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Композиционная керамика на основе карбида бора характеризуется высокой твёрдостью, высокотемпературной прочностью, способностью выдерживать интенсивные динамические нагрузки, химической инертностью, полупроводниковыми характеристиками, защитными свойствами от нейтронного излучения. Это обусловило её широкое применение в ударостойких конструкциях, процессах механической обработки, радиоэлектронной, атомной и других отраслях промышленности.

Вместе с тем, метод горячего прессования, который применяется для изготовления высокоплотных материалов на основе B_4C , существенно ограничивает область их применения и требует дорогостоящей механической обработки. Также основной трудностью при получении высокопрочной карбидокремниевой керамики является и отсутствие отечественных высокочистых порошков B_4C .

В качестве альтернативы горячепрессованному B_4C активно разрабатывается керамика на основе реакционносвязанного карбида бора в системе Si-SiC- B_4C , получаемая силицированием пористой заготовки, содержащей смесь порошков B_4C и C в интервале температур от 1400 до 1700 °С. Технология реакционного связывания наиболее привлекательна с точки зрения возможности использования грубых крупнодисперсных порошков, отсутствием линейной усадки, что позволяет получать изделия в размер без механической обработки.

Целью настоящей работы было получение материалов на основе реакционносвязанного карбида бора с высокими физико-механическими характеристиками из различных видов сырья. Впервые были использованы порошки карбида бора отечественного производства ОАО «УНИХИМ с ОЗ», г. Екатеринбург, и порошки B_4C производства ПАО «Запорожбразив», Украина. С целью получения максимальной упаковки частиц в заготовке использовали смесь порошков разного гранулометрического

состава. Количественное соотношение крупной и мелкой фракции для всех составов оставалось неизменным и составляло 2:1.

Экспериментальные образцы получали методом полусухого прессования с последующим силицированием в вакууме при температуре 1550 °С. Составы материалов, исследуемых в работе, и их физико-механические свойства представлены в таблице.

Как видно из таблицы, значения кажущейся плотности для всех составов находятся в интервале 2,49-2,6 г/см³.

Таблица

Физико-механические свойства материалов на основе В₄С

Зернистость порошка по FERRA	Плотность заготовки, г/см ³		Плотность керамики, г/см ³		Прочность при изгибе, МПа		Критический коэффициент интенсивности напряжений K _{1C} , МПа×м ^{1/2}		Микротвердость, ГПа	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Производитель порошков*:										
F 150/F1500	1,55	1,72	2,53	2,50	200	180	4,7	3,5	31	35
F 220/F1500	1,49	1,70	2,57	2,53	230	220	4,5	3,5	31	33
F 240/F1500	1,63	1,70	2,55	2,54	330	260	4,0	3,4	28	26
F 320/F1500	1,45	1,66	2,58	2,56	350	280	3,7	3,0	24	23

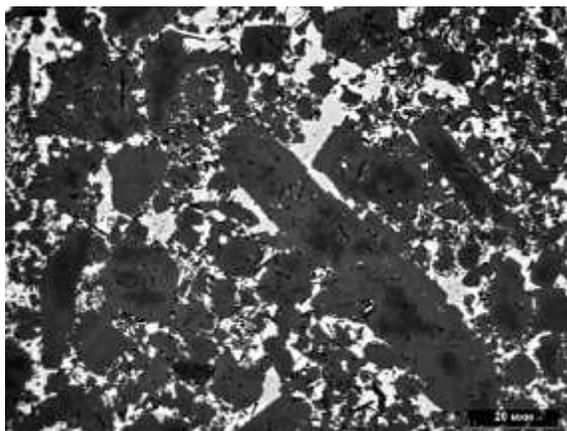
* 1- ОАО «УНИХИМ с ОЗ»; 2- ПАО «Запорожабразив»

Значения предела прочности при статическом изгибе и критического коэффициента интенсивности напряжений образцов, полученных из порошков ПАО «Запорожабразив», не превышают 280 МПа и 3,5 МПа×м^{1/2}. Наилучшие результаты по прочности и K_{1C} отмечены для состава F 320/F1500 из смеси порошков ОАО «Унихим с ОЗ», 350 МПа и 4,7 МПа×м^{1/2}, соответственно. Микротвердость основной фазы существенно зависит от размера зерна крупной фракции. Так, для составов с содержанием фракции F150 твердость выше, чем для составов с содержанием фракции F 320. Максимальные значения микротвердости характерны для состава F150/F1200 на основе порошков ПАО «Запорожабразив» и достигают 35 ГПа.

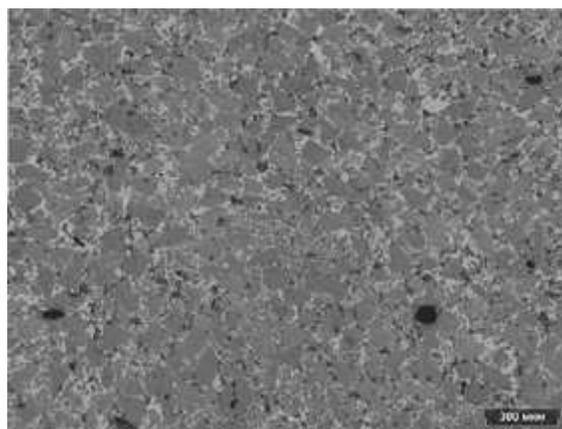
По данным РФА все образцы состоят из основной фазы ромбоэдрического карбида бора структуры В₁₃С, В₁₀С сложных соединений В₁₂(C,Si,B)₃, В_{12,97}С_{2,88}Si_{0,35} (в виде твердых растворов карбида кремния в карбиде бора), карбида кремния β-SiC и небольшого количества кремния Si куб.

Электронно-микроскопические и оптические исследования показали, что в образцах на основе порошков ОАО «УНИХИМ с ОЗ» микроструктура образована призматическими зернами вытянутой морфологии размером от 50 до 100 мкм и зернами неопределенной формы размером ~ 3 – 10 мкм. Вытянутые зерна карбида бора имеют преимущественную ориентацию параллельно плоскости прессования (рис.а). Такая микроструктура механически препятствует распространению трещины, изменяя её траекторию или затупляя её вершину, и тем самым снижает концентрацию напряжений. Микроструктура образцов на основе порошков ПАО «Запорожабразив» однородная, образована крупными и мелкими зернами обломочной морфологии, которые формируют плотный карбидный каркас (рис. б).

Различие в формировании микроструктуры определяет различия в физико-механических свойствах, более высокие значения которых показывают преимущество ориентированной структуры материала.



а



б

Рис. Микроструктура образцов состава F 150/F1500:
а – порошки ОАО «УНИХИМ с ОЗ»;
б – порошки ПАО «Запорожабразив»

Таким образом, в результате проведенной работы показана возможность получения керамики на основе реакционносвязанного карбида бора с высокими физико-механическими характеристиками из порошков различных производителей. Полученная керамика имеет однородную структуру, высокие значения микротвердости (23-35 ГПа), низкую плотность (2,50 - 2,60 г/см³) и предел прочности при статическом изгибе на уровне 180 – 350 МПа и может конкурировать с керамикой на основе реакционносвязанного карбида кремния.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ ГЕРМЕТИКА ВИКСИНТ У-2-28 НТ В КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ С СУБСТРАТАМИ ИЗ РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Неповинных В. И., Цвєрава В. Г., Русин М. Ю.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Известно, что при тепловом старении в результате термоокислительной деструкции отвержденный герметик теряет вес. Величина и интенсивность потери веса зависят в основном от температуры, длительности ее воздействия и диффузионных процессов, отвечающих за тепло- и массообмен с окружающей средой. Однако, если тепловое старение герметика происходит в случае использования его как адгезива, то диффузионные процессы будут носить более сложный характер. Например, в [1] было показано, что термодеструкция герметика в клеевых соединениях металл-стеклоке-

рамика и металл-кварцевая керамика с пропиткой существенно отличаются друг от друга, что отражается и на прочности клеевого соединения. В рассматриваемом случае это различие было обусловлено различной пористостью керамических субстратов. В случае беспористых материалов увеличивается относительный вклад диффузионных процессов в механизмы, приводящие к химической и структурной модификации приповерхностных слоев как адгезива, так и субстрата [2]. В этом случае можно ожидать, что и термодеструкция герметика, включая потерю его веса, будет происходить по несколько иным механизмам, которые при прочих равных условиях будут зависеть от материала подложки.

Для проверки этого предположения были определены потери веса герметиком в клеевых соединениях в результате теплового старения (т/с), в которых в качестве субстратов использовались алюминий, медь, ковар и стекло. Характеристики образцов, режим и результаты испытаний приведены в таблице. В таблице также приводятся результаты испытаний образца в виде пластины отвержденного герметика.

Таблица

Потери веса герметиком в склейках с различными материалами в результате теплового старения при температуре $(300 \pm 3)^\circ\text{C}$ в течение 70 ч (среднее значение по 5 образцам)

№ п/п	Материал	Вес склейки до т/с, г	Толщина листа, мм	Шероховатость Ra, мкм	Размер листа, мм	Толщина слоя герметика, мм	Потеря веса герметиком, %
1	Алюминий (отожженный)	2,45	0,5	0,488	32 x 20	≈ 1,0	5,81
2	Медь (хладокатанная, отожженная)	2,87	0,2	0,196	32 x 20	≈ 1,0	7,01
3	Ковар (лента)	4,48	0,4	0,261	32 x 20	≈ 1,0	5,31
4	Стекло (3 образца)	4,30	1,4	0,005	32 x 20	≈ 1,0	7,37
5	Герметик (отвержденная пластина)	0,94	≈ 1,5	-	32 x 13	-	6,50

Из таблицы следует, что при заданном режиме теплового старения потери веса герметиком в клеевых соединениях с субстратами из различных материалов незначительно отличаются от потери веса пластиной герметика. Возможно, эти различия оказались бы существеннее при более жестких режимах испытаний (более высокая температура, большая длительность). Тем не менее анализ фрактограмм поверхностей разрушения исследуемых клеевых соединений показывает, что процесс деградации герметика у разных субстратов проходит по разному. Наиболее существенные различия у металлических субстратов наблюдаются между склейками из ковара и меди. Различия эти проявляются прежде всего в количестве пор и их распределении по поверхности разрушения, что может быть обусловлено только особенностями диффузионных процессов. Обращает на себя также внимание характер разрушения образца с субстратом из стекла.

Образец примерно на 80 % разрушился визуально адгезионно (рис. стекло). И только на основании исследований [1] можно предположить, что возникновение темного пятна в центре образца связано с интенсивным процессом термодеструкции герметика в этой зоне. Удаление тонкого слоя герметика в зоне пятна подтвердило это предположение.

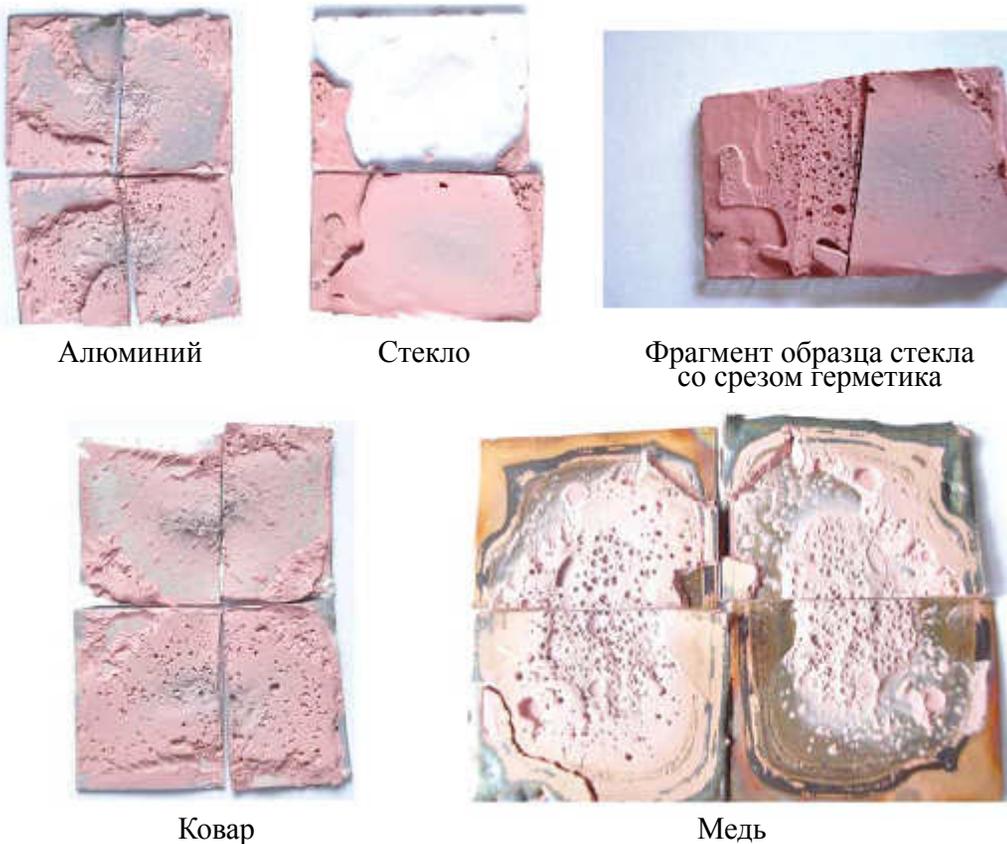


Рис. Фрактограммы поверхности разрушения исследуемых образцов

Обращает на себя внимание и то, что большая потеря массы наблюдается в склейках с меньшим значением шероховатости субстрата (стекло, медь). Действительно, в работе [1] отмечалось, что процессы деструкции в склейке начинаются в центральной зоне и резко уменьшаются к периферии, где облегчен выход газообразных продуктов деструкции из области развития экзотермической реакции разложения. Увеличение шероховатости субстрата также облегчает выход газов и снижает тем самым интенсивность процесса деструкции и потерю массы герметика.

Литература

1. Цварава В.Г., Неповинных В.И. и др. Фрактография поверхностей разрушения клеевых соединений после высокотемпературного теплового старения // Клеи. Герметики. Технологии.– 2009.– № 2.– С. 8-11.
2. Повстугар В.И., Кодопов В.И. и др. Строение и свойства поверхности полимерных материалов.– М.: Химия, 1988.– 190 с.

АКТИВНАЯ ПАЙКА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ГЕРМОВВодОВ СЛОЖНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Шер Н. Е.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В современной технике все более востребованы сложные металлокерамические гермовводы, представляющие собой либо высоковакуумное устройство, либо одну из крупных составных частей этого устройства. Наибольший интерес представляют крупногабаритные гермовводы, предназначенные для эксплуатации при высоких напряжениях. Однако большие размеры керамических изоляторов и металлических комплектующих, входящих в конструкцию таких узлов, накладывают значительные ограничения на спектр применяемых в них материалов и создают большие технологические сложности, особенно в случае, когда крупногабаритные металлокерамические узлы (МКУ) имеют несколько разнотипных спаев.

Существуют две основные технологии соединения разнородных материалов, таких как керамика и металлы – пайка предварительно металлизированной керамики металлическими припоями и активная пайка. Технология пайки предварительно металлизированной керамики предполагает сначала вжигание на ее поверхности порошков тугоплавких металлов со стеклофазой в окислительно–восстановительной атмосфере, а затем – пайку керамики с металлической комплектующей металлическим припоем. Однако при наличии в металлизационном покрытии стеклофазы, размягчающейся при температуре пайки и мигрирующей из слоя металлизационного покрытия, технологически трудно обеспечить высокую герметичность шва. Это вынуждает проводить процесс в жестких температурно-временных рамках, что не всегда возможно при пайке крупногабаритных и сложных вакуумно-плотных металлокерамических конструкций.

Технология активной пайки предусматривает непосредственную пайку керамики с металлом припоями, содержащими активную добавку – титан или цирконий. К преимуществам этой технологии можно отнести меньшее количество стадий подготовки комплектующих и значительное расширение температурно-временных границ проведения процесса, что особенно важно при пайке крупногабаритных и сложных МКУ. Вместе с тем, в процессе такой пайки активные металлы способны образовывать с другими металлами хрупкие интерметаллические соединения, и это может приводить к появлению микротрещин в шве и низкой герметичности узла. Поэтому разработка технологии, исключающей образование интерметаллидов при активной пайке МКУ, является актуальной задачей.

В конструкцию разрабатываемого гермоввода входят три изолятора диаметрами 128, 36 и 32 мм и четыре металлические комплектующие из сплава 29НК (ковар), при этом сопряжение изоляторов с коваровыми деталями проходит по пяти швам: охватываемому (диаметр - 128 мм), охватываемому (диаметр – 41 мм) и трем торцевым (внешний диаметр – 36 мм).

Вакуумно-плотные изоляторы, которые были использованы в настоящей работе в конструкции МКУ, получены из корундовой керамики ТСМ-303 с применением ме-

тогда квазиизостатического прессования и имеют низкую газопроницаемость по гелию – $Q=(3-4) \cdot 10^{-12}$ Па·м³/с ((2,2–3)·10⁻⁸ л·мкм рт. ст./с).

В качестве основы припоя была выбрана медно–серебряная эвтектика с температурой плавления 779 °С (припой ПСр-72), а в качестве активной добавки - гидрид титана. Активную добавку в виде мелкодисперсного порошка с органической связкой наносили на поверхность керамики в области шва слоем толщиной 20-50 мкм. Медно-серебряный припой использовали в виде фольги и закладывали непосредственно в шов с припуском 1 мм по обе стороны шва. Раздельное применение основного припоя и активной добавки позволяет варьировать количество вводимого титана и ограничивать зоны смачивания керамики припоем. Содержание титана в припое варьировали от 2 до 10 % масс., температуру пайки - от 820 до 865 °С, выдержку при максимальной температуре - от 1 до 10 минут. Нагрев узла проводили в вакуумной печи с вакуумом не выше 10⁻² Па.

Узлы, спаянные припоем с содержанием титана 10 % масс. при температуре 855±10 °С и выдержке 10 минут, имеют натекание менее 3·10⁻¹² Па·м³/с при испытании методом гелиевого обдува. Испытания МКУ на механическую прочность проводили методом отрыва металлической детали от керамики. На всех узлах разрушение паяных швов происходило по керамике, что указывает на высокую прочность соединения, соизмеримую с прочностью керамики. Микроструктура паяного шва приведена на рисунке, где зона 1 соответствует сплаву 29НК, зона 2 – припою системы медь-серебро-титан и зона 3 – поверхностному слою керамики.

Слой припоя, образовавшегося в результате сплавления ПСр-72 и мелкодисперсного титана, плотно прилегает к керамике. В нем отсутствуют включения титана, что свидетельствует о полном растворении его в медно-серебряной эвтектике с образованием активного припоя. В припое также не обнаружено следов хрупких интерметаллидов системы медь–титан. Поверхностные микропоры керамического изолятора практически полностью заполнены припоем, что является следствием его высокой смачивающей способности по отношению к алюмооксидной керамике. Микроструктура паяного шва свидетельствует о выборе оптимальных температурно–временных параметров режима пайки крупногабаритного гермоввода.

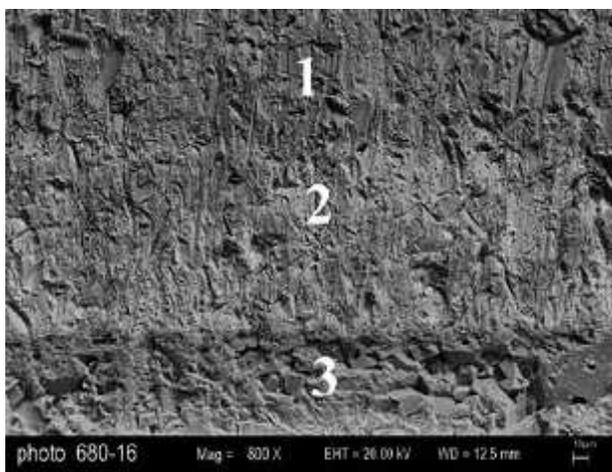


Рис. Микроструктура паяного шва

СИНТЕЗ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ГЕТЕРОФАЗНОГО СООСАЖДЕНИЯ ПРЕКУРСОРА АЛЮМОМАГНЕЗИАЛЬНОЙ ШПИНЕЛИ ДЛЯ ПРОЗРАЧНОЙ КЕРАМИКИ

Журба Е. В., Лемешев Д. О., Попова Н. А.

ФГБОУ ВО «РХТУ им. Д. И. Менделеева», г. Москва, Россия

Алюмомагнезиальная шпинель ($MgAl_2O_4$) – единственное стехиометрическое соединение в системе $MgO - Al_2O_3$. Возрастающий интерес к шпинели обусловлен уникальным комплексом превосходных оптических показателей и механических свойств – высоким светопропусканием от ультрафиолетовой до середины инфракрасной областей (0,2-5,5 мкм) электромагнитного излучения, высокой механической прочностью и твердостью, малой плотностью (3,59 г/см³), высокой термостойкостью и химической инертностью.

Кубическая структура $MgAl_2O_4$ обеспечивает изотропность оптических характеристик и постоянное светопропускание до 92 % в видимой области спектра вследствие отсутствия рассеивания света из-за отличия в показателях преломления по осям кристалла. Благодаря сочетанию этих свойств алюмомагнезиальная шпинель становится одним из наиболее перспективных материалов для получения прозрачной керамики с повышенными эксплуатационными характеристиками, области применения которой крайне широки: от активных сред твердотельных лазеров до прозрачной брони.

Оптически прозрачную керамику из шпинели получают в две стадии: синтез порошка шпинели → спекание образцов в среде водорода или вакууме. Условия синтеза и структура порошков существенно влияют на качество и оптические свойства конечного продукта. Поскольку в керамике на всех этапах технологии проявляется явление наследования структуры предыдущей фазы последующей, особую актуальность при-

обретают химические методы получения порошков с заданной дисперсностью, в частности, метод химического осаждения.

Целью работы явилось получение прекурсора алюмомагнезиальной шпинели (АМШ) методом обратного гетерофазного соосаждения и изучение температуры синтеза $MgAl_2O_4$.

Высокодисперсные порошки двойного гидроксида магния-алюминия строго стехиоме-

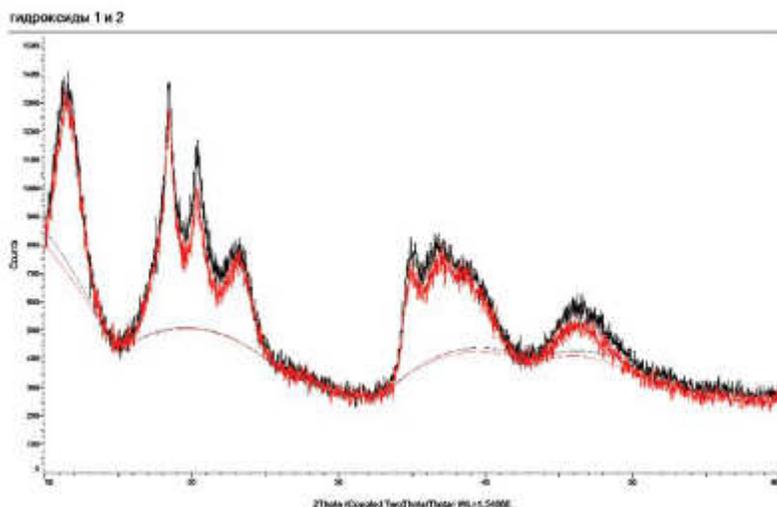


Рис. 1. Дифрактограмма гидроксидов, полученных методом обратного гетерофазного соосаждения

трического состава, являющиеся прекурсорами алюмомагнезиальной шпинели, получены обратным химическим соосаждением из растворов хлоридов ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$ и $AlCl_3 \cdot 6H_2O$) при распылении в раствор аммиака.

Для исследования фазового состава проведен рентгенофазовый анализ, результаты которого подтверждают образование гидроксидов стехиометрического состава как единственной кристаллической фазы в обоих случаях (рис. 1).

В качестве активатора спекания для получения прозрачной керамики на основе АМШ выбрана добавка оксида галлия Ga_2O_3 – один из немногих оксидов, который образует с $MgAl_2O_4$ кубический твердый раствор. Добавку в виде соли галлия ($Ga(NO_3)_3 \cdot 8H_2O$) в количестве 1 и 5 мол. % вводили в гидроксиды при помоле в планетарной мельнице. Для определения температуры синтеза проведен дифференциально-термический анализ (ДТА), результаты которого представлены на рис. 2, 3.

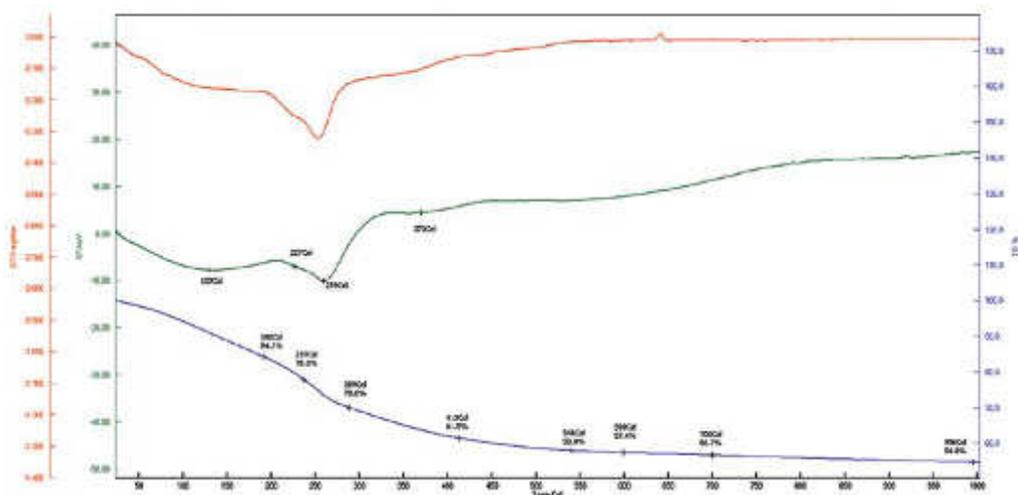


Рис. 2. Термогравиметрические и дифференциально-термические кривые состава, содержащего 1 мол. % Ga_2O_3

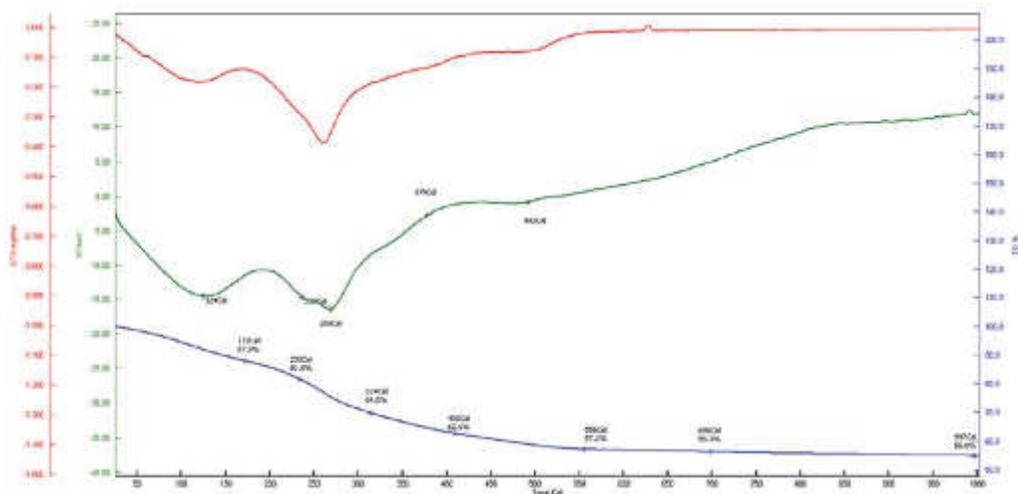


Рис. 3. Термогравиметрические и дифференциально-термические кривые состава, содержащего 5 мол. % Ga_2O_3

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ИЗ СТЕКЛОКЕРАМИКИ В СЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Кирюшина В. В., Фетисов В. С., Коваленко П. В., Хамицаев А. С.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В работе приведены оценки прочностной надежности (вероятности безотказной работы) головного антенного обтекателя летательного аппарата, изготовленного из стеклокерамического материала литийалюмосиликатного состава [1], в серийном производстве.

Для оценки прочностной надежности были использованы результаты периодических испытаний натуральных изделий в 2004-2015 гг.: статических, при постоянной температуре, и теплопрочностных, при изменяющихся по заданному режиму тепловой и силовой нагрузках, а также результаты определения прочности стандартных образцов материала от этих изделий.

Оценка прочностной надежности изделия в эксплуатации простым отношением количества изделий, не прошедших испытания, к общему количеству испытанных некорректна для таких ответственных изделий, как антенные обтекатели с повышенными требованиями к надежности. В связи с этим в качестве методов оценки в работе применен метод предельных состояний с нормальным законом распределения коэффициента запаса прочности [2] и модель хрупкого разрушения Вейбулла [3-5].

Прочностная надежность изделия определяется условием безотказности, заключающимся в сохранении целостности изделия при воздействии эксплуатационных нагрузок. В случае использования метода предельных состояний, коэффициента запаса прочности в качестве параметра состояния и некоррелированности нагрузки и несущей способности оценка прочностной надежности R_M вычисляется через интеграл вероятностей:

$$R_M = P(\eta > 1) = \Phi\left(\frac{\bar{\eta} - 1}{\sqrt{\bar{\eta}^2 v_R^2 + v_L^2}}\right), \quad (1)$$

где $\Phi(\cdot)$ – табулированная функция стандартизированного нормального распределения (функция Лапласа); $\bar{\eta}$ – среднее значение коэффициента запаса прочности; v_R и v_L – коэффициенты вариации несущей способности и нагрузки, соответственно.

Использование в оценке надежности коэффициента запаса прочности позволяет независимо от вида испытания учесть результаты всех проведенных испытаний (статических, теплопрочностных) одновременно в одном расчете, что сделано с целью увеличения объема исходных данных и повышения точности расчета.

Вычисленная через интеграл вероятностей (1) оценка прочностной надежности рассматриваемых изделий за 2004-2015 гг. составляет $R_M = 0,99478$. Однако дан-

ное значение R_M существенно зависит от количества испытанных изделий, в связи с чем оценка R_M только за каждый год серийного выпуска изделий может оказаться относительно грубой. Кроме этого, метод предельных состояний не позволяет учесть физические особенности разрушения изделий из хрупких керамических материалов и их прочностные свойства. С этой целью в работе использована модель хрупкого разрушения Вейбулла, хорошо зарекомендовавшая себя в практике подобного рода исследований [3-5].

Для оценки вероятности безотказной работы по модели Вейбулла предварительно были проведены расчеты напряженно-деформированного состояния каждого изделия при статических и теплопрочностных испытаниях, в соответствии с его коэффициентом запаса прочности, с использованием конечно-элементных моделей в программном комплексе ANSYS.

Результат расчета состоял в получении распределения эффективных элементарных объемов по всему материалу изделия, определенному по распределению в нем расчётных первых главных напряжений, что потребовало написания дополнительного программного кода в среде ANSYS.

Следует отметить, что расчеты эффективного объема выполнены на той же конечно-элементной сетке, что и расчеты напряжений, что не всегда корректно, поскольку может привести к некоторому снижению точности расчета эффективного объема [6]. Данный вопрос требует проведения дополнительных исследований.

Полученные результаты использованы в оценке прочностной надежности по вытекающей из модели Вейбулла формуле:

$$R_M = 1 - P(\sigma_{max}) = \exp\left(-\left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_\theta}\right)^m\right), \quad (2)$$

где σ_{max} – значения максимальных растягивающих напряжений в оболочке изделия при испытаниях по заданным режимам; σ_θ – оценка прочности при растяжении материала в оболочке изделия; m – модуль Вейбулла.

Модуль Вейбулла оценен методом максимального правдоподобия по результатам испытаний на трехточечный изгиб стандартных образцов материала за соответствующий год серийного производства изделий. Величина σ_θ в выражении (2) учитывает не только прочностные свойства материала, полученные на образцах, но и эффективные объемы образца и изделия.

Оценки прочностной надежности исследуемого стеклокерамического обтекателя, полученные по результатам проведенных в 2004-2015 гг. периодических испытаний, по модели Вейбулла (2) варьируют в диапазоне 0,99703...0,99999.

Таким образом, полученные в работе результаты свидетельствуют о стабильности и высоком уровне качества серийного производства исследуемого стеклокерамического обтекателя летательного аппарата, а также о высоком уровне вероятности его безотказной работы, не уступающей изделиям-аналогам.

Литература

1. Суздальцев Е. И. Исследования по получению стеклокерамики β -сподуменового состава с регулируемой диэлектрической проницаемостью // Огнеупоры и техническая керамика, 2002. – № 5. – С. 15-17.
2. Апполонов И. В., Северцев Н. А. Надежность невосстанавливаемых систем однократного применения. – М.: Машиностроение, 1977. – 212 с.
3. Фрейденталь А. М. Статистический подход к хрупкому разрушению. В сб. Разрушение. Том 2. Математические основы теории разрушения. Под ред. А. Ю. Ишлинского. – М.: Мир, 1975. – 764 с.
4. Баринов С. М., Шевченко В. Я. Прочность технической керамики. – М.: Наука, 1996. – 159 с.
5. Реслер И., Хардерс Х., Бекер М. Механическое поведение конструкционных материалов. Пер. с нем. Учебное пособие / Реслер И., Хардерс Х., Бекер М. – Долгопрудный Издательский Дом «Интеллект», 2011 – 504 с.
6. Trantina G. G., De Lorenzi H. G. Design Methodology for Ceramic Structures. Труды американского общества инженеров-механиков. Серия «Энергетические машины и установки». – М.: Мир, 1977. – № 4. – С. 69-77.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В КОНСТРУКЦИИ КЕРАМИЧЕСКИХ АНТЕННЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ

Часовской Е. Н., Русин М. Ю., Келина И. Ю.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Использование при изготовлении антенных обтекателей высокоскоростных ракет различных классов оболочек из жаростойких керамических материалов обусловлено их уникальными свойствами и, несмотря на специфику керамики как конструкционного материала, до сих пор широко используется. Более того, с ростом скоростей до (5 – 9) М и времени полета до нескольких минут - им нет достойной замены. Однако существует проблема создания надежного соединения керамической оболочки обтекателя со шпангоутом при высоких температурах, которая обусловлена сложностью разработки надежного соединения в связи со значительной разницей их температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) в процессе нагрева керамики, клея и шпангоута, особенно при температурах прогрева узла соединения свыше 300-350 °С.

Известен ряд решений для конструкций антенных обтекателей, включающих керамическую оболочку и шпангоут, в которых работоспособность обеспечивается установкой между оболочкой и шпангоутом термокомпенсаторов или теплозащитных элементов, позволяющих исключить непосредственный контакт оболочки со шпангоутом и снизить температуру нагрева шпангоута и клеевого соединения. Таким образом, все известные решения для увеличения температурного диапазона использования и повышения надежности конструкции узла соединения керамической оболочки и шпангоута сводятся к трем:

- установка различных термокомпенсаторов между керамикой и шпангоутом;
- установка различных теплозащитных элементов между керамикой и шпангоутом;
- комбинация, в том или ином виде, двух предыдущих решений.

Предлагается решение существенно снизить прогрев узла соединения за счет создания теплового барьера на наружной поверхности керамической оболочки обтекателя в зоне узла соединения. Для этой цели наносится теплозащитное покрытие (ТЗП) с теплопроводностью ниже, чем теплопроводность керамического материала, и близкий с ним по ТКЛР.

Для нанесения ТЗП на керамическую оболочку антенных обтекателей ракет (АОР) предлагается использовать покрытия, разработанные в ОНПП «Технология» (Патент RU 2497783 С2 авт. Келина И. Ю. и др.), состав которых варьируется в следующем диапазоне, (масс.%): SiO_2 36-58; B_2O_3 1-5; BN 1-3; Na_2SiO_3 2-3; Si_3N_4 2-4; микросферы Al_2O_3 1-3; АСПМ 1-10; МКВ 1-10; тальк 1-3; вермикулит вспученный 2-3; алюмоборфосфатное связующее 30-34. Апробировано три способа нанесения суспензии на предварительно обезжиренную бензином поверхность керамики: окунание, нанесение кисточкой и напыление пневматическим краскораспылителем ИК-162С2 при давлении воздуха 1,8–2,2 ати. Последний способ позволяет регулировать размер капель наносимой суспензии и толщину получаемого покрытия. Экспериментальные исследования на образцах из РСНК показали возможность получения качественных покрытий толщиной от 0,5 до 1,2 мм. При этом с увеличением толщины покрытия напряжение отрыва ТЗП от керамики снижается в 2–2,5 раза с 7–15 МПа (при толщине покрытия 0,5–0,7 мм) до 4–6 МПа (при толщине 0,9–1,2 мм).

В докладе приводятся результаты расчетов эффективности применения ТЗП для нескольких конструктивных решений узла соединения и различных режимов полета ракеты.

ВЫСОКОПРОЧНЫЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ НИТРИД КРЕМНИЯ - ОКСИД МАГНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СВС

Чевыкалова Л. А., Келина И. Ю., Михальчик И. Л., Плясункова Л. А., Аракчеев А. В.
АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Разработан новый керамический горячепрессованный материал ОТМ-929 на основе композиционных порошков состава $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-MgO}$, полученных методом СВС. Специалистами ИСМАН впервые в России одностадийным методом СВС, как альтернатива плазмохимическому способу, разработаны ультрадисперсные высокочистые порошковые композиции состава $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4\text{-MgO}$ с содержанием альфа-фазы более 90 % и зернами равноосной формы размером d_{50} - 1,5 мкм.

Образцы керамики получали традиционным методом горячего прессования в закрытых графитовых пресс-формах с односторонним приложением давления 10–15 МПа при температуре 1700 °С в среде азота.

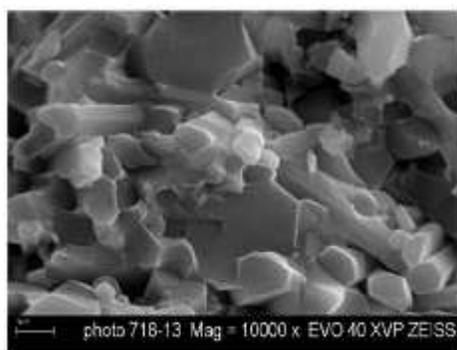
Керамика отличается высокими физико-механическими свойствами. Значения предела прочности при изгибе материала ОТМ-929 при комнатной температуре до-

стигают 760-900 МПа, вязкости разрушения 7-9 МПа·м^{1/2}. Материал также сохраняет уровень прочности при температуре минус 60 °С и имеет прочность при сжатии более 540 МПа. Возможность регулирования соотношения β/α-фаз нитрида кремния путем снижения температуры горячего прессования с 1700 до 1500 °С позволяет изменять микротвердость в широких пределах от 16 до 28 ГПа. Этот факт можно учитывать при применении керамики в качестве ударостойкого материала.

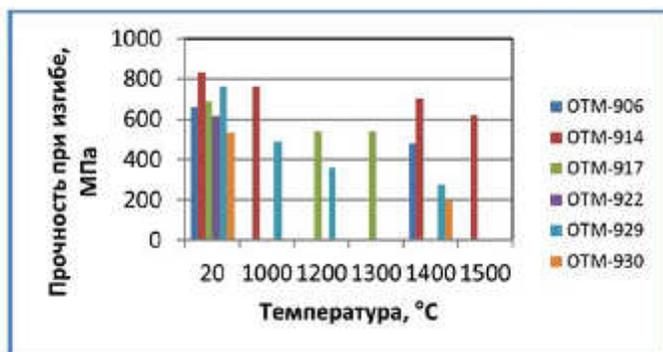
По данным СЭМ микроструктура матрицы плотная, образована зернами преимущественно призматической формы с хорошо развитой морфологией размером ~ 0,5-10 мкм. Мелкие и крупные зерна равномерно распределены между собой. Зерна ориентированы кристаллографической осью «с» параллельно длинной стороне образца (рис. 1а). Спекание между зернами плотное, но наблюдаются отдельные межзеренные поры размером менее 1 мкм.

Для материала коэффициент теплопроводности при комнатной температуре составляет (51,8 ± 5,2) Вт/(м·К) и (18,1 ± 1,8) Вт/(м·К) при температуре 1100 °С.

Таким образом, керамический материал ОТМ-929 является одним из наиболее высокопрочных материалов по сравнению с ранее разработанными на нашем предприятии материалами (рис. 1б) и имеет широкий спектр применения.



а



б

Рис.1. Микроструктура керамики ОТМ-929 (а) и сравнительные значения прочности при изгибе горячепрессованных материалов, разработки АО «ОНПП «Технология» им А. Г. Ромашина» (б)

КЕРАМИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ В СИСТЕМЕ (Si₃N₄-MgO)_{свс} –BN

Чевыкалова Л. А., Келина И. Ю., Михальчик И. Л., Плясункова Л. А., Аракчеев А. В.
АО «ОНПП «Технология» им А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Система Si₃N₄-BN достаточно полно изучена, однако продолжает привлекать к себе зарубежных исследователей ввиду уникальности свойств композиционных материалов на их основе.

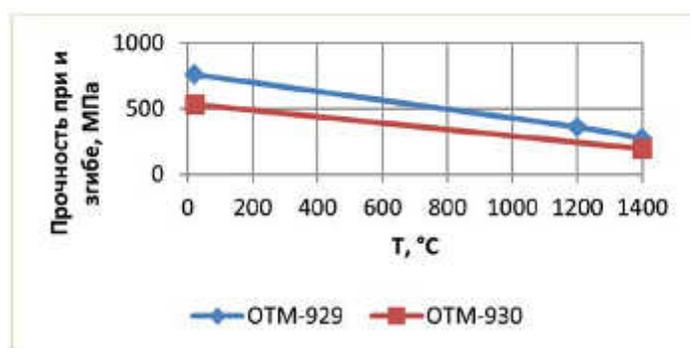
В системе Si₃N₄-BN с использованием ПХС композиционных порошков состава Si₃N₄-Y₂O₃ разработан керамический материал ОТМ-918 переменного состава, в ко-

тором содержание BN изменяется в широких пределах от 10 до 60 масс. %. Во всем диапазоне составов керамика обладает более высоким уровнем свойств по сравнению с зарубежными аналогами.

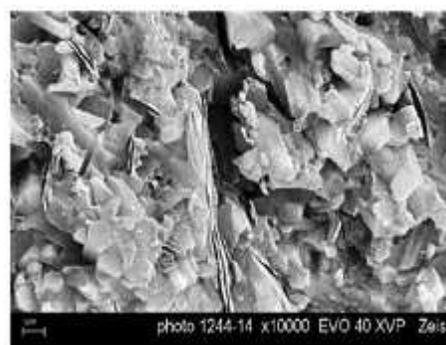
С использованием композиционного порошка (β - Si_3N_4 -MgO), полученного методом СВС, разработан горячепрессованный композиционный керамический материал ОТМ-930. Оптимизация технологии синтеза композиционных порошков положительным образом отразилась на их свойствах. Так, предварительное диспергирование нитрида кремния в струйной мельнице позволило выделить фракции менее 10 мкм; использование в качестве разбавителя композиционного порошка состава Si_3N_4 -MgO обеспечило повышение однородности распределения магния в шихте и продукте синтеза; замена крупных шаров на мелкие позволила провести более полную гомогенизацию компонентов шихты при смешивании; повышение температуры прокаливания оксида магния до 800 °С обеспечило снижение в 2,5–3 раза содержания кислорода, в то же время увеличение длительности смешивания и предварительного измельчения привело к незначительному увеличению намола железа (до 0,1 %).

Исследования показали, что ведение уже 5 % BN существенно изменяет свойства керамики. Открытая пористость снижается практически вдвое и не превышает 1 % по сравнению с матричным материалом (ОТМ-929), прочность при изгибе при комнатной температуре находится на уровне 500 - 750 МПа (рис. 1а), при сжатии – более 510 МПа, микротвердость снижается до 13000 МПа. Фазовый состав керамики представлен фазами β - Si_3N_4 , BN, следы Mg_2SiO_4 .

Микроструктура керамики имеет структуру, характерную для монолитного материала ОТМ-929: плотную, мелкозернистую, с удлинённой призматической морфологией зерна, и введение добавки нитрида бора не оказывает существенного влияния на ее формирование. Нитрид бора располагается в виде отдельных пластин или их скоплений (рис. 1б).



а



б

Рис. 1. Микроструктура керамики ОТМ-930 (а) и сравнительные изменения значения прочности при изгибе горячепрессованных материалов ОТМ-929 и ОТМ-930 (б)

К ВОПРОСУ ИСПЫТАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Часовской Е. Н., Русин М. Ю., Келина И. Ю., Забейжайлов М. О.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Использование керамики как конструкционного материала требует знания прочностных и механических свойств материалов, которые необходимы для оценки его применимости в конкретной конструкции. Проблема получения таких свойств существует все время и, к сожалению, не решена до сих пор. Связано это прежде всего со спецификой керамических материалов – хрупкостью, низкой деформативностью, твердостью. Все перечисленное не позволяет использовать существующие методики испытания материалов (в том числе и ГОСТы), а требуется разработка иных методик с учетом перечисленных особенностей керамики. Проблема еще усложняется, когда требуется испытывать керамику при высоких температурах. Главным недостатком всех известных схем нагружения керамических образцов (как на растяжение, так и на изгиб) – погрешности при испытании, которые достигают 30-40 % и вызывают разброс прочности в дополнении к естественному разбросу прочности керамического материала.

В докладе приводятся результаты численного моделирования и экспериментальные данные различных схем нагружения для различных образцов и натуральных конструкций из керамики, накопленные за длительный срок использования керамики как конструкционного материала.

В качестве альтернативы испытания керамики на растяжение предлагается подход, который был предложен и использовался нами еще в 80-х годах, – это испытание керамических колец. Для проведения отбраковки опорных колец соплового аппарата малоразмерного ГТД была разработана методика и предложен способ нагружения кольцевой конструкции из керамики. В процессе разработки методики были проанализированы различные схемы нагружения кольца как расчетным путем, так и проведением натуральных экспериментов, в том числе с тензометрией. В качестве схем нагружения рассматривались следующие: нагружение двумя, тремя и четырьмя сосредоточенными силами внутри кольца; нагружение двумя силами (сжатие) снаружи кольца; нагружение внутренним давлением по всей поверхности кольца.

Важно отметить, что все перечисленные схемы не создают чистого растяжения даже в отдельных зонах, а характер распределения напряжений по сечению кольца больше приближен к изгибным. Поэтому была выбрана схема нагружения кольца полудисками. Важной особенностью этой схемы является возможность определения прочностных и механических свойств в локальных зонах кольца, причем напряжения по характеру максимально приближены к чистому растяжению. В докладе приводятся результаты расчетов и экспериментов с кольцами при такой схеме нагружения.

При этом надо отметить, что использование схемы нагружения полудисками возможно применять для любых кольцевых конструкций как целиком (при небольших размерах конструкции), так и вырезанных из оболочки обтекателя. В частности, при изготовлении обтекателя вырезается припуск, который разрезается на маленькие кольца и используется в качестве образцов при испытании на прочность для подтверждения прочностных свойств материала в данной конструкции.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Рабинский Л. Н.¹, Рупецкий А. В.¹, Ситников С. А.¹, Соляев Ю. О.¹, Погодин В. А.²

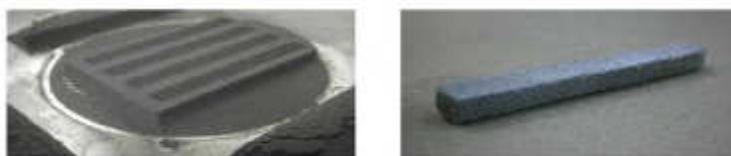
¹ ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», г. Москва, Россия;

² ООО «Кемико», г. Обнинск, Россия

В настоящей работе получены заготовки из порошка кремния с использованием технологии 3Д-печати BinderJet. Заготовки после печати прошли реакционное спекание в азоте (СВС). Проведено исследование и сопоставление двух связующих и различных методов подготовки порошка кремния для получения заготовок. На образцах пористой керамики, полученных методом трехмерной печати, были исследованы состав и микроструктура.

Для изготовления образцов использовался размолотый порошок кремния марки КР00. Средний диаметр частиц порошка составлял 0,1-0,2 мкм. Получаемые порошки кремния подвергались влажному микрогранулированию клеящим составом через сито с отверстиями диаметром 0,16 мм. В первом случае в качестве клеящего состава использовался модифицированный крахмал (связующее №1), во втором – эпоксидно-диановая не отвержденная смола ЭД-20 (связующее №2). Процедура инъекции связующего была основана на послойной выкладке слоев и пропитке связующим порошка кремния в области поперечного сечения создаваемого изделия. Для реализации технологии трехмерной печати была разработана специальная установка. Связующими №1 в картридже использовались модифицированные водно-дисперсные чернила. Для связующего №2 в картридж был заправлен 10 % водный раствор полиэтиленполиамиона (ПЭПА), отвердителя эпоксидной смолы. Сушка заготовок изделий проводилась при 100 °С в течение 30 минут.

После реакционного спекания были получены образцы, представленные на рис. 1.



а

б

Рис. 1. Напечатанные заготовки из порошка кремния (а) и образец нитрида кремния после реакционного спекания (б)

Для синтезированных образцов керамики были проведены исследования микроструктуры, состава и механических свойств. Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на приборе ALRX'TRA фирмы «Thermo-FisherScientific» с анодом (CuK α). Исследования микроструктуры и рентгеноспектральный анализ проводились с использованием двухлучевого растрового электронного микроскопа Versa 3D LoVac. Определение прочности при изгибе образцов проводилось при комнатной температуре на универсальной испытательной машине Instron серии 5960.

Элементный состав представлен в таблице.

Элементы, % масс.	Связующее №1	Связующее №2
Si	58,6	44
N	26,4	32,9
C	7,4	11,3
O	7,6	11,8

Полученные данные позволили сделать вывод, что в образце на основе связующего №2 абсолютное содержание азота на 15 % выше, чем в образце на связующем № 1. Несмотря на различную природу связующих № 1 и № 2, содержание углерода и кислорода в обоих образцах отличаются незначительно.

По данным РФА материал в обоих образцах состоит главным образом из α - Si_3N_4 .

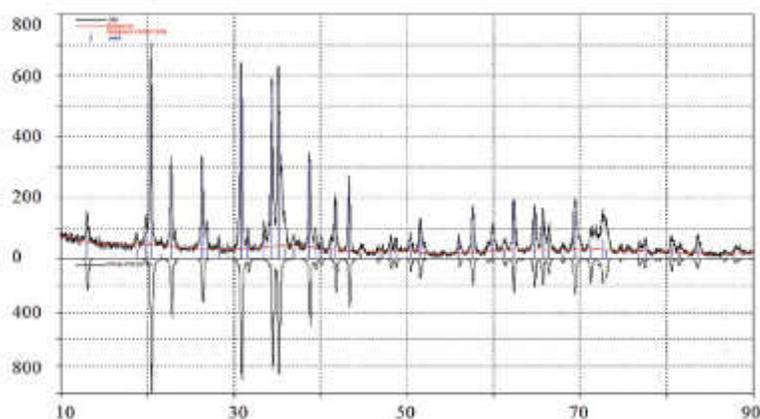


Рис. 2. РФА состава образцов (вверху), эталонная рентгенограмма α - Si_3N_4 , (внизу)

Отсутствие на спектре самостоятельных фаз карбида и оксида кремния можно объяснить тем, что кислород находится в виде оксинитрида кремния, а содержание карбида кремния не значительно.

Исследование микроструктуры полученных образцов представлено на рис. 3.

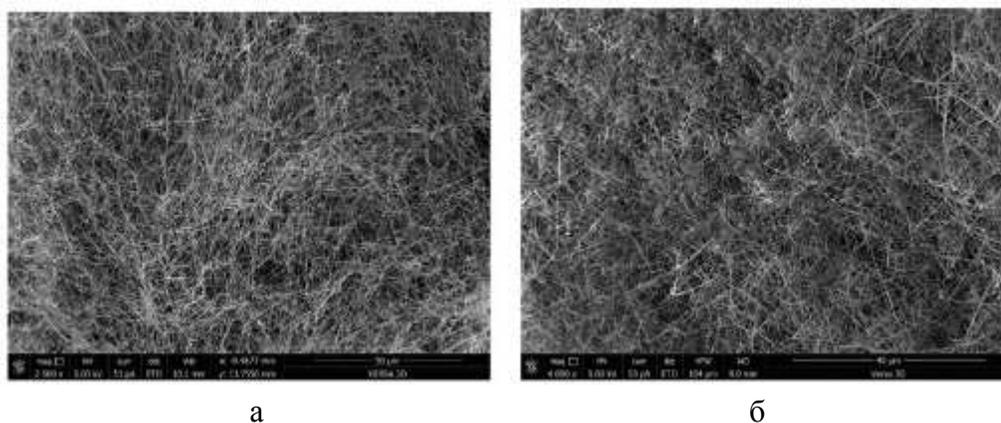


Рис. 3. Микроструктура пористой керамики Si_3N_4 , а - связующее №1; б - связующее №2

Образцы обладают волокнистой структурой с включениями частиц размером 1-40 мкм. Пористость образцов на связующих №1, №2 составила 60 и 30 %. По данным механических испытаний образцов на основе связующего №2 установлено, что прочность на изгиб составляет 5,2 МПа, предельные деформации до разрушения 0,24 %, модуль упругости 2,6 ГПа.

В результате реакционного спекания полученных заготовок получены образцы нитрида кремния, пористостью 60 и 30 %. Установлено, что материал состоит из волокон $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ с включениями частиц 1-40 мкм. В состав материала входит оксинитрид кремния, карбид кремния, химический состав отличается от стехиометрического, что характерно для керамики на основе нитрида кремния. Образцы, полученные на основе заготовок, изготовленных методом трехмерной печати с применением связующего на основе эпоксидной диановой смолы, отличаются меньшей пористостью, что связано с более глубокой азотацией образцов.

В рамках этого подхода интегрирование технологии 3Д-печати BinderJet в технологию создания керамики на основе нитрида кремния будет продолжена работа по исследованию условий подготовки исходного кремния, проведения 3Д-печати, а также подбора связующих и функциональных добавок для получения механически прочных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», Соглашение № 14.577.21.0171.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИОРГАНОСИЛАЗАНОВ В ТЕХНОЛОГИИ СВЕРХВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Погодин В. А.¹, Сидельников С. А.², Ситников С. А.³.

¹ ООО «Кемико», г. Обнинск, Россия;

² ООО «УКМ Синтез»;

³ ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)», г. Москва, Россия

В настоящем докладе рассматриваются аспекты использования полиорганосилазанов при получении композиционных материалов с матрицей из нитрида кремния (Si_3N_4) и углерод-углеродных композиционных материалов с пироуглеродной (УУКМ ПУ) матрицей. Интерес к использованию полиорганосилазанов при производстве этих высокотемпературных соединений обусловлен тем, что полиорганосилазаны являются промышленно доступными материалами и они имеют высокий выход пиролизного остатка (65-80 % масс).

Методическое содержание настоящей работы включало синтез по традиционной методике полиорганосилазанов МСН-7, КТ-30, смолы 143-115 и затем синтезирование на их основе сополимеров. Индивидуальность, состав и структура полученных полимеров была подтверждена методами гель-проникающей хроматографии, элементного анализа, ЯМР ^{29}Si . Полученные продукты в виде вязких жидкостей, кристаллизующихся при комнатной температуре, отверждались при 200 °С

в течение 30 минут. Термогравиметрический анализ проводился в среде аргона. Состав пиролизного остатка анализировался методом РФА.

В процессе получения гидрикремниевой керамики и композиционных материалов на основе нитрида кремния методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) полиорганосилазан служил дисперсной средой для порошка кремния. Таким образом, термопластичный шликер готовился смешением полиорганосилазанового связующего и кремния.

При изготовлении УУКМ ПУ полиорганосилазан использовался на стадии приготовления препрега, а также как клеевая композиция для устранения дефектов (расслаивания, трещин и сколов) после процесса пироуплотнения.

Вовлечение полиорганосилазанов в процесс производства композитов (Si_3N_4 , УУКМ ПУ) позволило существенно усовершенствовать технологию изготовления последних.

При изготовлении композитов с матрицей из нитрида кремния, полученных СВС, отпала необходимость в стадии удаления связки и повысился выход годной продукции на 10 %. За счет высокого выхода пиролизного остатка полисилазанов уменьшилась пористость и линейная усадка конечных изделий.

При изготовлении УУКМ ПУ матрицей сократился производственный цикл на 20 % и уменьшилась линейная усадка препрегов.

Свойства образцов композитов с Si_3N_4 матрицей и УУКМ ПУ, изготовленных с вовлечением полиорганосилазанов, были изучены и сопоставлены с контрольными, полученными по традиционной технологии. Нитрид кремния имел несколько меньшую пористость по сравнению с контрольной группой, однако это отличие нивелировалось при увеличении давления азота и температуры в процессе СВС. Образцы УУКМ ПУ при сопоставлении с контрольными имели идентичные свойства по удельному электрическому сопротивлению, теплопроводности и плотности. Единственное отличие в фазовом составе исключалось, при выдержке выше 2000 °С в течение 8 часов фазы нитрида, карбида и оксида кремния на исчезали на спектре.

Полученные данные позволили сделать следующий вывод. Применение полиорганосилазанов в производстве композитов (Si_3N_4) и (УУКМ ПУ) удешевляет технологию изготовления этих сверхвысокотемпературных материалов.

МЕЛЮЩИЕ КОРУНДОВЫЕ ШАРЫ, ФОРМУЕМЫЕ МЕТОДОМ КВАЗИИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ

Бизин И. Н., Куликова Г. И., Алексеев М. К., Горчакова Л. И., Саванина Н. Н., Шер Н. Е., Анашкина А. А.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

При измельчении керамических порошков, используемых для получения технической керамики, важное значение имеют свойства мелющих тел, при этом основными требованиями к ним являются высокая химическая чистота и низкая истираемость.

В настоящее время мелющих тел с высоким содержанием оксида алюминия в промышленном масштабе в России практически не производят. Шары диаметром 40 мм с содержанием оксида алюминия 93,5 % масс. поставляет только ОАО «Поликор» (г. Кинешма). Однако в последнее время качество шаров заметно ухудшилось: увеличился износ, возросло количество примесей и посторонних кристаллических фаз, а также имеют место существенные отклонения от геометрических размеров. В связи с этим разработка технологии получения высокочистых корундовых мелющих шаров с низкой истираемостью весьма актуальна.

В АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» освоена технология производства корундовых цельпесков диаметром 20 мм и высотой 20 мм из материала ТСМ-303 (содержание $Al_2O_3 \sim 97$ % масс.) с использованием способа горячего пластифицированного литья. Однако получение таким способом мелющих шаров диаметром более 30 мм представляет технологическую проблему: удаление парафинового связующего из объема крупного тела при утильном обжиге приводит к его разрушению.

В настоящей работе опробован способ получения корундовых шаров диаметром 40 мм с применением технологии квазиизостатического формования высокочистых порошков глинозема «СТ 3000 LS SG» фирмы «Алматис» (Германия) и шихты ТСМ-303 (АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина») с содержанием оксида алюминия 99,8 % масс. в первом порошке и 97,0 % масс. – во втором. Глинозем «Алматис» имеет высокую удельную поверхность (~ 8 м²/г) и небольшой размер зерен ($d_{50} \sim 0,5$ мкм); у шихты ТСМ 303 Суд. – до 0,4 м²/г и более крупный размер частиц – 5-30 мкм. При квазиизостатическом прессовании в качестве временной связки порошков может использоваться вода или водный раствор поливинилового спирта, удаление которых при сушке не представляет технологической сложности.

Известно, что достоинства метода квазиизостатического прессования заключаются в равномерной передаче давления всему объему прессуемого изделия посредством эластичного материала. Для реализации этого способа при формовании шаров диаметром 40 мм была использована специальная металлическая оснастка с полиуретановыми вставками – пресс-буфером из материала СКУ-7Л; прессование проводили на гидравлическом прессе П 250-600.

Формование заготовок шаров из шихты ТСМ-303 и глинозема «СТ 3000 LS SG», увлажненных водой в количестве 5-6 % от массы порошка, выполняли при разных давлениях прессования в диапазоне 800-2400 кг/см² и полученные заготовки шаров обжигали при температурах от 1560 до 1700 °С. Наибольшую плотность шаров из ТСМ-303 ($\sim 3,73$ г/см³), минимальные значения пористости (до 0,04 %) и водопоглощения (0,01 %) обеспечивают прессование при давлении 2000-2400 кг/см² и обжиг при 1700 °С (табл.).

Из глинозема «СТ 3000 LS SG», отличающегося хорошей формуемостью и активностью к спеканию, высокоплотные шары (до 3,91 г/см³) получают при более низких давлениях прессования (800-1000 кг/см²) и температурах обжига – до 1600 °С (табл. и рис. 1а).

Свойства шаров диаметром 40 мм, полученных квазиизостатическим прессованием шихты TCM-303 и глинозема «СТ 3000 LS SG»

Р пресс., кг/см ²	Шихта TCM-303									Глинозем «СТ 3000 LS SG»		
	Температура обжига, °С											
	1560			1600			1700			1600		
	ρ , г/см ³	П, %	W, %									
800				3,557	0,27	0,07				3,887	0,05	0,01
1000				3,580	0,18	0,07				3,910	0,02	0,01
1600				3,709	0,16	0,05						
2000	3,705	0,08	0,02	3,717	0,08	0,02	3,727	0,05	0,01			
2400				3,718	0,06	0,02	3,730	0,04	0,01			



а



б

Рис. 1. Мелющие шары из корундовой керамики, полученные квазиизостатическим прессованием глинозема «СТ 3000 LS SG» (а), и шифр такого шара (б)

Мелющие шары, полученные с использованием способа квазиизостатического прессования, имеют однородную структуру по всему объему образца (рис. 1б); видимых пор, раковин и других внутренних дефектов не наблюдается. Микротвердость HV шара из глинозема «СТ 3000 LS SG» - высокая, однако в центральной зоне несколько ниже (1300-1400 кгс/мм²) по сравнению с остальной внутренней областью – 1500-1600 кгс/мм².

Опытные партии мелющих шаров были испытаны на истираемость при помоле закристаллизованного гранулята стекла, который предусматривает сначала сухое измельчение в течение 30 минут, а затем - мокрое в течение 6-7 часов. При таком помоле потери массы корундовых шаров производства ОАО «Поликор» составляют 14-17 % за 8-10 процессов. Установлено, что при этих же условиях помола потери массы экспериментальных шаров заметно меньше: у шаров из глинозема «СТ 3000 LS SG» – в 4,2-4,3 раза, а из шихты TCM-303 - в 2,4-3,0 раза по сравнению с показателями у аналога.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТИПОВОЙ ДЕТАЛИ ОСТЕКЛЕНИЯ ВЕРТОЛЕТА ИЗ АБРАЗИВОСТОЙКОГО, ОБОГРЕВАЕМОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СЛОИСТОГО МАТЕРИАЛА

Шаталин Н. В., Остролуцкий Д. А., Симакина Е. И.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Эффективность функционирования и летно-технические характеристики современных самолетов и вертолетов зависят от вида и конфигурации применяемого для них остекления. Существующие конструкции остекления представляют собой либо монолит из силикатного или органического стекла, либо различные композиции (органосиликатные или органо-органические триплексы).

Целью данной работы является разработка технологии изготовления облегченного, электрообогреваемого, птицестойкого (ударопрочного) органо-органического триплекса с абразивостойким защитным покрытием для остекления вертолета. В связи с тем, что проектирование, изготовление и отработка формовой оснастки для получения детали остекления вертолета является длительным и дорогостоящим процессом, было принято решение принять за типовую деталь лобовое стекло вертолета Ка-62 с габаритами 1161x888 мм и сложной кривизной. Материалы, используемые для изготовления детали остекления: органическое стекло марки АО-120С (ТУ 2216-007-25558743-2011) толщиной 3 мм, поликарбонат марки Lexan Margard FMR5XT или Novattro (ТУ 2246-003-81057157-2008) толщиной 3 мм, полиуретановая пленка Duraflex A4700 в качестве склеивающего слоя. Для подачи электропитания на электронагревательные элементы применяют токоподводы в виде токопроводящих шин. Для равномерного нагрева детали остекления были проведены экспериментальные исследования по выбору конфигурации токоподводов. В ходе отработки различных способов нанесения электропроводящих шин был выбран гальванический метод нанесения. По причине низкой абразивостойкости и склонности к «серебрению» решением данной проблемы является нанесение на поверхность органических стекол защитных лаковых покрытий.

Исследование электрических свойств опытных образцов с нанесенными медными шинками гальваническим методом показало необходимость увеличения толщины токоподводов (шинок). Решено было использовать гальванический слой как подложку для наклейки на нее дополнительной медной шинки достаточной толщины. Сборка стеклопакетов проводилась на форме с формообразующей поверхностью. Процесс склейки состоит из следующих этапов: предварительного (холодная и температурная склейки) и окончательного (автоклавная склейка). В качестве защитного абразивостойкого покрытия применялся силоксановый лак. Нанесение защитного абразивостойкого покрытия производили в условиях «чистой комнаты» (6 класс чистоты).

В результате проделанной работы было впервые создано электрообогреваемое, птицестойкое органо-органическое остекление для авиационной техники со сниженной в 2,5 раза массой (по сравнению с аналогичным силикатным). Впервые разработан гальванический способ нанесения токоподводов (медной шинки) на электропроводящее покрытие остекления кабины пилота. Отработаны технологические режимы нанесения и полимеризации защитных покрытий на типовую деталь остекления вертолета.



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ НА ОСНОВЕ АТТРАКТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ

Зайнетдинов Р. И.¹, Гадолina И. В.²

¹ ФГБОУ ВО «МГУПС-МИИТ», г. Москва;

² ФГБУН «ИМАШ им. А. А. Благонравова», г. Москва, Россия

Конкретные результаты инновационной деятельности в современной России не всегда соответствуют ожиданиям из-за недооценки важности научного управления инновационно-инвестиционными процессами. Новые возможности открываются подходами, основанными на синергетике, выявлении точек бифуркации и аттракторов технологического развития.

В докладе проанализированы девять типовых траекторий приближения обновляемой технологической системы к аттракторам технологического развития, т.е. относительно устойчивым состояниям системы, притягивающим к себе множество траекторий развития, потенциально возможных после прохождения системой точки бифуркации. Переход с одной виртуальной траектории на другую связан с прохождением критической точки (стохастическим аналогом точки бифуркации). Такая бифуркация в зависимости от условий её реализации может привести обновляемую систему либо к новому стационарному состоянию (например, успешному внедрению новой технологии взамен устаревшей), либо к хаотическим длительным колебаниям системы между двумя и более конкурирующими технологиями. На рис. 1 показаны реальные технологические траектории на основе исторического примера задержки ΔT внедрения паровых судов на Трансатлантических линиях [1].

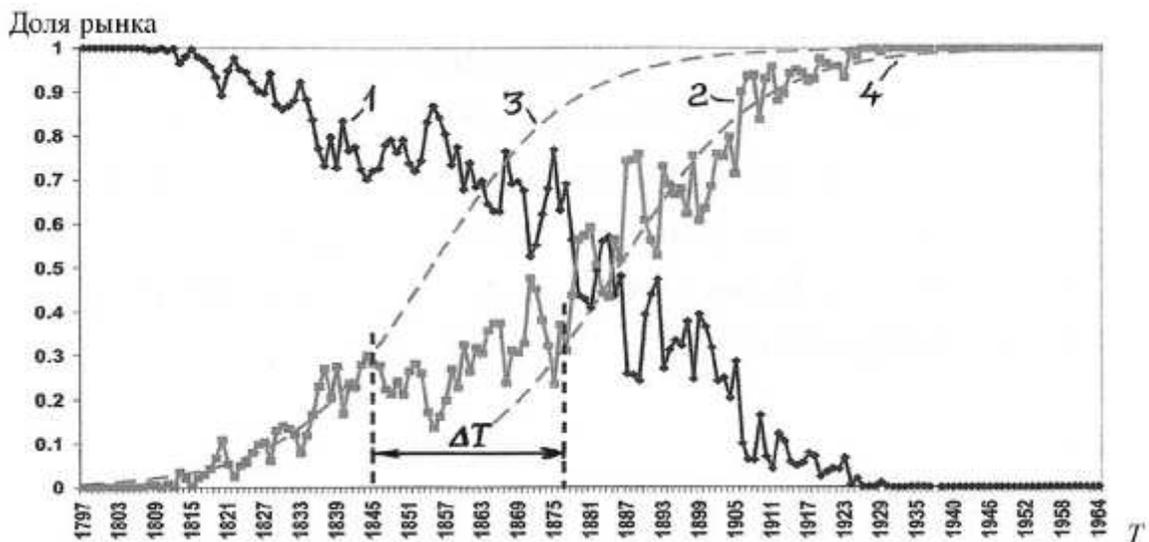


Рис. 1. Задержка ΔT из-за сильного сопротивления в процессе замещения технологии парусных судов (линия 1) паровыми (2) с 1797 по 1964 гг.

Особое место среди современных инструментов анализа инновационного технологического развития занимает инновационная парадигма М.Хироока. Одна из таких парадигм, характеризующая развитие электроники, показана на рис. 2 [2]. Её структура включает в себя три логистические траектории: технологическую, траекторию разработки и траекторию диффузии инноваций. Технологическая траектория представляет совокупность ключевых технологий, составляющих технологическую основу анализируемого кластера инноваций, начинается со значительного научного открытия, расширяющего горизонты познания и открывающего новые перспективы технологического развития и длится 25-30 лет. Траектория разработки представляет совокупность инновационных продуктов, полученных на основе использования обозначенных на технологической траектории ключевых технологий. Траектория разработки играет весьма важную роль в инновационной парадигме, так как именно на этом этапе осуществляется передача технологических знаний от академической науки представителям промышленности, развиваются венчурные формы инновационного предпринимательства для освоения инновационных продуктов и их дальнейшей коммерциализации. Длительность этой траектории составляет 25-30 лет до момента насыщения рынка. Это наиболее благоприятный период для коммерциализации продуктовых инноваций. Третья траектория диффузии инноваций начинается сразу после окончания периода коммерциализации на завершающем этапе траектории развития. Длительность этой траектории составляет 25-30 лет до момента насыщения рынка.

В целом инновационная парадигма М. Хироока имеет каскадную (мультифрактальную) структуру, состоящую из трёх логистических траекторий, отстоящих друг от друга на определённый промежуток времени, который можно установить эмпирически. Это свойство инновационной парадигмы позволяет осуществлять достаточно точное прогнозирование траектории диффузии новых продуктов в рыночной социальной среде до начала поступления инновационных продуктов на рынок. Множество виртуальных сценариев и траекторий инновационного технологического развития отражает современные взгляды на технологические изменения, проявляющиеся во времени в виде последовательной смены поколений технологий с учётом типовых сценариев их замещения.

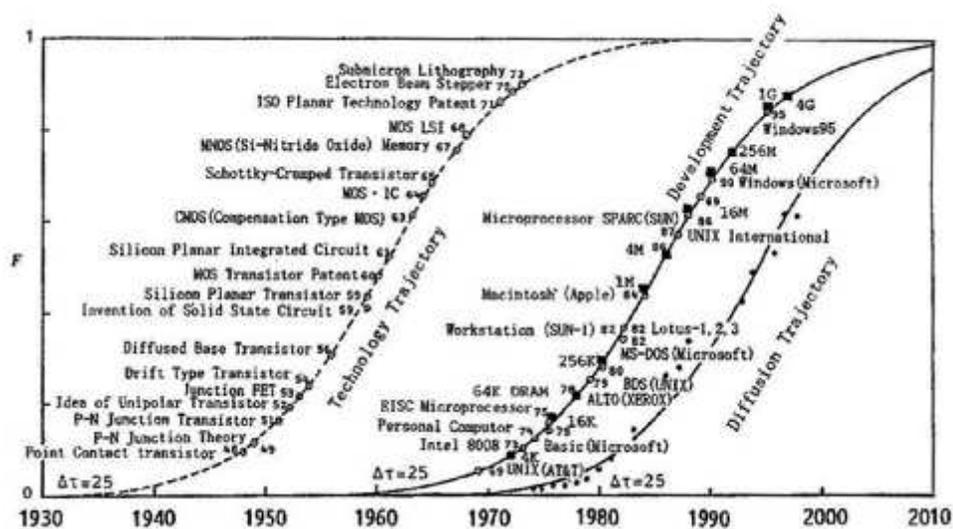


Рис. 2. Инновационная парадигма для электроники

Выводы

Для совершенствования управления инновационно-инвестиционными процессами нужно развивать, совершенствовать и использовать новые подходы, основанные на синергетике, выявлении и анализе точек бифуркации и аттракторов технологического развития. Целесообразно также проводить всесторонний анализ множества потенциально возможных траекторий инновационного технологического развития (типа М.Хироока).

Литература

1. Зайнетдинов Р. И. Синергетическая парадигма управления инновационно-инвестиционными процессами с учетом аттракторов технологического развития // Технодоктрина 2014: сб. докл. 1-го Всероссийского Форума технологического лидерства России. – М.: Военно-промышленная комиссия РФ, Минпромторг РФ, 2014. – С.83-89.
2. Hirooka, M. Innovation dynamism and economic growth: a nonlinear perspective // Edward Elgar Publishing, Inc., 2006. P.172.

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТЬЮ ИННОВАЦИОННОЙ КОМПАНИИ

Иванова М. В.

г. Обнинск, Россия

В настоящее время наблюдается значительный рост вовлеченности в инновационные процессы крупнейших компаний России. Для преодоления ряда специфических ограничений внедрения новейших технологий в организациях создаются системы управления объектами интеллектуальной собственности (ОИС), важнейшим инструментом которых является экономическая экспертиза ОИС, предусматривающая качественную и количественную оценку потенциальных эффектов от внедрения технических и технологических новшеств.

Планирование, создание, учет и использование интеллектуальной собственности способны вызвать значимые последствия в средне- и долгосрочной перспективе, что объясняет стратегический характер формируемого в инновационных компаниях портфеля ОИС, то есть набора результатов интеллектуальной деятельности, обладающих в своей совокупности максимальной экономической эффективностью в рамках стратегии развития компании.

В работе предложен новый методический подход к экономической экспертизе интеллектуальной собственности, реализуемый путем формирования матрицы ценности ОИС. Подход основан на понятии предметной области, представляющей собой сферу применения ОИС, определяемую на основе перечня стратегических направлений развития компании. Матрица ценности состоит из расчетных величин ценности каждого из оцениваемых ОИС, то есть отношения положительного эффекта от использования ОИС к затратам на его создание и внедрение, и представляет собой двумерный массив ценностей множества ОИС, ранжированный в отношении к каждой из предметных областей.

Разработан механизм оптимизации корпоративного портфеля ОИС, основанный на расчете средневзвешенного по всем ключевым предметным областям интегрально-положительного эффекта, обусловленного стратегией компании, которая формально отражена в векторе стратегического развития. Оценка стратегической целесообразности внедрения ОИС состоит в вычислении стратегической ценности объекта, как средневзвешенной ценности по стратегическим показателям предметных областей.

Разработана структура бизнес-процесса отбора результатов интеллектуальной деятельности для включения их в состав портфеля ОИС, направленного на повышение обоснованности управленческих решений по внедрению ОИС и реализации инновационных проектов.

Представлен демонстрационный пример расчета ожидаемых положительных эффектов от внедрения изобретений и полезных моделей, собственником которых является компания АО «Газпром промгаз», построена матрица ценности, подготовлены рекомендации по включению некоторых ОИС в корпоративный портфель ОИС в зависимости от приоритетности направлений стратегии инновационного развития.

Практическое применение представленных рекомендаций по формированию системы управления ОИС будет способствовать повышению обоснованности управленческих решений в организациях наукоемких отраслей, росту эффективности коммерциализации ОИС, а также снижению рисков реализации инновационных проектов.

Работа выполнена автором в рамках диссертационного исследования на кафедре экономики региональной энергетики и энергоэффективности в период обучения в аспирантуре РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина (2011-2016 гг., г. Москва).

ВОПРОСЫ СТИМУЛИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Ершова Н. И.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Успех в современной экономике все в большей мере ассоциируется с инновациями – нововведениями в области техники, технологии, организации труда и управления, основанными на использовании достижений науки и передового опыта. Инновационную сферу от научной и производственной отличает наличие специфической маркетинговой функции, специфических методов финансирования, кредитования и методов правового регулирования, а также, что наиболее важно, особой системы мотивации инновационной деятельности. Существенное значение для стимулирования интеллектуальной деятельности имеет система государственных мероприятий, направленных на предоставление определенных льгот для научно-исследовательских предприятий и изобретателей – это предоставление налоговых послаблений, различного рода ссуды, дотации, целевое финансирование исследований, льготные пошлины и др.

В Российской Федерации законодательно закреплена государственная поддержка инновационной деятельности, которая может осуществляться в разных формах. В ОНПП «Технология» она реализуется в основном путем предоставления льгот по упла-

те налогов, сборов, таможенных платежей, реализации целевых программ, подпрограмм и проведения мероприятий в рамках государственных программ Российской Федерации.

Одним из немаловажных факторов, способствующих созданию конкурентоспособных научно-технических разработок, является также стимулирование и поощрение авторов положенных в основу таких разработок охраноспособных результатов интеллектуальной деятельности, к которым относятся как объекты патентного права, так и ноу-хау. Целям стимулирования и поощрения авторов ОИС служат авторские вознаграждения.

Отношения между автором и работодателем, касающиеся выплаты авторского вознаграждения, регулируются гражданско-правовым договором о выплате авторского вознаграждения, существенным условием которого является размер вознаграждения.

Необходимо также учитывать «трудовые» аспекты выплаты авторских вознаграждений. Отношения патентообладателя-работодателя и автора-работника в современных условиях рассматриваются в плоскости регулирования трудовых отношений, и, следовательно, вопросы авторского вознаграждения должны быть отражены в трудовом договоре.

Проанализированы две системы расчета размеров авторского вознаграждения, которые все чаще применяются в последнее время: по фиксированным ставкам согласно утвержденной внутренними распорядительными документами методике, либо как процентная доля от объемов реализации конечной продукции предприятия, содержащей изобретение.

В АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» размер и порядок выплаты авторских вознаграждений за создание объектов интеллектуальной собственности (объекты патентного права и ноу-хау) регламентируются локальными нормативными актами.

Рассмотрено Положение о размере и порядке выплаты вознаграждения за использование служебного изобретения (служебной полезной модели), действующее на предприятии.

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА НА УЧАСТКЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Харитонов Д. В., Грошев А. В., Анашкина А. А., Блинов А. Н.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Значительный рост плана выпуска продукции в 2013 году в совокупности с нехваткой площадей и оборудования потребовали реорганизации производства.

Усилия руководства были направлены на уплотнение размещения оборудования, графика работы сотрудников, введения круглосуточного режима работы. Использование элементов бережливого производства несло несистемный, выборочный характер.

Для большего вовлечения персонала в процесс реорганизации в декабре 2014 года сторонними экспертами проведено обучение мастеров и ИТР по программе «Управление производственным участком в условиях бережливого производства».

Построение карт потоков ценности помогло выявить «узкое место» – операцию, с самой высокой производственной нагрузкой и процентом брака. По рекомендациям экспертов было принято решение – начинать планомерное внедрение на участке «бережливого

производства» с системы 5S. Участок был перенесен на меньшие площади, оптимизировано расположение оборудования, модернизирована система контроля параметров процесса.

Для сокращения брака, простоев оборудования и непроизводственных затрат – введена цветовая кодировка изделий и оснастки, внедрены механизмы карт стандартных операций, чек-листов уборки и осмотра оборудования.

В марте 2015 года начат сбор предложений по улучшению производства (кайдзен). Одновременно силами обученных сотрудников проведено обучение рабочих основам системы 5S. За год работы получено более 300 предложений, часть из них принесла значительный экономический эффект. Авторы предложений премируются, а фотографии наиболее активных участников помещаются на доску почета.

С целью увеличения прозрачности управления и взаимодействия участков в декабре 2015 году внедрена система оперативного учета движения изделий. Система обеспечивает не только контроль местоположения изделий, но и время выполнения (ожидания) технологических операций. Дальнейшее развитие системы предполагает расширение системы оперативного учета на используемые материалы, сменные задания и нормы выработки рабочих. В 2016 году планируется внедрение системы технологического мониторинга, которая позволит объективно отслеживать загрузку, простои оборудования и производить оперативный вызов ремонтных служб.

Методическую помощь командам внедрения и оперативный контроль выполнения проектов осуществляют сотрудники ООПП (Отдела Оптимизации Производственных Процессов).

Результаты внедрения элементов бережливого производства: повышается инициативность персонала, культура производства при снижении непроизводственных затрат, простоев оборудования, а, главное, растет эффективность производства.

ОПЫТ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПКМ НА СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА

Бубало Д. А., Петров В. Б., Кулас К. Ю.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

Применение технологий PLM становится необходимостью в жестких условиях конкурентной борьбы за получение заказов на производство высокотехнологических изделий. Одним из основных требований заказчиков является наличие электронной документации на изделие и использование электронного обмена данными, что успешно решается в рамках PLM. Ведущие разработчики программного обеспечения в данной области предлагают готовые к внедрению решения в сфере конструкторско-технологической подготовки производства, однако автоматизация процессов на стадии производства изделий требует больших усилий по настройке и адаптации с учетом особенностей конкретного предприятия.

При использовании технологий PLM на стадиях производства, эксплуатации, технического обслуживания и ремонта изделия возникает необходимость в информационном описании экземпляров изделий. На стадии производства PLM позволяет создать «электронный паспорт на изделие» (ЭПИ), содержащий маршрутно-операционные сведения об изготовленной партии или экземпляре изделия.

На предприятии существует давно уже сложившаяся практика сопровождения изготавливаемых изделий технологическим паспортом (ПТ) на твердом носителе, в котором фиксируются технологические параметры при производстве изделий. ПТ предназначен для указания последовательности и содержания операций, выполняемых при изготовлении изделия, включая операционный и приемочный контроль. ЭПИ является электронным аналогом ПТ, поскольку содержит аналогичную информацию в электронном виде.

Внедрение ЭПИ на предприятии преследует цель реализации технологии безбумажного обмена данными, как основного принципа организации ИИС. Однако в текущем переходном периоде необходима поддержка действующей традиционной системы документооборота на бумажных носителях. Для этого разработаны соответствующие нормы, в которых вводится понятие электронного паспорта и его твердой копии, реализована печать ЭПИ со всеми входящими в него документами.

При внедрении PLM-систем на стадии производства предъявляются особые требования к квалификации персонала. Для визуализации данных в табличном представлении, наиболее понятном большинству пользователей, первоначальные PLM решения для рабочих мест ввода информации с производственных участков и формирования твердых копий отчетной документации выполнены в MS Office. В будущем запланирован переход на порталные технологии в сочетании с xml-представлениями документов. Данный подход позволит существенно снизить затраты на закупку и обновление ПО MS Office, снизить технические требования к рабочим станциям и повысить скорость представления данных пользователям.

Следующий шаг развития PLM на предприятии направлен на автоматизацию процессов технологической подготовки производства ЖЦИ. Планируется разработка специального программного обеспечения для формирования технологических процессов (как совокупности бизнес-процессов) и комплектов технологической документации в электронном виде.

Технология ведения электронных документов на различных стадиях жизненного цикла изделия является базовым фундаментом построения PLM на предприятии. Получаемые данные представляют собой основу для формирования аналитики, статистики, отчетов технического, экономического, управленческого характера. Преимущество нового технологического уклада по сравнению с предыдущим заключается в повышении гибкости производства и осуществлении тесного взаимодействия в рамках кооперации с предприятиями-партнерами в области технологий, контроля качества продукции, планирования инноваций.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ В ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГОСУДАРСТВЕННЫХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Коваль О. В.

АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», г. Обнинск, Россия

В настоящее время приоритеты инновационного развития во всех отраслях экономики смещаются в сторону технологических инноваций. В этой связи особое внимание должно уделяться отраслевой науке, поскольку именно в данном секторе осуществляется большая часть разработок, доля которых в затратах на НИОКР со-

ставляет более 60 % [1]. Основой же самой отраслевой науки являются Государственные научные центры Российской Федерации (ГНЦ РФ). Институт ГНЦ РФ был создан более 20 лет назад путем присвоения статуса ограниченному перечню, прежде всего, отраслевых предприятий и организаций, которые имели не только научные школы, но и успешные результаты внедрения научных исследований и разработок.

Сегодня в России статус ГНЦ РФ имеют 43 организации. Это крупные научно-технологические комплексы, обладающие мощным научно-техническим потенциалом, уникальной опытно-экспериментальной базой и высококвалифицированными кадрами. Их деятельность в значительной степени связана с исследованиями и разработками, имеющими стратегическое значение для национальной безопасности России.

В 2016 году Министерство образования и науки Российской Федерации во исполнение решения президиума Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям и в соответствии с поручениями президиума Совета при Президенте Российской Федерации по модернизации экономики и технологическому развитию России провело комплексный анализ деятельности ГНЦ РФ. Данный анализ подтвердил, что ГНЦ РФ как ключевые организации прикладной науки обеспечивают выполнение высоко результативных научных исследований в соответствии с приоритетами государственной политики в сфере науки и инноваций. Важнейшим направлением деятельности ГНЦ РФ является создание результатов интеллектуальной деятельности, ввиду того что дальнейшее продвижение технологий, ведение инновационной деятельности базируется именно на них. Развитию коммерциализации результатов интеллектуальной деятельности ГНЦ РФ содействует использование ими новых инструментов научно-технического и инновационного развития, направленных на создание условий, способствующих взаимодействию науки, бизнеса и государства. Так, например, в 2015 году государственные научные центры были задействованы в 32 из 35 действующих российских технологических платформ (ТП). Количество ГНЦ РФ, участвующих в реализации ТП, составляет 97 %. При этом 10 из них являются координаторами технологических платформ.

ГНЦ РФ успешно могут применять и другие современные инструменты инновационного развития. Например, в глобальном корпоративном секторе сегодня очень популярна модель «открытых инноваций», которая предусматривает широкое взаимодействие крупных компаний с внешним инновационным сообществом, включая вузы, научные организации, малый инновационный бизнес, посевные и венчурные фонды и др. [2].

Еще одним не менее эффективным инструментом развития инновационной деятельности являются кластеры. По М. Портеру «кластер, или промышленная группа,- это группа соседствующих взаимосвязанных компаний и связанных с ними организаций, действующих в определённой сфере и характеризующихся общностью деятельности и взаимодополняющих друг друга».

Центральным моментом формирования кластера является не просто территориально-географическое сближение и объединение научно-производственных усилий компаний-участников в конкретной технологической области для получения синергетического эффекта. Принципиально новые лабораторные технологии необходимо доводить до их практического использования. Основная идея формирования кластера состоит в том, чтобы на основе научно-обоснованных и технологически реализуемых решений, а также организационно-коммерческих механизмов создать условия для пе-

ревооружения промышленности высоких переделов и тем самым подготовить комплексные производственно-технологические пакеты для выгодных инвестиционных вложений [3].

Например, ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» является якорным предприятием Ассоциации «Кластер авиационно-космических технологий полимерных композиционных материалов и конструкций Калужской области». Стратегическая цель создания данной организации - содействие участникам Кластера в формировании на территории Калужской области высокотехнологичного комплекса взаимосвязанных производств и объектов региональной инфраструктуры для проведения совместных научных исследований, разработок и инновационных проектов с целью производства гражданской продукции широкого применения из композиционных материалов с использованием высоких уникальных авиационно-космических технологий. Проект успешно развивается. В Кластер на данный момент входят 22 организации с общей численностью персонала более 6 тыс. человек. В их числе крупные, малые и средние научно-производственные компании, высшие учебные заведения, а также организации сферы поддержки инноваций. При этом преимущества имеют все участники. Для крупных компаний - это дополнительный доход в результате коммерциализации сопутствующих разработок через различные механизмы взаимодействия с субъектами малого и среднего бизнеса. Малые компании получают доступ к высокотехнологичным разработкам, увеличивают обороты и прибыль, повышают свою конкурентоспособность за счет кооперации, использования единой инфраструктуры, взаимодействия с местными научно-исследовательскими организациями. Высшие учебные заведения имеют консолидированный заказ на подготовку специализированных кадров. Экономика региона растет за счет укрепления ее хозяйствующих субъектов и создания новых рабочих мест.

Выводы

1. ГНЦ РФ являются центрами превосходства в наукоемких отраслях экономики страны. Они играют ключевую роль в активизации инновационной деятельности, коммерциализации научно-технических результатов и содействии развитию малого и среднего инновационного бизнеса.

2. Использование государственными центрами современных инструментов инновационного развития (технологические платформы, открытые инновации, кластеры) повышает эффективность их научно-производственной деятельности и конкурентоспособность, а также положительно влияет на трансфер технологий из высокотехнологичных отраслей в гражданские секторы экономики.

Литература

1. Варшавский А. Е. О национальном докладе об инновациях в России 2015 // Инновации. – 2016. – № 02(208). – С. 39-47.

2. Каширин А. И., Волобуев Н. А. Центр открытых инноваций госкорпорации «Ростех» – новый инструмент по внедрению открытых инноваций // Инновации. – 2016. – № 02(208). – С. 7-14.

3. Громыко Ю. В. Что такое кластеры и как их создавать // Альманах Восток. – 2007. – № 1(42). URL: http://www.situation.ru/app/j_art_1178 (дата обращения: 10.08.2016).

КЛАСТЕРНЫЙ ПОДХОД В СТРАТЕГИИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ РЕГИОНА

Новикова И. И.

АО «Агентство инновационного развития-центр кластерного развития Калужской области», г. Обнинск, Россия

За последние десятилетия положение и роль региона в национальной и мировой экономике изменились. Сегодня регионы многих стран являются активными и самостоятельными участниками экономических процессов, что создаёт объективную предпосылку для усиления международной конкуренции и актуализирует проблему поиска новых подходов к развитию национальных экономик с учётом региональных факторов. Эта задача особенно актуальна для России, в составе которой 85 регионов, разнообразных по своему ресурсному потенциалу и уровню развития. Как свидетельствует международный опыт, важная роль в процессе формирования и реализации региональных стратегий отводится кластерам. Сценарии регионального развития, основанные на концепции конкурентных преимуществ, в теоретическом и методологическом плане во многом опираются на кластерный подход. Его использование призвано повысить конкурентоспособность региональной экономики, обеспечить приток знаний и кадров и является сегодня одним из ключевых элементов стратегий социально-экономического развития многих субъектов Российской Федерации.

Резко возросший в последние годы интерес к кластерам является закономерным. Их влияние на формирование современного регионального экономического ландшафта становится все более заметным. «Интерес к кластерам возрос потому, что они являются практическим рычагом воздействия, а не просто способом описания экономической реальности» [1].

Кластерная политика приобретает все более широкое распространение и признание как инструмент для повышения конкурентоспособности как отдельных регионов, так и страны в целом за счет значительных усилий по сближению промышленности, научных разработок и образования.

Вместе с тем, специфика российского подхода заключается в том, что кластеры формируются в основном административно и на базе советского наследия. Например, Новосибирским Институтом экономики и организации промышленного производства СО АН СССР была разработана типовая производственно-территориальная мезомодель (ТПРМ), решавшая проблемы оптимизации пространственной структуры производственной планировки [2]. Согласно разработкам советских ученых, комбинация существующей инфраструктуры и компетенций населения региона – ключевой фактор выбора отрасли специализации территории, в зависимости от которой формируются все вспомогательные факторы.

Российский современный подход к формированию кластеров в региональном развитии сформирован довольно стихийно: с одной стороны - есть советское наследие в виде территориальных промышленных секторов, с другой – успех кластера определяется политической волей региональных властей. Очевидно, что такой подход не является конструктивным. Учитывая диверсификацию секторов российской

промышленности, а также необходимость повышения региональной конкурентоспособности, можно предположить, что в рамках российского кластерного подхода необходимо адаптировать принципы других подходов. Из американского подхода можно перенять парадигму регионального управления, которая нацелена на поддержку инициативы, исходящей «снизу» и сложившегося промышленного сектора региона. Из европейского подхода можно заимствовать принцип специализации регионов и повышение внутренней конкуренции производителей. Из скандинавского подхода может быть перенят принцип повышения конкурентоспособности региона в рамках одной отдельно взятой отрасли, взаимосвязанной с другими отраслями.

Примером такой адаптации лучших мировых практик может являться Калужская область, создавшая уникальные для Российской Федерации возможности по скорости реализации инвестиционных проектов и привлечению в регион крупнейших мировых производителей, ставших флагманами развития экономики, вокруг которых сформировались крупнейшие в России территориальные кластеры.

Таким образом, по мнению автора, можно выделить основные направления влияния кластера на социально-экономическое развитие Калужской области:

1) создается множество новых высокопроизводительных рабочих мест, т.к. кластер образовывается вокруг нескольких предприятий, мировых лидеров своей отрасли, которые размещают свои производства в регионе. В рамках инновационного кластера создание высокопроизводительных рабочих мест связано также с ориентацией на наукоемкие производства;

2) появление крупного потребителя ресурсов стимулирует развитие множества мелких и средних поставщиков, т.е. в регионе возрастет предпринимательская активность;

3) для привлечения в кластер того или иного крупного производителя администрация региона предоставляет им различные налоговые преференции, однако налоговые отчисления, получаемые в результате организации производств и роста предпринимательской активности, являются дополнительным доходом для бюджета;

4) для экономики региона важно, что полная производственная цепочка базируется в регионе, таким образом, большая часть добавленной стоимости остается внутри региона, что позитивно влияет на ВРП;

5) кластер требует развитой инфраструктуры, которую совместно формируют администрация и участники кластера, включающей, в том числе систему образовательных институтов, что, с одной стороны, снизит миграцию молодого поколения из региона, с другой – увеличит приток студентов и рабочей силы, обладающей необходимой квалификацией;

6) формирование инновационного кластера стимулирует развитие научных исследований и, как следствие, рост производительности труда и научной активности, активизируется инновационное предпринимательство с высокой добавленной стоимостью.

Наиболее четко влияние создания и развития кластера на региональную экономику можно проследить на примере Калужского фармацевтического кластера, сформированного в 2011 году и юридически оформленного в виде Некоммерческого партнерства «Калужский фармацевтический кластер», доля которого в ВРП региона выросла с 1 до 5 % только за 3 года.

Таким образом, созданная в Калужской области система управления формированием и развитием территориальных кластеров, основанная на эффективно функционирующей организационной структуре, четкой стратегии развития и активном использовании механизмов частно-государственного партнерства, является несомненным конкурентным преимуществом региона, позволяющим обеспечить реализацию масштабных проектов, направленных на расширение инновационной, транспортной, инженерной и социальной инфраструктуры, сотрудничество фундаментальной науки и промышленности.

Литература

1. Ketels Ch. European Clusters. Structural Change in Europe. 3: Innovative City and Business Regions // Hagbarth Publications, 2004.– С.32.

2. Бандман М. К., Ларина Н. И., Черевикина М. Ю. и др. Территориально-производственные комплексы: планирование и управление.– Новосибирск: Наука, 1984.– 247 с.

3. Материалы к заседанию Координационного Совета по развитию фармацевтического кластера Калужской области при Губернаторе Калужской области от 22.04.2016 года.

МИРОВОЙ ОПЫТ ФОРМИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ КЛАСТЕРОВ: РОЛЬ БИЗНЕС-СТРУКТУР

Мотова Д. Б.

НИУ «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия

Сегодня кластеризация экономики охватила большинство стран. При этом термин «инновационный кластер» (ИК) исследователями понимается по-разному, и каждое государство имеет собственный подход к их построению и развитию. Например, значение кластеров, как производственных сетей преобладает в Норвегии, Бельгии, как уникальной концентрации фирм – в Финляндии, Германии, как инновационных систем – в Канаде, Великобритании и т.д. [1]. Однако существуют общие закономерности формирования ИК, позволяющие понять эффективность такого инструмента: концентрация профильных компаний и квалифицированных специалистов; наукоемкость, накопление знаний и инноваций; построение цепочек взаимодействий между участниками, рост уровня доверия; наличие конкуренции внутри кластера; повышение значения региональной власти; ориентация на глобальные рынки; особая роль малого и среднего бизнеса. Стоит отметить и существенные риски, связанные с дороговизной и длительностью реализации кластерной политики – первые положительные результаты появляются через 10-15 лет существования кластера [1], расходы же возникают еще на стадии «прекластера» (зарождения). Во многом определяющим элементом для возникновения кластеров является политика, проводимая государством. Анализ мирового опыта позволяет подразделить кластерные политики.

1. По роли государства: дирижистская (активное участие в развитии кластеров – Финляндия, Китай) и либеральная (исключает прямое воздействие государства – США, Италия).

2. По степени участия государства: капиталистическая (поддерживает коммуникацию участников), поддерживающая (участие в развитии инфраструктуры), директивная (поддержка развития соответствующей экономической среды программными методами), интервенционистская (принимает все решения по развитию кластера и осуществляет контроль).

3. По уровню осуществления: преобладает общенациональный уровень (Финляндия), региональный уровень (Германия).

4. По подходу к реализации: программный (воздействие на развитие определенной отрасли или территории), проектный (адресное стимулирование кластеров), программно-проектный.

Исследователи сходятся во мнении, что внутри кластера участники должны иметь равные позиции. Однако на практике часто один из элементов играет роль связующего звена. С этой точки зрения модели ИК можно разделить на:

- формирующиеся по инициативе бизнес-сообществ;
- инициированные властью;
- возникшие при ведущей роли научной организации.

Особый интерес в этих моделях вызывает роль бизнеса, так как основной целью существования ИК является выход на новые рынки, повышение конкурентоспособности продукции, внедрение инновационных технологий и продуктов. Рассмотрим несколько успешных зарубежных моделей и роль бизнеса в них.

Одним из примеров особого значения бизнес-сообщества являются 19 кластеров Баварии (Германия): нанотехнологий, авиакосмической промышленности и др. [2]. Бизнес-структура кластеров состоит в основном из представителей крупных концернов и среднего бизнеса. Усилиями производственных предприятий налажена система взаимодействия с территориально близкими научно-исследовательскими учреждениями. Сотрудники университетов нередко трудятся и в исследовательских институтах, связанных с производством. В результате такой кооперации появляются разработки, которые передаются малым предприятиям для ускоренного внедрения (более 20 % представителей научной среды Баварии работают в малых и средних частных компаниях). Тем самым происходит ускоренное внедрение инноваций и создание новых форм хозяйствования, рабочих мест. Инициатива идет «снизу», решения принимаются при активном участии производственных компаний, государство участвует в кластере на уровне местных властей путем содействия проведению мероприятий, формированию репутации и др. В кластерах имеется управляющая компания (УК), которая включает директора и 1-2 его помощников. Основной задачей руководства является создание и поддержание эффективных коммуникационных сетей. Важный аспект – связь кластеров с потребителями, благодаря которой происходит поиск направлений развития и проверка продукции (по средствам проведения дискуссий и различных мероприятий).

Особый интерес представляют французские кластеры. В стране их более 200, часть из которых являются «полюсами конкурентоспособности» (наиболее крупные объединения). Первоначально кластерная политика здесь является централизованной, полюсы созданы в рамках национальной программы. Бизнес-структура кластеров включает стартапы, малый и средний бизнес, а также крупные компании. Основными причинами присутствия в кластере представителей бизнеса стали

информационная составляющая и поиск новых партнеров. Отличительной чертой французских кластеров является функционал УК. В целях удовлетворения нужд бизнеса они предоставляют ряд услуг, информацию о необходимости которых получают в результате регулярного мониторинга. В случае, если какая-либо услуга оказывается неэффективной, принимается решение о ее исключении из функционала УК. В результате построенной таким образом работы, большинство участников кластера согласны финансировать работу управляющих органов [3]. Поэтому постепенно французское правительство снижает финансовое участие в кластерах. Менеджмент состоит из 3-5 человек, а в полюсе конкурентоспособности достигает до 15. Среди французских кластеров стоит выделить полюсы конкурентоспособности, получившие статус мирового значения: Aérospatiale Valley (авиационно-космический), Finance Innovation (финансовых технологий) и др. [4].

Что касается стран Азии, то наиболее успешными являются китайские модели. Они формируются по инициативе государства и под его активным контролем. Появление новых ИК происходит на основе уже имеющихся в регионе связей (объединений предприятий отрасли, цепочек «поставщики-производители-потребители») [4]. Стоит отметить, что особую роль здесь играют иностранные бизнес-структуры: правительство предпочитает располагать кластеры вокруг представительств зарубежных производителей в целях интеграции технологий. Власти активно привлекают в кластер госкомпании (часто становятся центральным звеном), представителей бизнеса и научно-исследовательских структур. Финансирование проектов осуществляется за счет грантов и венчурных фондов, средства на подготовку кадров выделяются из госбюджета. Также правительство определяет основные направления и приоритеты развития новых кластеров. Примерами успешности являются кластер высоких технологий Чжанцзян, г. Шанхай, кластер новых металлов в г. Даньян и др.

В России сегодня помимо 26 пилотных инновационных территориальных кластеров, организованных при поддержке государства (программа Минэкономразвития), появилось более 70 кластерных инициатив, ведущая роль в которых принадлежит бизнесу. Об успехах или неудачах таких кластеров говорить рано, однако стоит отметить, что при разработке стратегий развития и копировании зарубежных инструментов управления руководство должно учитывать национальные особенности бизнеса, к которым можно отнести:

- 1) концентрацию производства в крупных предприятиях, значительную роль компаний с гос. участием и особое регулирование их деятельности;
- 2) центральное значение некоторых предприятий в регионе и соответственно влияние на его политику;
- 3) исторически сложившуюся закрытость субъектов, низкий уровень доверия в отношениях бизнес-наука, бизнес-бизнес;
- 4) низкую долю малого и среднего бизнеса и отсутствие расположенности к нему крупных производителей.

Литература

1. Дежина И.Г. Технологические платформы и инновационные кластеры: вместе или порознь? – М.: Институт Гайдара, 2013. – 124 с.
2. Эффективная реализация кластерной политики, опыт Баварии (Германия) и РФ, 03.06.2009 – URL: <http://arc.yarsk-info.ru/press/?i=100009076>
3. Абашкин В. Французские уроки для пилотных кластеров в России, 14.01.2015 – URL: <https://issek.hse.ru/news/141026538.html>
4. Обзор инновационных кластеров в иностранных государствах Минэкономразвития, 31.05.2011 – URL: http://www.economy.gov.ru/minec/about/structure/depsvod/doc20110531_04







МОЛОДЕЖНЫЙ ВЗГЛЯД НА РАЗВИТИЕ НАУКИ В НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЯХ

В рамках XXI Международной научно-технической конференции «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» состоялся Круглый стол на тему: «Молодежный взгляд на развитие науки в научных организациях», организованный Советом молодых ученых и специалистов АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина».

Целью проведения Круглого стола являлось повышение статуса научных исследований в молодежной среде, а также обсуждение проблем проведения научных исследований в современных кризисных условиях и поиске путей их решения.

В заседании приняли участие около 50 человек, среди которых 26 – представители 15 смежных научно-производственных организаций и ВУЗов, в том числе: В.М. Алакин, заместитель директора по инновациям Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, К.В. Карташов, помощник генерального директора по развитию ПСР АО «ГНЦ РФ ФЭИ», А.Б. Комиссаров, заместитель генерального директора по специальной тематике НПП «Доза» и др.

С вступительным словом к организаторам и участникам молодежного Круглого стола обратились О. Н. Комиссар, заместитель генерального директора по науке и развитию АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина», и С. В. Кушнарев, исполнительный вице-президент Ядерного общества России.

В первой части заседания были сделаны доклады на актуальные научные темы: «Современные научно-практические тенденции в области материалов и технологий» (В.В.Викулин, д.т.н., профессор, академик международной инженерной академии и всемирной академии керамики, главный советник генерального директора АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»); «Развитие совместной научно-инновационной деятельности университета и научных организаций» (П.А. Белоусов, заместитель декана по научной работе ФЭФ ИАТЭ НИЯУ МИФИ, начальник ИТЦ ИАТЭ НИЯУ МИФИ); «Инновационное развитие: быть или не быть?» (А.О. Забейайлов, к.ф.-м.н., начальник сектора АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина»).

Во второй части участники перешли к обмену мнением по затронутым докладчиками темам, среди которых:

- механизмы реализации научных исследований в современных условиях;
- проблемы постановки актуальных научных задач;
- поиск источников финансирования научных исследований;
- проблемы коммерциализации результатов исследований;
- привлечение молодежи в научную сферу.

Стоит отметить заинтересованность и высокую активность молодых ученых и опытных специалистов в обсуждении вопросов инновационного развития и реализации инновационных идей в современных условиях. Трудности, стоящие перед специалистами различных организаций, проводящими НИР и НИОКР, оказались общими. Соответственно, и пути решения должны быть едиными.

В качестве предложений были озвучены следующие инициативы:

- целевая подготовка кадров для научных организаций, начиная с дошкольного возраста;
- изучение имеющегося опыта привлечения высококвалифицированных кадров в научно-инновационную среду;
- получение финансирования за счет стипендий и премий Президента и Правительства РФ;
- создание малых инновационных предприятий на базе Университетов, при участии профильных НИИ и предприятий.

Проект «Ярмарка идей», представленный А.О. Забежайловым, и нацеленный на преодоление искусственных барьеров, выросших в современных условиях на пути развития науки, нашел единогласную поддержку у присутствующих.

В заключении В.В. Викулин и О.Н. Комиссар поблагодарили участников Круглого стола за продуктивную работу, пожелали терпения, сил и больше инициатив в возрождении науки на научно-производственных предприятиях и в молодежной среде. При этом О.Н. Комиссаром были актуализированы следующие проблемы, над которыми он предложил подумать присутствующим молодым ученым: 1). Конкуренция молодых и опытных кадров: что делать? Уйти или остаться? 2). Конфликт «проектное управление - структура предприятия». Как быть? 3). Почему термины научной (инновационной) деятельности зачастую иностранные и правильно ли это?

В качестве пожелания высказано предложение СМУС АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» проводить подобного рода встречи на регулярной основе (1 раз в год).

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

А		Бубало Д.А.	318
Аккуратов И.Л.	76,77	Будылин Н.Ю.	100
Алексеев М.К.	275,308	Бухаров С.В.	113, 175
Алиев А.Д.	100	Быков Ю.В.	189, 211
Альшина С.А.	65		
Алямовский А.И.	76,77	В	
Анашкина А.А.	238, 257, 308, 317	Вагин В.П.	136
Андриевский Р.А.	53	Вандрай С.Н.	241, 285
Антипов Ю.В.	100	Васин А.А.	246
Антонов В.В.	253	Вермель В.Д.	87
Антошина Ю.Г.	119	Вершинин Д.И.	207
Антропова Е.В.	266	Вешкин Е.А.	111
Анучин С.А.	277	Войлочников А.И.	98
Аракчеев А.В.	188, 301, 302	Волков В.С.	84, 85, 156, 158, 160
Артамонова Т.А.	135	Волков Д.А.	108, 168, 172, 174
Атрощенко И.Г.	79, 271, 272	Ворвуль С.В.	178
Афанасьев Д.В.	71	Воробьев С.Б.	237
		Выморков Н.В.	41, 162
Б			
Балабанов С.С.	211	Г	
Бамборин М.Ю.	95	Гаврилова Е.А.	65
Баранов А.А.	110	Гадолина И.В.	125, 313
Батраков В.В.	146, 149	Гайданский А.И.	38
Беззаметнова Д.М.	147	Гайдачук В.Е.	63
Бекренев А.С.	259	Галиновский А.Л.	200
Белоглазов А.П.	74	Ганичев А.И.	192, 269
Беляев А.В.	211	Гарипов О.Ф.	198
Беспалов И.А.	193, 248	Гаршев А.В.	185
Бешенков П.С.	218	Гвоздев А.Б.	220
Бизин И.Н.	275, 283, 308	Георгиу И.Ф.	201
Билалов Б.А.	262	Голубева Н.А.	289
Биткин В.Е.	65	Гольева Е.В.	213
Блинов А.Н.	317	Гордеев С.А.	65
Богданов А.П.	108	Горлов А.В.	170
Богданова О.С.	70, 119	Горчакова Л.И.	275, 308
Богдановски Д.	89	Грошев А.В.	317
Богомолова О.Ю.	106		
Бойко Л.И.	150	Д	
Бондарчук Д.А.	80	Давыдов Д.Я.	77
Боровин Ю.М.	246	Данилаев М.П.	106
Боровинская И.П.	254	Данилов Я.С.	149
Бородай С.П.	232, 281		
Бородай Ф.Я.	272		

Двоеглазов И.В. 147
 Дворецкий А.Э. 136
 Денисова В.С. 221, 264
 Денисова Е.В. 85, 160
 Дитц А.А. 222
 Домбров А.В. 174
 Драчев А.И. 202
 Думанский А.М. 128, 136, 209
 Дунаев А.А. 213

Е

Евдокимов П.В. 185
 Егоров С.В. 189, 211
 Ежов А.Ю. 186
 Еремеев А.Г. 189, 211
 Ерёмин С.А. 65
 Eroшин Д.В. 253
 Ершова Н.И. 316

Ж

Жукова С.В. 202
 Журавлев А.А. 289
 Журба Е.В. 296
 Жобер Б. 72

З

Забежайлов А.О. 192, 201, 269,
 Забежайлов М.О. 101, 232, 235,
 277, 281, 287,
 304
 Зайнетдинов Р.И. 313
 Зайцев И.М. 216
 Зайченко А.С. 65
 Зайчук Т.В. 241, 285
 Закоржевский В.В. 254
 Захаров Е.В. 123, 152
 Зверева У.Г. 95
 Зеркаев А.И. 88
 Зорин Ю.В. 170

И

Иваницкий А.С. 150
 Иванов Н.З. 209
 Иванова М.В. 315
 Иванова С.М. 176

Игнатенков Б.А. 213
 Иевлев В.М. 185
 Ирошников А.И. 117, 152
 Исамов А.Н. 220

К

Калитин Е.И. 87
 Каргина Е.А. 259
 Кардашова Г.Д. 262
 Каримбаев Т.Д. 71, 186, 203
 Картабаев С.Ж. 121
 Качин А.Р. 204
 Кашкарова Е.М. 216
 Келина И.Ю. 188, 192, 196,
 269, 289, 300,
 301, 302, 304
 Кириллов А.В. 254
 Кирюшина В.В. 237, 257, 298
 Климакова Л.А. 68
 Климашина Е.С. 185
 Ковалева Ю.Ю. 257
 Коваленко П.В. 298
 Коваль О.В. 319
 Кованов А.Е. 164
 Кокин П.А. 142
 Комиссар О.Н. 41
 Кондратьев А.В. 63
 Константинов Д.Ю. 146
 Копыл Н.И. 76, 77
 Кораблева Е.А. 251, 283
 Кордо А.А. 150
 Кордо М.Н. 101, 235, 277
 Кореванов Р.В. 68
 Корзунин А.В. 265
 Корнейчук А.Н. 85, 156, 160
 Короткий С.А. 283
 Корохин Р.А. 95
 Кошкин В.И. 246
 Кравченко Е.А. 70
 Красный Б.Л. 246
 Крыльцов И.С. 207
 Крюков А.Е. 287
 Крюков А.М. 84, 158, 160
 Кузнецова М.Г. 202
 Кузнецова Т.М. 202
 Кулагина И.В. 84, 160

Кулас К.Ю. 318
Куликова Г.И. 275, 308
Куфтырев Р.Ю. 218
Кучерявый С.С. 225

Л

Ланин А.В. 101, 188, 235,
277, 287
Ласыченков Ю.Я. 198
Латыш С.И. 237
Лахин А.В. 140, 142
Лёба С. 93
Лебедев А.К. 113
Лебедева Ю.Е. 244
Лемешев Д.О. 296
Липилин А.С. 229
Лисаченко М.Г. 201, 269
Лисаченко Н.Г. 125, 162, 176
Литицкая В.А. 168
Лорян В.Э. 204, 254
Луппов А.А. 71

М

Магнитский И.В. 140
Мазур В.В. 98
Майзик М.А. 251
Макаров Н.А. 207
Мартиросян В.С. 117, 154
Маслов А.С. 172
Матюшевский Н.В. 130
Матюшкин С.Э. 74
Мезенцев М.А. 186
Мельников Д.А. 79, 272
Мешков С.А. 158, 253
Миронихин А.Н. 136
Миронов Р.А. 232, 287
Михайлов М.Д. 213
Михайлов С.А. 106
Михальчик И.Л. 188, 301, 302
Мишина Е.Н. 226
Мишнова Т.А. 281
Модин С.Ю. 244
Морозов С.В. 103
Морозова З.В. 123
Мосиук В.Н. 103, 178
Мотова Д.Б. 324
Моторнова М.С. 238

Мугла Д.Р. 200
Мурашкин Ю.Г. 158
Мухаметов Р.Р. 91

Н

Насонов Ф.А. 165
Неповинных В.И. 209, 291
Неповинных Л.К. 272
Нечепуренко А.С. 198
Никонов А.В. 229
Никулина О.В. 79, 271, 272
Новикова А.В. 211
Новикова И.И. 322
Ногарев М.В. 253

О

Обухова Н.С. 110, 123, 152,
154
Овсиенко А.И. 193
Олейников А.И. 87
Орданьян С.С. 193
Орлов А.А. 241
Осауленко А.В. 168
Осипова М.Е. 259
Осипова Ю.Н. 283
Остролицкий Д.А. 311

П

Паршин В.В. 211
Пахомов К.С. 100
Пермин Д.А. 211
Перова И.Е. 162
Петров В.Б. 318
Петрова О.Л. 162, 168
Плетинь И.И. 111
Плотников И.В. 189
Плясункова Л.А. 98, 283, 289,
301, 302
Погодин В.А. 258, 305, 307
Поженский С.В. 198
Половый А.О. 117, 143
Польский Ю.Е. 106
Попов А.Г. 125, 130, 162,
168
Попова Н.А. 244, 296
Портнова Я.М. 98, 128, 136

Постнов В.И. 111
 Прокофьев В.А. 264
 Просовский О.Ф. 220
 Просовский Ю.О. 220
 Просунцов П.В. 277
 Пунина М.А. 175
 Путляев В.И. 185, 201

Р

Рабинский Л.Н. 305
 Райлян В.С. 253
 Рипецкий А.В. 305
 Рогов Д.А. 279
 Розененкова В.А. 221, 264
 Рубцов М.А. 181
 Рудыкина В.Н. 269
 Румянцев В.И. 193
 Руппель В. 93
 Русаков Д.Ю. 132
 Русин М.Ю. 188, 196, 275,
 291, 300, 304
 Русланцев А.Н. 121, 128, 136
 Рыбаков К.И. 189
 Рыбакова Н.В. 85, 156
 Рыжова О.Г. 202
 Ристеска С. 89

С

Саванина Н.Н. 251, 275, 283,
 308
 Савченкова Г.А. 135
 Садикова Н.А. 84, 160
 Самсонов В.И. 46
 Санникова С.Н. 254
 Саратов А.А. 80
 Сафаралиев Г.К. 262
 Сафонов А.А. 80
 Сафронова Т.В. 185
 Свиридов А. Г. 41
 Сергеев В.Т. 113
 Сережин С.С. 70
 Сидельников С.А. 307
 Силкин А.Н. 46
 Симакина Е.И. 311
 Симачко А.И. 142
 Синани А.Б. 193

Ситников С.А. 305, 307
 Скоморохов А.О. 132
 Скудин В.В. 142
 Смирнов А.А. 181
 Смирнов А.Д. 246
 Соколов И.А. 188, 213
 Соколов П.С. 188
 Солнцев С.С. 221, 264
 Солодилов В.И. 95
 Соломатин Д.В. 95
 Соляев Ю.О. 305
 Сорокин А.А. 189, 211
 Сорокин В.Н. 74
 Сотников А.А. 58
 Спирин А.В. 229
 Стародубцева Н.И. 272
 Степанов В.А. 271
 Степанов Н.В. 158
 Степанов П.А. 79, 271, 272
 Стороженко П.А. 202
 Строева О.А. 79, 271
 Судник Л.В. 200
 Суздальцев Е.И. 241, 285
 СУЙ Гуанчжун 82
 СЮЙ Мэн 82

Т

Тарасовский В.П. 246
 Тарновский Р.В. 222
 Ташев В.П. 136
 Ташилов С.В. 136, 140
 Тесленко Е.А. 253
 Тимофеев А.Н. 116
 Тимофеев И.А. 116, 202
 Тимофеев П.А. 202
 Тихонов А.А. 65
 Тихонравов А.В. 56
 Томчани О.В. 103, 178, 213
 Тюшина Н.Б. 271

У

Улановский А.А. 216
 Устинова Ю.С. 241, 285

Ф

Фетисов В.С. 237, 257, 298

Филипенко А.Ф.	36
Фокин В.И.	253
Фролов М.А.	88
Фролова Т.С.	281
Фурминский А.А.	265

Я	
Якушкин П.Ю.	101
Якушкина В.С.	283
Ямщикова Г.А.	104

Х

Хабенко А.В.	176
Халиулин В.И.	146, 147
Хамицаев А.С.	298
Хандорина Е.А.	168
Харахонов Г.А.	253
Харитонов Д.В.	238, 253, 317
Харчук М.Д.	237
Хахалин А.В.	200
Хмельницкий А.К.	46
Холопцев В.В.	189

Ц

Цверава В.Г.	291
Ценцевицкий А.А.	106

Ч

Чалых А.Е.	100
Часовской Е.Н.	196, 300, 304
Чевыкалова Л.А.	301, 302
Чернов Е.И.	229
Чернокожев И.И.	140
Чесноков А.В.	63, 116
Чугунов С.А.	85, 156

Ш

Шабалов А.В.	146, 149
Шабанов Ш.Ш.	262
Шаталин Н.В.	311
Шашунькина О.В.	135
Шелковой А.Н.	143
Шер Н.Е.	275, 294, 308
Ширко А.А.	110, 152, 154
Шкарупа И.Л.	279
Шкиркова Л.М.	117, 152, 154
Шлаферов А.Л.	65
Шугаев М.В.	213
Шуль Г.С.	84, 85, 110, 123