



Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский
научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации
(ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ)

Технологическая платформа «Новые полимерные композиционные
материалы и технологии»

II Всероссийская научно-техническая конференция «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения»

Посвящается 80-летию со дня рождения
профессора, д.т.н. Георгия Михайловича Гуняева

материалы конференции

30 ноября 2017 г.

Электронное издание

Москва

2017

УДК 678

ББК 35.719 + 30.36 + 34.651

П50

Редакционная коллегия:

В.А. Гончаров, к.т.н., зам. начальника лаборатории ФГУП «ВИАМ»;
А.Г. Гуняева, к.т.н., начальник сектора ФГУП «ВИАМ»; Е.А. Шеин, к.т.н.,
главный специалист отдела ФГУП «ВИАМ»; М.С. Закржевская, инженер 2-й
категории ФГУП «ВИАМ».

П50 Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы II Всероссийской научно-технической конференции (г. Москва, 30 нояб. 2017 г.), [Электронный ресурс] / ФГУП «ВИАМ». – М. : ВИАМ, 2017. – 295 с. – ISBN 978-5-905217-18-0. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/Vista/7; Adobe Reader; дисковод CD-ROM; 10 Мб. – Загл. с экрана.

В сборнике представлены доклады в области производства полимерных композиционных материалов и изделий из них. Рассмотрены вопросы производства термопластичных композиционных материалов для авиации, применения новых типов углеродных волокон, молниезащитных покрытий, модифицированных эпоксидных связующих, освещены вопросы проектирования несущих конструкций.

УДК 678

ББК 35.719 + 30.36 + 34.651

Организационный комитет

Председатель:

А.Е. Раскутин – к.т.н., начальник НИО «Полимерные композиционные материалы и технологии их переработки» ФГУП «ВИАМ».

Заместители председателя:

И.Н. Гуляев – к.т.н., начальник лаборатории «Углепластики и органиты» ФГУП «ВИАМ».

Члены организационного комитета:

Д.Е. Каблов – к.т.н., заместитель начальника управления ФГУП «ВИАМ»;

Д.Ю. Буколов – начальник управления ФГУП «ВИАМ»;

А.А. Каньгин – начальник управления ФГУП «ВИАМ»;

В.Г. Дворяшин – заместитель начальника управления ФГУП «ВИАМ»;

П.Н. Тимошков – начальник лаборатории ФГУП «ВИАМ»;

В.П. Аржевитов – начальник отдела ФГУП «ВИАМ»;

М.Н. Москвитин – начальник сектора ФГУП «ВИАМ»;

Д.А. Браилко – начальник сектора ФГУП «ВИАМ»;

Е.А. Цилин – инженер 2-й категории ФГУП «ВИАМ»;

А.В. Бабин – ведущий инженер ФГУП «ВИАМ»;

И.Ю. Ширяева – инженер по маркетингу 1-й категории ФГУП «ВИАМ»;

И.В. Тарасов – ведущий инженер ФГУП «ВИАМ»;

Е.А. Пашкова – специалист по выставочной деятельности ФГУП «ВИАМ».

СОДЕРЖАНИЕ

Модель намоточного станка, оснащенного программно-управляемыми устройствами регулирования технологических параметров намотки.....	7
Князев Д.Н.; Андреев Д.С.; Субботина Е.А.	
Современные полимерные материалы для изготовления элементов системы кондиционирования воздуха в летательных аппаратах	16
Вешкин Е.А., Постнов В.И., Сатдинов Р.А., Стрельников С.В.	
Композиционные материалы на основе бутадиен-нитрильного каучука и 2D-углеродных структур	35
Неверовская А.Ю.; Возняковский А.А.; Отвалко Ж.А.; Возняковский А.П.	
Молниезащитные покрытия на основе углеродных наполнителей для ПКМ нового поколения	45
Гуняева А.Г.; Гуляев И.Н.; Комарова О.А.	
Анализ и синтез структуры композиционного материала для изделий, изготавливаемых методом намотки	56
Исаева В.Г.; Князев Д.Н.	
Решение оптимизационных задач при программировании станков для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки	65
Князев Д.Н.; Искиндиров М.С.	
Применение инфракрасной термографии при дефектации деталей машин из полимерных композиционных материалов	73
Косенко Е.А.; Зорин В.А.; Баурова Н.И.	
Арамидные органопластики, состояние и перспективы	79
Кулагина Г.С.; Железина Г.Ф.; Тихонов И.В.; Дориомедов М.С.	
Оценка влияния анизотропии короткоармированного композиционного материала на механические характеристики проушин	92

Куркин Е.И.; Спирина М.О.; Чертыковцева В.О.

Композиционные материалы на основе терморезактивных связующих и стеклянных наполнителей для изделий авиационной техники..... 102

Курносков А.О.; Соколов И.И.; Мельников Д.А.

Применение волоконных брэгговских решеток для определения деформации материала конструкции из полимерного композиционного материала 116

Махсидов В.В.; Кашарина Л.А.; Евдокимов А.А.; Раскутин А.Е.

Полимерные композиционные материалы для перспективных авиационных двигателей..... 131

Мишуков К.С.; Мишкин С.И.; Гуняева А.Г.

Применение гибридных композиционных материалов в конструкции кронштейнов 146

Павлов А.А.; Павлова С.А.

Клеевые связующие для полимерных и слоистых алюмополимерных композиционных материалов..... 157

Петрова А.П.; Лукина Н.Ф.; Котова Е.В.

Применение ускоренных электронов для синтеза, модифицирования и анализа полимеров и композиционных материалов..... 171

Пономарев А.В.

Молекулярно-динамическое моделирование нанокompозита органо-модифицированный монтмониллонит – полиамид-6 185

Скоморохов А.С.; Книжник А.А.; Потапкин Б.В.

Термопластичные композиционные материалы для авиации 196

Сорокин А.Е.; Петрова Г.Н.; Сагомонова В.А.; Ларионов С.А.; Малышенков С.В.; Перфилова Д.Н.

Определение кинематических параметров раскладчика намоточного станка..... 218

Князев Д.Н.; Субботина Е.А.

Моделирование формообразования Т-образных фитингов методом автоматизированной намотки..... 229

Устинова Е.С.

Интенсификация процессов получения композиционных материалов в аппаратах вихревого слоя 241

Феоктистова Е.П.; Захарычев Е.А.; Войтович В.А.; Шварев Р.Р.

Использование методов термического анализа при изучении структурообразования в теромреактивных матрицах..... 254

Хасков М.А.

Применение полимерных композиционных материалов и аддитивных технологий для создания дренированных аэроупругих моделей ЛА 266

Азаров Ю.А.; Черноволов Р.А.

Несущие конструкции сооружений из пултрузионных стеклопластиковых профилей..... 281

Фахрутдинов А.Э., к.т.н.; Арипов Д.Н.

УДК 67.05

Модель намоточного станка, оснащенного программно-управляемыми устройствами регулирования технологических параметров намотки

Князев Д.Н.¹, к.т.н.; Андреев Д.С.¹; Субботина Е.А.¹

bodimus@mail.ru, dmistand@mail.ru, katy504@yandex.ru

¹*НИИ ВИУС ЮРГПУ (НПИ)*

Аннотация:

Высокие значения эксплуатационных характеристик композитных изделий, изготавливаемых намоткой, достигаются путем включения в состав оборудования устройств контроля и регулирования технологических параметров намотки. Для обоснованного выбора кинематических и энергетических характеристик данных устройств, целесообразно создание модели намоточного оборудования, оснащенного программно-управляемыми устройствами регулирования технологических параметров намотки.

Ключевые слова:

устройства контроля и регулирования технологических параметров метода намотки.

Одной из важнейших задач получения изделий из полимерных композиционных материалов с высокими и стабильными эксплуатационными характеристиками является обеспечение постоянства заданных значений технологических параметров в процессе намотки.

Технологическими параметрами являются:

- натяжение материала;
- скорость движения материала в пропиточном узле станка;
- расход материала.

Для регулирования технологических параметров обычно применяются автономные автоматические системы, представляющие собой мехатронные комплексы, которыми оснащают тракт намоточного станка. Выбор характеристик устройств зависит от кинематической схемы оборудования и геометрической формы изготавливаемых изделий, поэтому целесообразно определять характеристики на основании результатов математического и численного моделирования. Кроме того, полезно рассмотреть возможность программного управления исполнительными органами систем регулирования технологических параметров намотки, как альтернативного варианта автономным системам.

В настоящее время для численного моделирования и исследования метода намотки используются кинематические модели намоточных станков. Кинематическая схема охватывает основные исполнительные органы станка, задающие положение и ориентацию в пространстве выходного звена и всех промежуточных звеньев. Вместе с тем, исполнительные органы устройств регулирования технологических параметров также могут рассматриваться как исполнительные органы намоточного станка, поскольку приводятся в движение при помощи сервоприводов. Таким образом, кинематическая модель станка может быть расширена за счет добавления в нее исполнительных органов регуляторов технологических параметров.

Для повышения точности определения натяжения, расхода материала, скорости движения материала в пропиточном узле станка существующую кинематическую модель предлагается также дополнить моделью тракта, состоящей из валков, по которым перемещается материал. При этом в модели учитываются диаметры валков, а также признак, определяющий

неподвижность валка или способность вращения валка вокруг собственной оси.

Исполнительный орган для регулирования всех перечисленных технологических параметров может иметь одну и ту же конструкцию вилочного типа (рисунок 1).

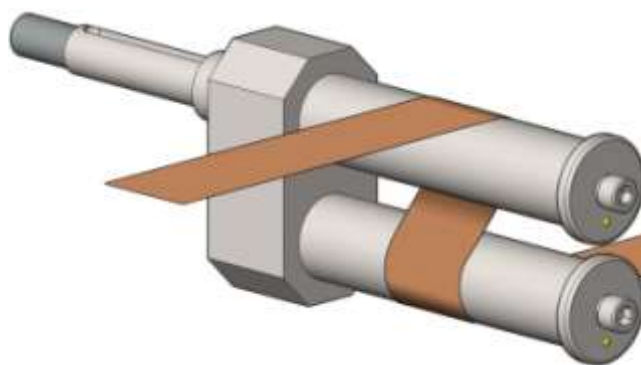


Рис. 1 – Исполнительный орган вилочного типа

При этом в случае регулирования натяжения материала исполнительный орган меняет натяжение материала за счет изменения угла охвата материалом неподвижных валков, а в случае регулирования расхода и скорости движения материала по пропиточному узлу расход меняется за счет аккумуляирования и высвобождения материала. Поэтому для регулятора натяжения расстояние между валками (рисунок 1) должно быть минимальным, а для регулятора расхода расстояние между валками, влияющее на аккумулятивную способность устройства, должно выбираться по результатам численного моделирования с учетом геометрических особенностей изготавливаемых композитных изделий.

Фрагмент примера расширенной кинематической схемы станка, оснащенного регулятором натяжения показан на рисунке 2.

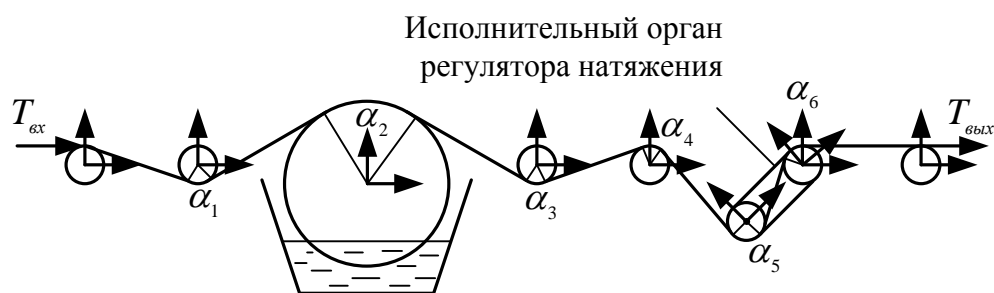


Рис. 2 – Фрагмент расширенной кинематической схемы
намоточного станка

Использование модели намоточного станка, оснащенного программно-управляемыми устройствами регулирования технологических параметров намотки, заключается в следующем.

Для определения закона движения натяжителя на основании моделирования сначала определяется коэффициент усиления натяжения тракта для двух крайних положений исполнительного органа натяжителя. После этого пользователем задается значение натяжения в рамках полученного диапазона возможных натяжений. Далее выбирается такой закон движения натяжителя, при котором выходное натяжение постоянное и соответствует заданному пользователем.

На рисунке 3 показан пример работы алгоритма. Красными линиями задаются граничные значения натяжения, которые могут быть получены на выходном звене намоточного станка. Синей прямой линией показано значение натяжения, которое выбрал пользователь. Прямой характер линии говорит о том, что натяжение на выходном звене должно быть постоянным, несмотря на перемещения рабочих органов намоточного станка и сложную геометрию наматываемого изделия. На нижнем графике представлен закон движения исполнительного органа натяжителя, при котором обеспечивается заданное постоянное значение натяжения на выходном звене станка.

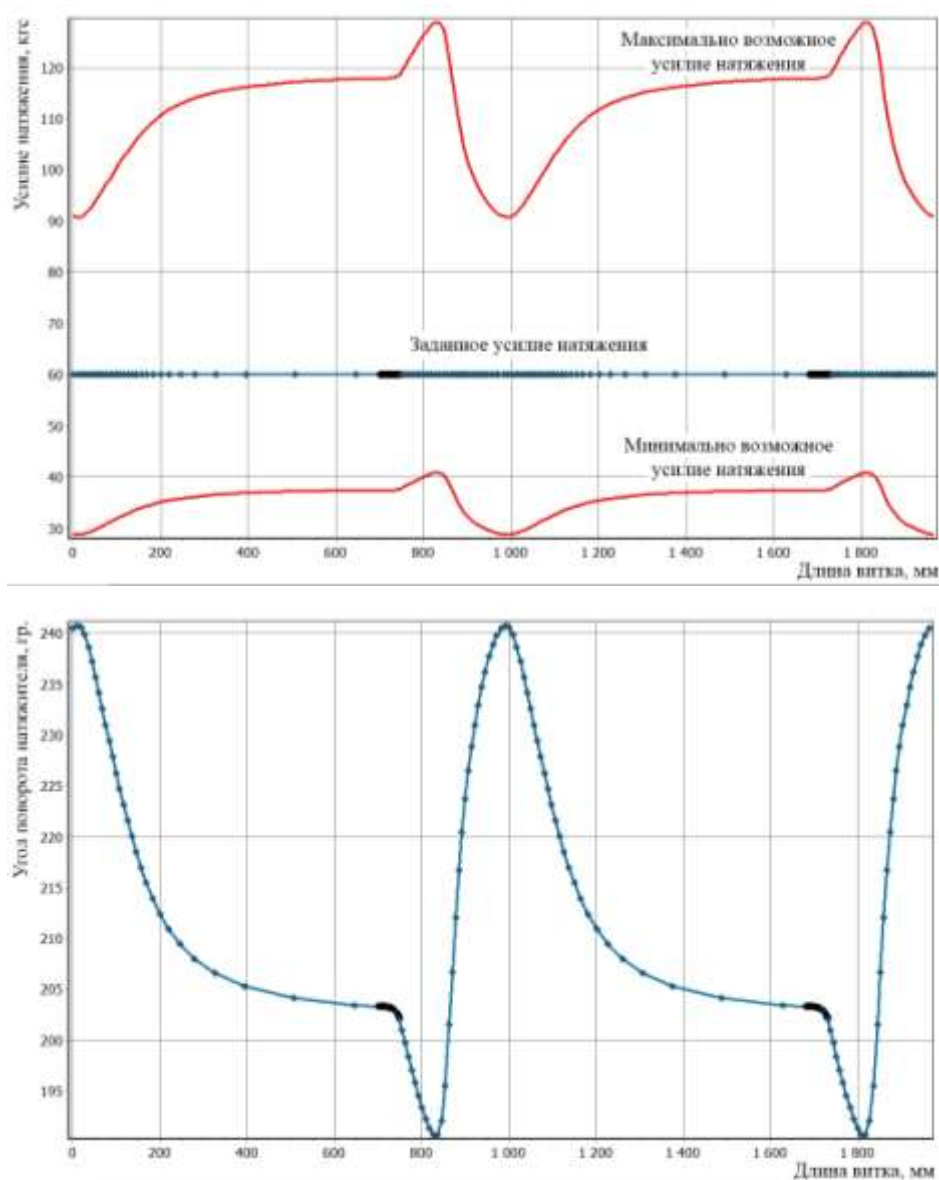


Рис. 3 – Диапазон возможных значений усилия натяжения (вверху) и траектория движения исполнительного органа регулятора, обеспечивающая постоянное усилие натяжения в 60 кгс на выходном звене намоточного станка (внизу)

Одним из требований технологического процесса намотки является натянутое состояние ленты в тракте намоточного станка в процессе намотки. Однако, потенциально лента может прослабляться на участках тракта которые перемещаются друг относительно друга в процессе намотки.

Предлагаемая расширенная модель позволяет оценить наличие и величину провисаний материала, а также выбрать закон движения устройства, которое управляет расходом материала в тракте станка. Назовем такое устройство компенсатором провисаний.

Покажем работу компенсатора провисаний на примере. На рисунке 4 показан график расхода материала на оси компенсатора при выключенном состоянии компенсатора. Отсутствие монотонного возрастания графика свидетельствует о наличии провисаний материала.

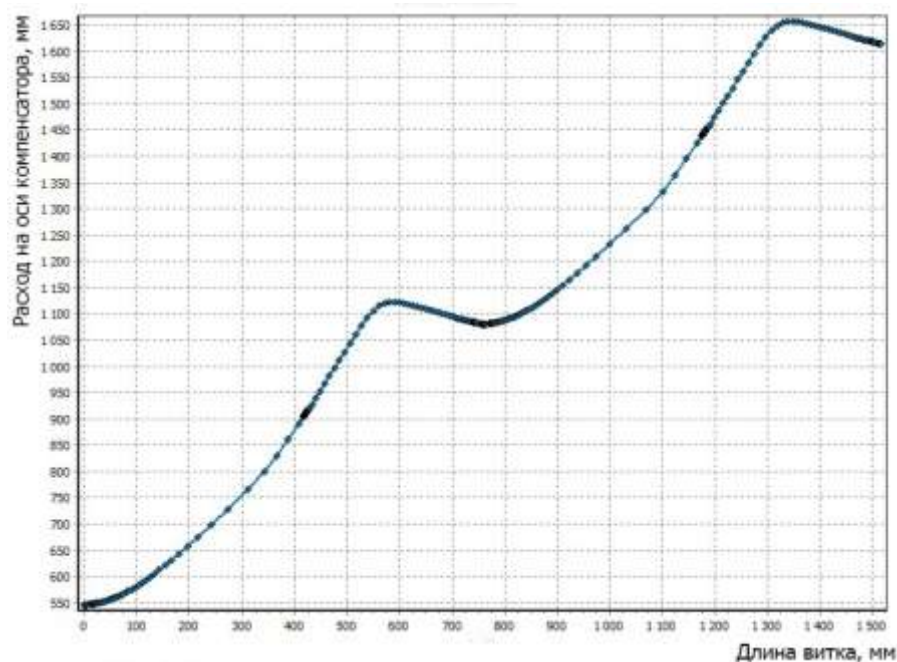


Рис. 4 – График исходного расхода материала на оси компенсатора

В результате работы алгоритма определяется закон движения программно-управляемого компенсатора вилочного типа (рисунок 5).

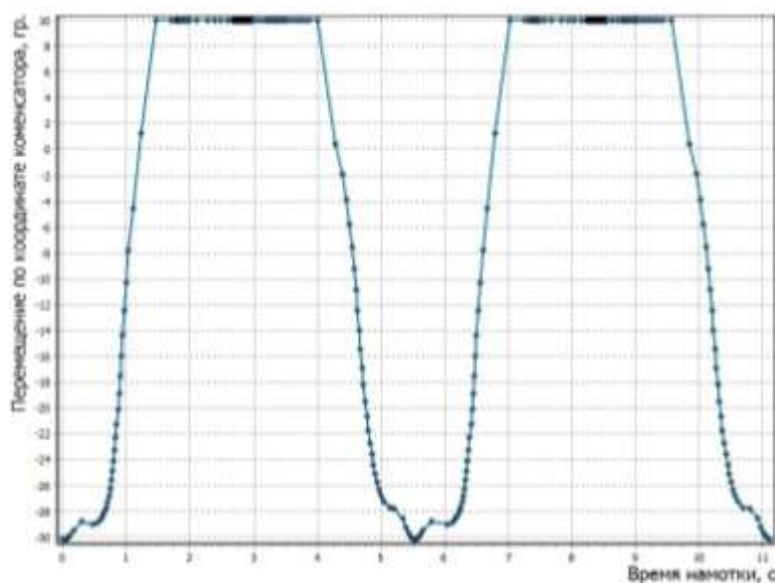


Рис. 5 – Закон движения компенсатора

График расхода материала при работающем компенсаторе показан на рисунке 6.

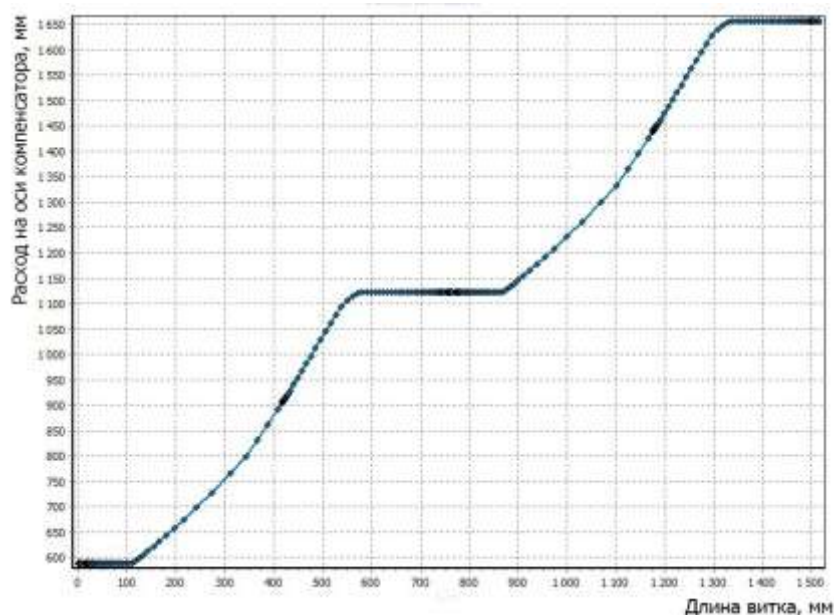


Рис. 6 – График расхода материала на оси компенсатора без провисаний

Задачу равномерного нанесения связующего на материал решает еще один регулятор - стабилизатор скорости протяжки материала в пропиточном узле намоточного станка.

Добавление в кинематическую схему станка стабилизатора скорости выполняется по тем же правилам, которые действуют для основных звеньев станка (рисунок 7).

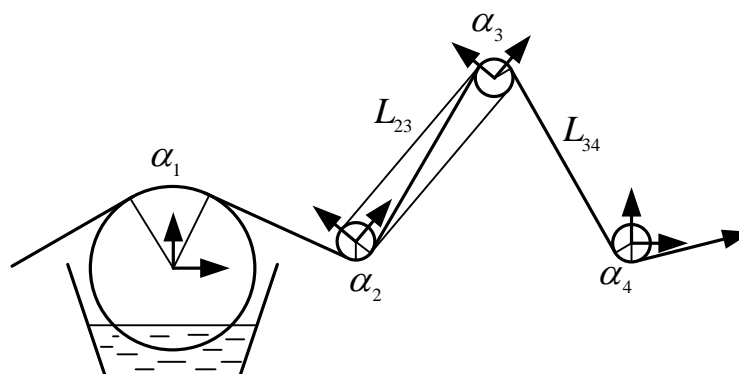


Рис. 7 – Схема фрагмента лентоформирующего тракта с барабаном пропитки и стабилизатором

Скорость движения материала в пропиточном узле зависит от закона движения стабилизатора. Покажем это на примере.

График расхода материала в пропиточном узле без стабилизатора представлен на рисунке 8.

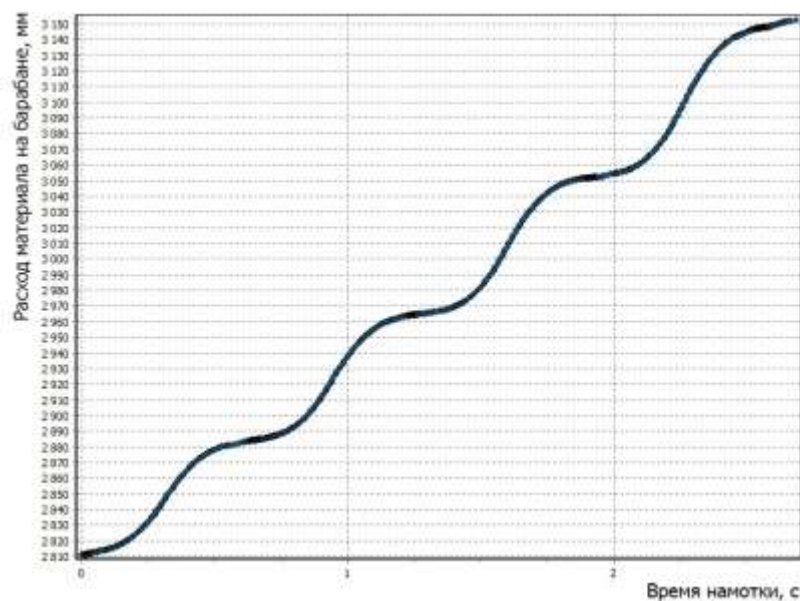


Рис. 8 – График расхода материала в пропиточном узле

На рисунке 9 показан график закон движения стабилизатора, который должен обеспечивать постоянную скорость протяжки материала по пропиточному узлу.

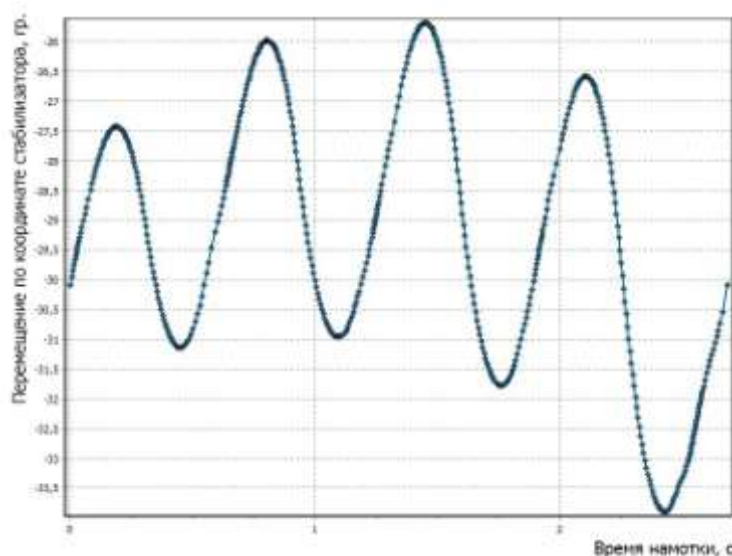


Рис. 9 – Закон движения стабилизатора

Результат работы стабилизатора можно видеть на рисунке 10. Здесь представлен график расхода материала в пропиточном узле с работающим стабилизатором.

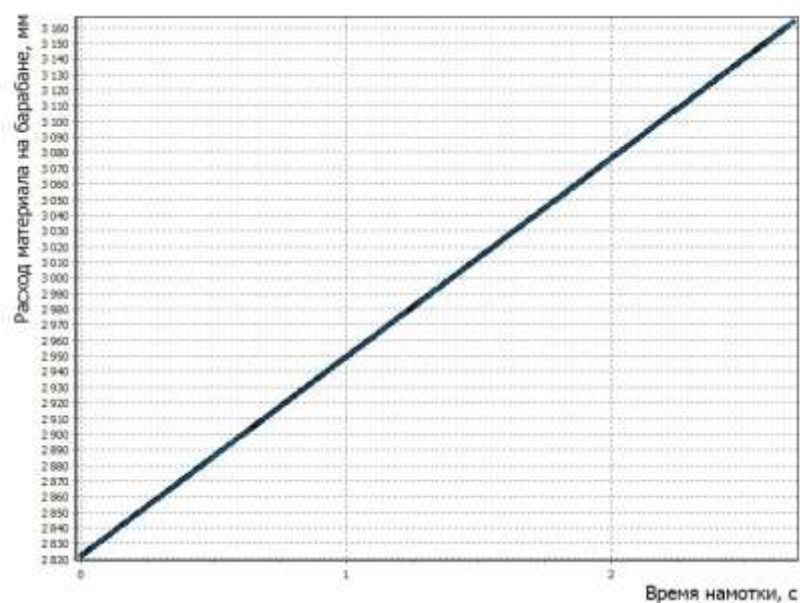


Рис. 10 – График расхода материала в пропиточном узле после стабилизации

Представленные в настоящей работе результаты показывают, что предлагаемая модель намоточного станка, оснащенного программно-управляемыми устройствами регулирования технологических параметров намотки, является полезной в практическом смысле и должна получить дальнейшее развитие.

УДК 678.8

Современные полимерные материалы для изготовления элементов системы кондиционирования воздуха в летательных аппаратах

Вешкин Е.А.¹; Постнов В.И.¹; Сатдинов Р.А.¹; Стрельников С.В.¹

admin@viam.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

Аннотация:

Проведен анализ импортных материалов для изготовления воздухопроводов систем кондиционирования воздуха и на основании его определены основные минимальные требования к разрабатываемым российским материалам. Выбраны составы ПКМ для гибких и жестких элементов СКВ, исследованы и отработаны технологические параметры изготовления стеклопластика для жестких элементов СКВ. Разработан новый отечественный стеклопластик для изготовления жестких элементов воздухопроводов СКВ. Проведено исследование его свойств.

Ключевые слова:

воздуховоды СКВ из ПКМ, стеклопластик, свойства, аналог, препрег, ПКМ.

Введение

Одними из наиважнейших задач в развитии аэрокосмической техники являются снижение массы и увеличение эксплуатационного ресурса летательных аппаратов (ЛА), для обеспечения эффективности и надежности

при их использовании в коммерческих целях. Значительного прогресса в этом направлении удалось добиться за счет широкого применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), взамен металлов в конструкциях аэрокосмической техники, что обусловлено их уникальными свойствами, таким как низкая объемная плотность, химическая и коррозионная стойкость, высокая удельная прочность, возможность создания крупногабаритных пространственно-сложных конструкций, способствующих снижению количества и массы соединительных элементов и др.

В этой связи для создания перспективных ЛА не обойтись без разработки новых и совершенствование уже разработанных ПКМ, при этом разрабатываемые технологии для их переработки должны основываться на замкнутых процессах, когда отходы или минимальны и безопасны, или вовсе отсутствуют [1]. А для этого на важнейшее стратегическое направление нашей страны должна быть выдвинута отечественная наука [2, 3].

В настоящее время в РФ создаются новейшие региональные и ближне-среднемагистральные пассажирские самолеты, а также запланировано создание широкофюзеляжного пассажирского самолета. Однако, для обеспечения их конкурентоспособности на внутреннем и мировом рынках, необходимо применение в их конструкциях современных материалов. Не является исключением и конструкция система кондиционирования воздуха (СКВ). СКВ - бортовая система жизнеобеспечения. Она обеспечивает необходимые параметры давления, влажности, температуры и состава воздуха во всем диапазоне режима полета необходимые для поддержания жизнедеятельности экипажа и пассажиров (при полетах в различных климатических условиях) [4, 5]. И как все современные системы, является сложной в проектировании системой из-за необходимости получения минимальной массы, компактного размещения, надежности и максимального комфорта для пассажиров и членов экипажа, в том числе и по создаваемому шуму. В связи с вышеизложенным, материалы для проектирования данной системы должны отвечать следующим современным требованиям:

- обеспечивать требования по пожарным характеристикам (АП-25 или FAR25) [12];
- иметь минимально возможную массу и высокую надежность в эксплуатации в течение всего технического ресурса самолета;
- отвечать требованиям по герметичности, согласно ОСТ 1 00128-74;
- быть технологичными и позволять выпуск большого количества элементов;
- обеспечивать стабильность свойств от партии к партии.

При этом технологии его переработки в изделия должны быть трудо-, энерго- и ресурсосберегающими в соответствии с мировым трендом направленном на бережливое производство.

Учитывая прогнозы мирового рынка, которые показывают увеличение спроса на пассажирские ЛА, можно сделать вывод о росте объемов поставок СКВ авиационным предприятиям, в том числе и Российским [6, 7]. Мировыми лидерами по производству элементов СКВ являются такие компании как: BWT Senior Aerospace (Англия), Flexco Composite (США), Flexfab (США), Technifab (США). Из отечественных производителей – ОКБ «Аэрокосмические системы».

В современных пассажирских ЛА длина воздуховодов СКВ может достигать более ста метров, а масса – 500-600 кг. При этом СКВ ЛА состоит в основном из жестких сложно профилированных воздуховодов (тройники, трубы, патрубки и т.п.) и гибких рукавов для их соединения (рис. 1), что позволяет сэкономить полезное пространство внутри фюзеляжа.

В РФ в настоящее время элементы СКВ ЛА изготавливают из алюминиевых сплавов или с применением импортных или ранее разработанных отечественных полимерных материалов. Однако из-за большой трудоемкости изготовления, энергозатратного процесса, потребности снижения веса и коррозионной активности металлических элементов, а также ограничениями применения импортных полимерных материалов, связанных с действием санкций, разработчики отечественной

авиационной техники ведут поиск российских материалов с низкой плотностью, обеспечивающих необходимые прочностные и эксплуатационные характеристики, предъявляемые к конструкции СКВ. В этой связи разработка современных ПКМ для системы кондиционирования воздуха ЛА, ввиду специфики их изготовления, является актуальной задачей, которая позволит уменьшить время и энергозатраты при изготовлении сложнопрофильных воздуховодов и решить проблему импортозамещения [8, 9].



Рис. 1 – Виды воздуховодов СКВ ЛА

Стоит отметить, что попытка внедрения ПКМ для изготовления воздуховодов СКВ ЛА в нашей стране предпринималась в конце восьмидесятых годов прошлого столетия. Однако разработанные тогда ПКМ не отвечают современным требованиям по пожаробезопасным характеристикам и имеют большую трудоемкость и энергоемкость изготовления.

В этой связи целью настоящей работы является анализ зарубежных полуфабрикатов и ПКМ из них, используемых для изготовления жестких и гибких воздуховодов СКВ ЛА, формирование основных требований к ним и разработка отечественного аналога материала для жестких элементов СКВ.

Данная работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2.: Разработка стеклопластика на основе ткани с низкой поверхностной плотностью и пожаробезопасного быстроотверждаемого связующего ВСФ-16М («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»)[10].

Материалы и методы

Измерение вязкости полимерного связующего в зависимости от температуры нагрева и времени выдержки осуществлялось по ГОСТ 25276-82 с применением ротационного вискозиметра Брукфильда САР 2000+Н.

Для проведения термогравиметрического анализа применялись приборы Derivatograf Q-1000 компании MOM и STA 449 F3 фирмы Netzsch.

Определение реакционной способности термореактивных связующих методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) проводилась на приборе DSC-204 F1 фирмы NETZSCH.

Определение температуры стеклования матрицы в пластике проводилось методом ДМА на приборе DMA 242E (Netzsch).

Определение предела прочности и модуля упругости при растяжении стеклопластиков проводилось в соответствии с ГОСТ 11262-80 на испытательной машине Zwick/Roell Z050.

Предел прочности при сжатии стеклопластиков определялся в соответствии с ГОСТ 4651-2014.

Определение предела прочности образцов стеклопластика при статическом изгибе осуществлялось в соответствии с ГОСТ 4648-2014.

Определение предела прочности образцов стеклопластиков при межслойном сдвиге по ГОСТ 32659-2014, РД 50-675-88.

Определение объемной плотности $\rho_{пл}$ осуществлялось по ГОСТ 15139-69.

Результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, мировая тенденция изготовления СКВ современных ЛА подразумевает применение в ее конструкции жестких патрубков и коробов, а также гибких рукавов в качестве трубопроводов, выполненных из ПКМ. В этой связи с целью формирования комплекса минимально допустимых свойств разрабатываемого отечественного стеклопластика рассмотрены свойства зарубежных аналогов для изготовления жестких элементов СКВ [11, 12]. В таблице 1 приведены

свойства препрега и стеклопластиков на их основе (зарубежного производства), используемых западными компаниями для изготовления элементов СКВ ЛА.

Таблица 1

Основные показатели импортных ПКМ

Показатель	Зарубежный аналог на основе препрега Cycom 799HE/120, Cytec США	Зарубежный аналог на основе препрега PHG831-44-40, Gurit Германия	Зарубежный аналог на основе препрега 200/38%/644, Hexcel США
Связующее	фенольное	фенольное	фенольное
Вес наполнителя, г/м ²	105±5	105±5	305±15
Содержание связующего, %	40-45	40-45	35-40
Поверхностная плотность препрега, г/м ²	170-190	170-190	470-490
Предел прочности при растяжении, МПа	280	300	520
Предел прочности при изгибе, МПа	-	500	490
Предел прочности при сжатии, Мпа	230	250	365
Плотность пластика, г/см ³	-	1,9	-
Горючесть	-	Трудно-сгорающий	-
Толщина монослоя пластика, мм	0,10	0,10	0,25
Режим формования: - температура, °С	121	140	135
- время, мин	60	50	90

В результате анализа свойств, приведенных в таблице 1 было установлено, что изготовление препрегов и ПКМ на их основе ведется с применением стеклонеполнителей. Данный факт свидетельствует о том, что для изготовления элементов СКВ используется ПКМ с низкой объемной плотностью, с высокой коррозионной стойкостью, со средними показателями удельной прочности и жесткости, а также с относительно низкой стоимостью. Кроме того, применение стеклотканей с различной поверхностной плотностью обуславливается наличием нескольких толщин стенок в конструкциях коробов элементов СКВ. Так в толстостенных конструкциях, рационально комбинировать стеклоткани с большей величиной слоя в пластике с стеклотканями, дающими меньшую толщину

слоя. Так, например, внешние слои выполнять из препрега с низкой поверхностной плотностью – меньшей толщины слоя, а средние из более тяжелого препрега, который даст большую толщину слоя и снизит трудоемкость при раскрое и выкладки заготовок. В тоже время в тонкостенных коробах СКВ необходимо использование только стеклотканей с низкой поверхностной плотностью. Поэтому для снижения массы воздуховодов, за счет уменьшения толщины стенок пластика, существует необходимость использование материалов с низкой поверхностной плотностью. Еще одной отличительной характеристикой при выборе материала является режим его формования, а точнее конечная температура отверждения полимерной матрицы и продолжительность выдержки на ней, чем ниже данные показатели, тем экономичнее процесс отверждения.

Так как в настоящее время уже существует разработанный в ФГУП «ВИАМ» стеклопластик марки ВПС-42П на основе стеклоткани марки Т-15(П)-76, с полыми нитями, который можно использовать как тяжелый препрег, то на основании проведенного анализа, и с целью создания тонкостенных конструкций воздуховодов низкого давления СКВ, были сформированы минимальные требования к стеклопрепрегу с низкой поверхностной плотностью, а также к ПКМ на его основе (таблица 2)[13,14].

Таблица 2

Основные характеристики разрабатываемого ПКМ

Показатель	Разрабатываемый стеклопластик, Россия	Аналог на основе препрега DAN 407 (PHG831-44-40), Германия	Аналог на основе препрега Cycom 799HE/120, Cytec, США
Предел прочности при сжатии МПа, не менее	250	250	230
Плотность пластика г/см ³ , не более	1,9	1,9	-
Горючесть	Трудногорающий	-	-
Режим формования: - температура, °С - время, мин	140 30	140 50	121 60

Из имеющего опыта и выбранных минимальных показателей основных характеристик (таблица 2) был определен приемлемый наполнитель и полимерное связующее для разработки нового материала. Так на основании работ [15,16,17] и проведенного сравнительного анализа свойств стеклотканей с низкой поверхностной плотностью, не выше 120 г/м² (таблица 3) и фенолформальдегидных связующих (таблица 4), был выбран состав разрабатываемого стеклопластика.

Таблица 3

Характеристики стеклотканей

Марки стеклотканей	Поверхностная плотность, г/м ²	Разрывная нагрузка основа/уток, кг
А-1	108±10	77,5/75,5
Т-64(ВМП)	98±5	135/70,5
Э3/1-100	108±10	72/67
в препреге Сусом 799Н/120, Сутес, США	105±10	125/120
в препреге РН831-44-40, Gurit, Германия	105±10	-

Таблица 4

Сравнительные свойства связующих

Показатель	ВСФ-16М, Россия	РС-Н, Россия	Сусом 799НЕ, США	РН 831, Германия
Внешний вид, цвет	Однородный раствор коричневого цвета	Однородный прозрачный раствор красно-коричневого цвета без механических включений	-	-
Концентрация, %	72-80	73-80	65	65
Условная вязкость при температуре (20±1)°С по вискозиметру ВЗ- 246 с диаметром сопла 6 мм	20-60	10-65	-	-
Время желатинизации при температуре (120±2) °С, мин	3-8	6-12	7-17	7-15

Из данных приведенных в таблице 4 видно, что разработанные отечественные связующие по своим показателям не уступают зарубежным аналогам, а по содержанию растворимых веществ имеют преимущество, т.к. при работе с ними происходит меньший выброс в атмосферу токсичных летучих веществ. В этой связи для создания нового стеклопластика были выбраны связующее марки ВСФ-16М, отличающееся высокими пожаробезопасными характеристиками и имеющее короткий цикл отверждения при температуре 120°C, а также стеклоткань марки Т-64, имеющая наименьшую из анализируемых отечественных наполнителей поверхностную плотность и наибольшие прочностные показатели по основе.

В последующим в результате проведенной работы был создан стеклопластик марки ВПС-42П/Т-64, имеющий уровень основных свойств, приведенный в таблице 5.

Таблица 5

Свойства стеклопластика марки ВПС-42П/Т-64 в сравнении с аналогом

Свойства	Стекло-пластик марки ВПС-42П/Т-64	Зарубежный аналог на основе препрега DAN 407 (PHG831-44-40), Германия
Прочность при растяжении, σ_B , МПа	620	500
Прочность при сжатии, $\sigma_{сж}$, МПа	510	250
Прочность при изгибе, $\sigma_{изг}$, МПа	815	-
Прочность при сдвиге, $\sigma_{сд}$, МПа	49	-
Плотность, г/см ³	1,7-1,72	1,9
Пористость, %	3,0-3,8	≤ 8
Содержание связующего, %	36,9	-

Из таблицы можно увидеть, что разработанный стеклопластик имеет уровень свойств выше западных аналогов при этом все показатели, отвечают выбранным минимальным свойствам, приведенным в таблице 2.

Для его разработки на первоначальном этапе было спрогнозировано оптимальное соотношение наполнитель/матрица в создаваемом ПКМ, при

условии его абсолютной монолитности. Для этого на испытательной машине Zwick/Roell Z050 проведено исследование влияния величины уплотнения «сухих» слоев наполнителя (Т-64) от прикладываемого удельного давления. По результатам исследований установлена зависимость величины слоя ткани марки Т-64 от создаваемого удельного давления, которая представлена в графическом виде на рисунке 2.

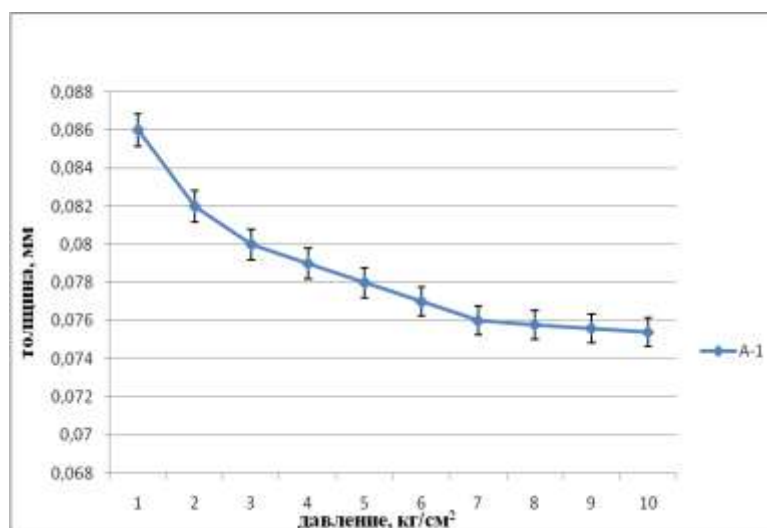


Рис. 2 – Зависимость толщины слоя стеклоткани марки А-1 от величины удельного давления

Для формования пластика было выбрано давление 2 кг/см², при этом толщина слоя в пластике должна быть около 0,082 мм (рисунок 2). С учетом полученных экспериментальных результатов (толщины и поверхностной плотности ткани, а также объемной плотности стеклонаполнителя и связующего), была рассчитана норма связующего в стеклопластике для разрабатываемого ПКМ [18]. По полученным расчетам она составила 37%. Однако, с учетом присутствующих в полимерном связующем летучих веществ и поликонденсационной влаги, массовая доля связующего в препреге должна составлять не менее 40%

На основании вышеизложенного были выбраны, а в дальнейшем уточнены, параметры технологического процесса изготовления препрега на пропиточной установке. В результате проведенной отработки и оценки воспроизводимости процесса пропитки были изготовлены несколько

опытных партий препрега. По проведенным исследованиям свойств указанных выше партий препрега были установлены основные параметры разработанного препрега стеклопластика марки ВПС-42П/Т-64, которые представлены в таблице 6.

Таблица 6

Характеристики разработанного ПКМ

Показатель	Стеклопластик марки ВПС-42П/Т-64
Связующее, марка	ВСФ-16М
Стеклоткань, марка	Т-64
Массовая доля связующего в препреге, %	40-48
Поверхностная плотность препрега г/м ²	160-200
Массовая доля летучих веществ, %	Не более 8

Исследования по определению гарантийного срока хранения препрега показали, что препрег остается пригодным для применения в течении 90 дней, при температуре хранения от 0 до плюс 5°С, и 30 дней при температуре хранения от плюс 15 до плюс 25°С.

В настоящее время основным способом изготовления стеклопластика, является послойная выкладка стеклопрепрега на формообразующую оснастку, с последующей укладкой вспомогательных материалов и дальнейшим отверждением полученной сборки под вакуумным мешком в автоклаве, термопечи или прессе. Однако для формования пустотелых замкнутых коробов СКВ, имеющих различные ответвления для их стыковки с гибкими воздуховодами, перечисленные методы не приемлемы. В этой связи был предложен метод изготовления коробов СКВ, с созданием избыточного давления при формовании эластичным пуансоном в виде камеры, помещаемой внутрь заготовки. При этом снаружи заготовка ограничена оболочкой формообразующей оснастки.

Перед обработкой изготовления экспериментальных образцов коробов, с использованием приборов термоанализа и вакуум-автоклавного способа

формования были отработаны основные параметры технологического режима отверждения стеклопластика, обеспечивающие заявленные в таблице 5 свойства. Проведенные исследования показали, что температура окончательного формования стеклопластика ВПС-42П/Т-64, может быть в диапазоне от 130 до 180°C. При этом установлено, что с увеличением температуры изотермической выдержки снижается время формования. В результате проведенных исследований была разработана технология изготовления стеклопластика марки ВПС-42П/Т-64.

Для проверки технологичности разработанного материала, а также с целью опробования и отработки изготовления экспериментальных образцов жестких коробов СКВ из ПКМ, была модернизирована существующая конструкция элемента СКВ, материал для изготовления которой с металла был заменен стеклопластиком марок ВПС-42П и ВПС-42П/Т-64 (рисунок 3). Для реализации задумки была спроектирована и изготовлена разборная формообразующая полимерная оснастка, состоящая из 4 частей (рисунок 4) [19].

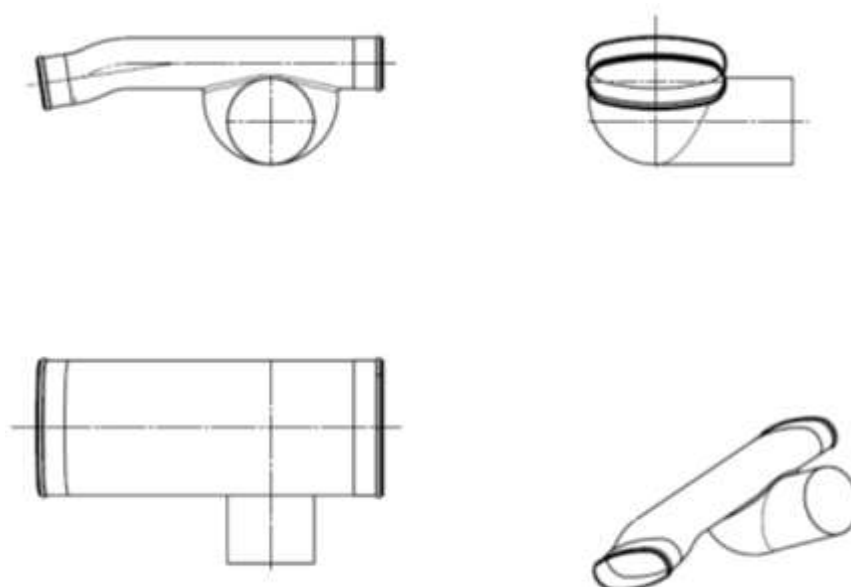


Рис. 3 – Эскиз элемента СКВ



Рис. 4 – Частично собранная формообразующая полимерная оснастка

В дальнейшем была проведена работа по выбору оптимальной формы, геометрических размеров и разнесению стыков в слоях препрега для выкладки заготовки короба СКВ. В процессе проведения исследований для обеспечения съема короба с оснастки на ее поверхность были нанесены антиадгезионные слои [20]. На рабочую поверхность оснастки были выложены слои препрега согласно разработанной схеме. По завершении процесса выкладки препрега на частях оснастки они были собраны в единую заготовку, внутрь которой была помещена камера, части оснастки соединялись между собой болтами, через отверстия в фланцах. Формование детали производилось в термопечи с созданием избыточного давления за счет раздува камеры, заложенной внутрь заготовки. В результате формования, демонтажа частей оснастки, извлечения камеры и механических операций, был получен образец, показанный на рисунке 5.



Рис. 5 – Экспериментальный образец элемента СКВ (тройник)

Изготовленный экспериментальный образец продемонстрировал правильность выбранных параметров, полученных при отработке процесса его изготовления.

Одним из основным критериев, предъявляемым к элементам СКВ является их герметичность. В этой связи было проведено исследование герметичности стеклопластика и полученного экспериментального образца элемента СКВ, согласно ОСТ 1 00128-74 (герметичность изделий). В связи с тем, что из-за пористости ПКМ, изготовленные образцы стеклопластика не обеспечивали требуемый уровень герметичность, то был выбран дополнительный герметизирующий слой, который отличался высокими (защитными, электроизоляционными, антиадгезионными) свойствами, и показал хорошую устойчивость к действию агрессивных сред (кислот, щелочей, растворителей, влаги). В результате нанесения данного слоя на поверхность образцов разработанного стеклопластика и повторного их испытания было установлено, что они соответствуют требованиям герметичности.

По совокупности проведенной работы был получен конкурентоспособный отечественный материал, не уступающий по своим характеристикам зарубежным аналогам, для изготовления жестких элементов СКВ, и технология его переработки в изделия, готовые к внедрению их в серийное производство.

Однако, как отмечалось выше наряду с жесткими элементами в СКВ применяются и гибкие рукава. Если в настоящее время в зарубежной авиационной технике стало уже нормой изготовление гибких элементов СКВ самолетов из ПКМ, то в нашей стране их внедрение затормозилось. На сегодняшний день в ФГУП «ВИАМ» ведется разработка материала для изготовления гибких трубопроводов, и уже определены его состав и основные характеристики. В таблице 7 показаны сравнительные характеристики материалов для изготовления гибких элементов СКВ отечественного и зарубежного производства.

Сравнительные характеристики материалов

Свойства	Разрабатываемый отечественный аналог	Отечественный аналог по ТИ-0116-94	Зарубежный аналог тип SPS Senior Aerospace BWT
Тип покрытия	Фторкаучук	Полихлоропреновый каучук	Силикон
Масса стеклонеполнителя, г/м ²	95±5	105±5	50±5
Масса тканепленочного материала г/м ²	Не более 300	425	200
Прочность при растяжении, Н			
По основе	500	736	250
По утку	400	687	250

Из таблицы 7 можно увидеть, что существующий отечественный материал для изготовления гибких рукавов СКВ проигрывает по массе, что является критичным показателем для снижения массы СКВ в целом. Данный показатель импортного образца минимальный. Однако из-за отсутствия производства отечественных стеклотканей с поверхностной плотностью не более 55 г/м², масса разрабатываемого тканепленочного материала рассчитывалась исходя из изготавливаемых в России тканей с наименьшей поверхностной плотностью. Основываясь на имеющихся разработках, было установлено, что для получения герметичного тканепленочного материала методом шпредиинга, привес двустороннего полимерного покрытия должен составлять не менее 100–150% от массы текстильной основы. В этой связи его поверхностная плотность находится в диапазоне 290–298 г/м².

Также была проанализирована конструкция зарубежных гибких трубопроводов. На рисунке 6 показана типовая конструкция гибкого элемента СКВ. Анализ показал, что трубопроводы состоят из герметичной оболочки в виде рукава, и поддерживающего каркаса. При этом оболочка представляет собой ткань, пропитанную полимерным составом, а каркас выполнен из металла или полимера. В настоящее время в исследования в

этом направлении продолжают.



Рис. 6 – Типовая конструкция гибкого элемента СКВ

Разработанные материалы для изготовления стеклопластиковых коробов (а также разрабатываемый на данный момент материал для гибких рукавов) воздуховодов низкого давления СКВ, должны обеспечить снижение ее массы не менее чем на 20%, в сравнении с металлами.

Заключения

В результате проделанной работы были получены следующие результаты:

- новый отечественный материал для изготовления жестких элементов СКВ не уступающий импортным аналогам и отвечающий предъявляемым к нему требованиям: по горючести (отвечает требованиям АП-25), по плотности, механическим свойствам и режиму формованию (не уступает зарубежным аналогам);
- готовая к применению в серийном производстве технология изготовления стеклопластиковых коробов СКВ;
- выбран дополнительный герметизирующий слой, который по проведенным исследованиям герметичности согласно ОСТ 1 00128-74 обеспечил необходимый уровень свойств разработанному стеклопластику;
- определены основные направления для разработки материала и конструкции при изготовлении гибких элементов СКВ.

Литература

1. Каблов Е.Н. ВИАМ. Направление главного удара // Наука и жизнь. 2012. №6. С. 14–18.
2. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
3. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
4. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ // Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
5. Каблов Е.Н., Гращенко Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э., Ильин В.В., Вальтер Р.С. Стенд для испытания на климатической станции ГЦКИ крупногабаритных конструкций из ПКМ /В сб. докл. IX Международ. науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2012». 2012. С. 122-123.
6. Прогнозы развития мирового рынка гражданской авиации. // Техническая информация, ЦАГИ. 2003. Вып. 3-4. С. 6.
7. Global Market Forecast: электронный ресурс, URL: <http://www.Airbus.com> (дата обращения: 26.04.2017).
8. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2014. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.04.2017). DOI 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
9. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В., Абрамов П.А., Сатдинов Р.А. Опыт применения технологического контроля полуфабрикатов ПКМ // Известия Самарского научного центра РАН, Т.16. №6 (2). 2014. С. 393–398.

10. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

11. Компания Gurit: URL: <http://www.mobile.gurit.com> (дата обращения: 15.03.2017).

12. Компания Hexcel: URL: <http://www.hexcel.com> (дата обращения: 20.04.2017).

13. Застрогина О.Б., Швец Н.И., Постнов В.И., Серкова Е.А. Фенолформальдегидные связующие нового поколения для материалов интерьера // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 265–272.

14. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Застрогина О.Б., Сатдинов Р.А. Технология ускоренного формования трехслойных сотовых панелей самолета // Известия Самарского научного центра РАН, 2013. №4-4. С. 799–805.

15. Вешкин Е.А., Абрамов П.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Влияние технологии подготовки препрега на свойства ПКМ // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №9. С. 8–14.

16. Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Воздуховоды низкого давления из ПКМ в летательных аппаратах // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2016. №8. Ст.8. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 22.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-8-8.

17. Сатдинов Р. А., Истягин С. Е., Вешкин Е. А. Анализ температурно-временных параметров режимов отверждения ПКМ с заданными характеристиками // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2017. №3. Ст.09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-9-9.

18. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2016.

№ 2 ст. 07 Ст. 53-63 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.03.17). DOI 10.1857/2307-6046-2016-0-2-7-7.

19. Постнов В.И., Стрельников С.В., Макрушин К.В., Вешкин Е.А., Семипрег для полимерных оснасток/Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития//Тезисы докладов V Международной научно-практической конференции. 2016. С. 186–188.

20. Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Роль антиадгезионных покрытий в технологическом процессе формования ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2016. №4. Ст.10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-10.

УДК 678.7

Композиционные материалы на основе бутадиен-нитрильного каучука и 2D-углеродных структур

Неверовская А.Ю.¹, к.х.н.; Возняковский А.А.²;

Отвалко Ж.А.¹; Возняковский А.П.¹, д.х.н.

anna-neverovskaya@yandex.ru; alexey_inform@mail.ru; zhaanna.otvalko@ya.ru;
voznar@mail.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С.В. Лебедева» (ФГУП «НИИСК»)*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*

Аннотация:

При наполнении бутадиен-нитрильных каучуков графеном, синтезированным по методу самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, получены композиционные материалы. Оказалось, что введение графена в бутадиен-нитрильные каучуки увеличивает прочность на разрыв композиционных материалов при комнатной температуре на 65%, а при повышенных температурах ее величина стала соизмерима с прочностью ненаполненного каучука.

Ключевые слова:

графен, бутадиен-нитрильный каучук, метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

Жидкие углеводородные каучуки – низкомолекулярные линейные полимеры на основе диенов в настоящее время находят широкое применение для производства клеевых составов, герметиков, РТИ, лакокрасочных и композиционных материалов, в частности, бутадиен-нитрильные каучуки. Особое место среди жидких бутадиен-нитрильных каучуков занимают олигомеры с концевыми хлорсодержащими группами (БКН-Хл). Введение в состав бутадиен-нитрильных каучуков атомов хлора приводит к повышению термостойкости, стойкости по отношению к кислотам, щелочам и солям, что делает их ценным материалом для изготовления лаков, красок, антикоррозионных покрытий, огнеупорных пропиток и клеев [1–2]. Также БКН-Хл используются в качестве основы клеевых и герметизирующих композиций в авиационной промышленности. Обладая хорошей адгезией, БКН-Хл обладают существенным недостатком – имеют недостаточную термостойкость, что ограничивает возможности их практического использования.

В настоящее время одним из способов улучшения прочностных и термических параметров каучуков является создание на их основе композиционных материалов. При этом, наиболее перспективным направлением достижения значительного эффекта усиления считается использование в качестве наполнителя наноуглеродов. [3, 4]. В последнее особое внимание исследователей при формировании композиционных полимерных материалов привлекают 2D углеродные структуры – графеновые структуры [5].

Однако, трудоемкий способ получения [6] и, соответственно, дороговизна ограничивают применение графена в качестве наполнителя полимерной матрицы. Недавно нами был предложен доступный метод получения 2D углеродных структур в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (процесс СВС), свободный от этих недостатков [7].

СВС-синтез представляет собой процесс перемещения волны сильной экзотермической реакции по смеси реагентов (окислителя и восстановителя), в котором тепловыделение локализовано в слое и передается от слоя к слою путем теплопередачи. Преимуществом СВС-процесса является простота аппаратного оформления метода, высокие скорости синтеза, возможность проведения синтеза без постоянного подвода энергии от внешних источников питания, возможность проведения синтеза в любой атмосфере или в вакууме, отсутствие принципиальных масштабных ограничений [8].

Целью данной работы было создание композиционных материалов на основе БНК и графена с улучшенными прочностными характеристиками при повышенных температурах.

Экспериментальная часть

СВС-графен. СВС-графен получали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС-методом) из крахмала [9].

Электронная микроскопия. Электронные микрофотографии НТ получены с помощью растрового электронного микроскопа Supra55VP (Carl Zeiss, Zeiss AG).

Метод рентгеновской дифрактометрии. Съемка проводилась на дифрактометре Shimadzu XRD 7000, в диапазоне углов 2θ (10 – 100) градусов, с шагом 0.02 градуса и экспозицией в точке 1 секунда.

Рамановская спектроскопия. Использовали спектрометр InVia (Renishaw, GrBr).

Определение удельной поверхности порошка СВС-графена. Использовали анализатор ASAP 2020 (Micromeritics, США). Адсорбтив – азот. Температура измерений 77 К.

Определение истинной плотности порошка СВС-графена. Истинную плотность частиц порошка СВС-графена определяли методом гелиевой пикнометрии (Прибор: Ultracycnometer 1000, фирмы Quantachrome instruments, USA).

Бутадиен-нитрильный каучук. Использовали низкомолекулярный хлорсодержащий каучук марки СКН-11ХР, представляющий собой сополимер бутадиена и нитрила акриловой кислоты с концевыми хлорбензильными группами [10].

Получение композиционного материала с графеном. В предварительно нагретый бутадиен-нитрильный каучук при перемешивании постепенно добавляли графен. Полученную композицию выдерживали в поле ультразвука также в нагретом состоянии в течение 1 часа, отверждали метилированным гексаметилендиамином и отдавали на испытания.

Обработка ультразвуком. Для обработки ультразвуком полученной композиции использовали ультразвуковую установку в виде ванны.

Динамическая вязкость бутадиен-нитрильного каучука. Динамическую вязкость модифицированных образцов каучука определяли согласно [10], п.4.2 с использованием вискозиметра Brookfield или на реовискометре Хепплера.

Измерения прочностных параметров. Образцы для испытаний готовили согласно ГОСТ 270–75. Измерения проводили на разрывной машине LFM-20 (фирма W+b walter+bai ag). Класс точности – 0.5; температурный интервал от -150 до +300°С.

Метод диэлектрической спектроскопии. Измерение проводили на широкополосной диэлектрической установке BDS80 в температурном интервале от минус 145°С до 150°С на частоте 110 Гц. Снимались температурные зависимости компонент комплексной диэлектрической проницаемости – ϵ' , ϵ'' и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$.

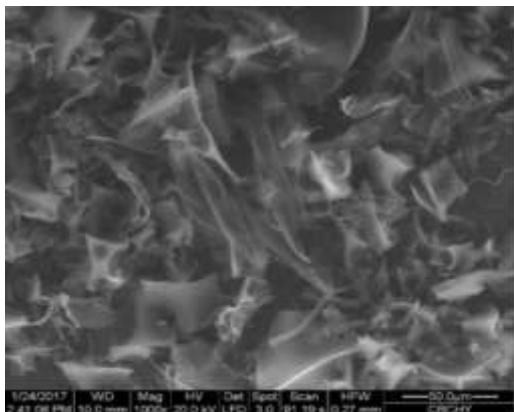
Трибологические испытания. В качестве контртела использовали сталь, в качестве масла – индустриальное масло И-40А, скорость скольжения составляла 1 м/с.

Результаты и их обсуждение

Полученный по СВС-методу графен (СВС-графен) был исследован на электронном микроскопе (рис.1). Из рис. 1 видно, что полученный материал

представляет собой объемно-плоскостные «чешуйчатые» частицы. Такие частицы как раз характерны для частиц графена.

а)



б)

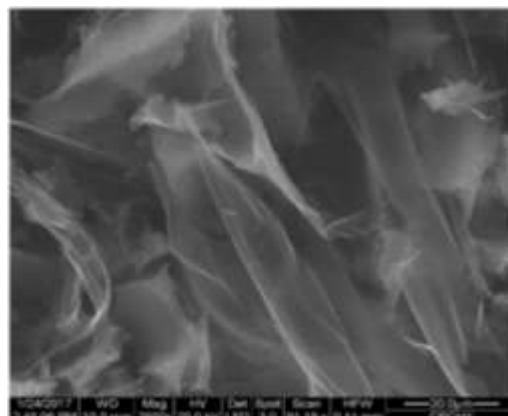


Рис. 1 – Данные электронного микроскопа графена, полученного СВС-методом из крахмала: а – с разрешением 10 мкм; б – с разрешением 1 мкм

Для уточнения структуры СВС-графена был применен метод рентгеновской дифрактометрии (рис. 2). Как можно заключить из данных рисунка 2 структура частиц СВС-графена рентгеноаморфна и, следовательно, графитовые частицы отсутствуют.

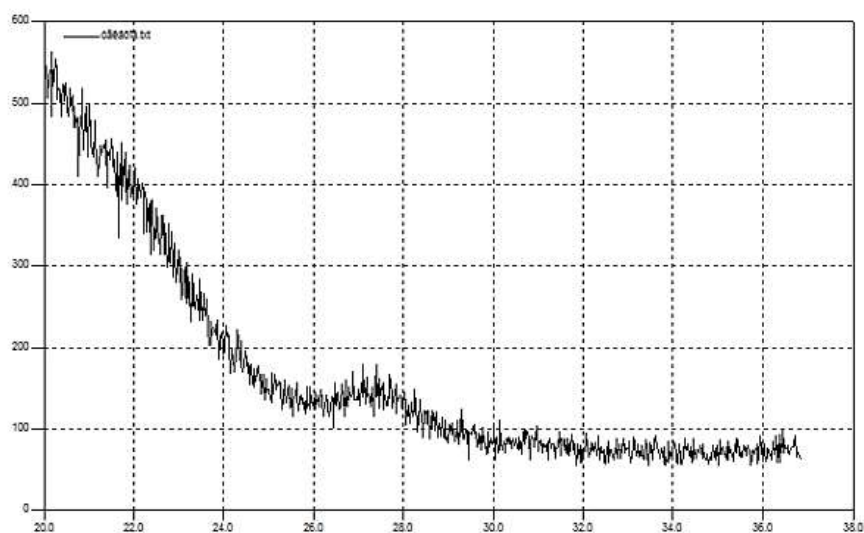


Рис. 2 – Рентгеновская дифрактометрия порошка СВС-графена

Считается, что наиболее достоверную информацию о структуре углеродных структур можно получить из данных Рамановской

спектроскопии [11]. Данные Рамановской спектроскопии, полученные нами для СВС-графена приведены на рисунке 3. Общий вид кривой как по виду, так по максимумам пиков соответствующим полосам (G пик - $1500\text{--}1630\text{ cm}^{-1}$; D пик - 1355 cm^{-1}), отвечает 2D-графеновым структурам. Косвенные выводы о количестве графеновых слоев в СВС-графене можно сделать из сопоставления вида так называемой 2D (2700 cm^{-1}) полосы с литературными данными (представлены на врезке рис. 3). Сопоставление этих данных позволяет заключить, что в СВС-графене среднее число графеновых слоев составляет 2-3.

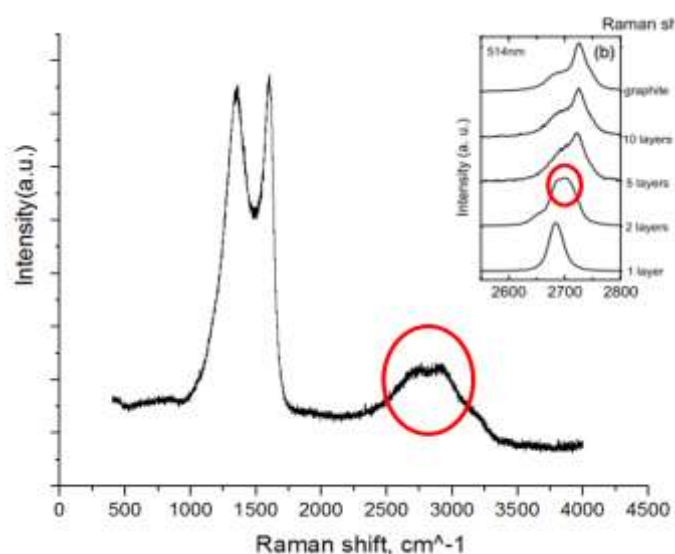
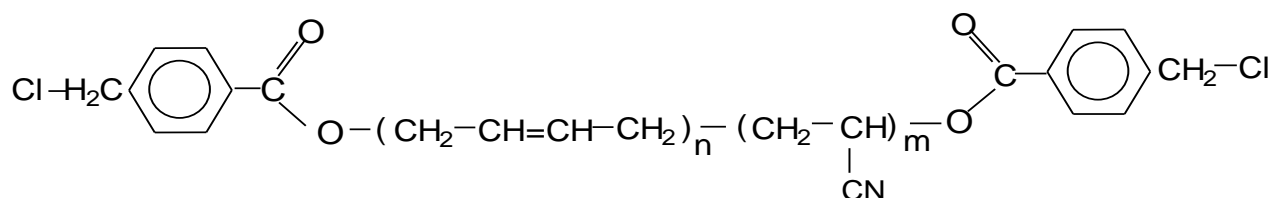


Рис. 3 – Рамановский спектр порошка СВС-графена

Определенные нами значения удельной поверхности частиц порошка СВС-графена ($S=670\text{ м}^2/\text{г}$) и его плотности ($\rho = 1.910\text{ г}/\text{см}^3$) также хорошо совпадают с литературными данными для графена [12].

В качестве полимерной основы для композиционного материала выбрали бутадиен-нитрильный каучук с концевыми хлорсодержащими группами. Используемый в данной работе низкомолекулярный хлорсодержащий каучук получали радикальной сополимеризацией бутадиена-1,4 и нитрила акриловой кислоты в растворе толуола с использованием в качестве инициатора пероксида п-хлорметилбензоила. Он представляет собой статистический сополимер общей структуры:



где $n = 50 \div 120$, а $m = 7 \div 20$.

Отвержденные пленки этого полимера достигают необходимой, с практической точки зрения, прочности без использования наполнителей. Это делает его удобной моделью для изучения влияния парциального вклада СВС-графена в прочностные свойства отвержденных пленок композиционного материала.

Данные по прочностным свойствам исходного и наполненного СВС-графеном полимера приведены в таблице 1.

Таблица 1

Прочностные характеристики БНК, наполненного СВС-графеном

Показатель	Содержание графена, масс. %					
	0	1	2	4	6	6*
Прочность при разрыве при 20°C, МПа	1.62	1.81	2.10	2.70	2.92	3.19
Относительное удлинение при разрыве при 20°C, %	182	173	163	176	124	134
Прочность при разрыве при 125°C, МПа	0.86	0.89	1.45	1.43	1.70	1.72
Относительное удлинение при разрыве при 125°C, %	59	50	41	54	47	36
Динамическая вязкость при 25°C, Па*с	346	467	580	647	≥1000	≥1000
Сопротивление раздиру, кгс/см	7.4	-	11.0	-	-	-

* полученный композиционный материал был подвергнут термообработке при 200°C в течение 15 минут.

Начиная с концентрации в 2% СВС-графена прочность на разрыв наполненного БНК начинает возрастать, приводя к увеличению на 65%. Также можно заметить, что прочность на разрыв наполненного БНК при повышенной температуре становится сопоставимой с прочностью на разрыв исходного БНК при комнатной температуре. При этом такой рост прочности на разрыв при повышенной температуре (примерно до 2-х раз) обеспечивает

удовлетворительное сохранение эксплуатационных параметров полимера в реальных условиях эксплуатации.

Интересные результаты получены при термообработке наполненного БНК с последующим отверждением. Оказалось, что кратковременное нагревание композиционного материала выше температуры деструкции исходного БНК не только не ухудшает, а наоборот несколько улучшает прочностные характеристики готового изделия.

Еще одной немаловажной характеристикой с точки зрения эксплуатации готовых изделий является сопротивление раздиру. Оно характеризует вклад центров локального напряжения в объеме полимерной матрицы в прочностные свойства композитов. Чем эта величина больше, тем меньше дефектов в структуре композита и, соответственно, тем дольше срок эксплуатации готового изделия. Этот показатель для наполненного каучука выше в 1,5 раза. Следовательно, частицы СВС-графена заполняют элементы свободного объема полимерной матрицы, уменьшая тем самым количество центров локального напряжения в полимере и соответственно снижая вероятность распространения магистральной трещины по объему композиционного материала. Данное предположение подтверждается и независимостью температуры стеклования полимерной матрицы от содержания СВС-графена (табл. 2).

Таблица 2

Температура стеклования композиционных материалов из БНК, наполненного СВС-графеном

Показатель	Содержание графена, масс. %					
	0	1	2	4	6	6*
$T_{ст}, ^\circ\text{C}$	-59.3	-60.0	-59.9	-59.3	-	-

Из отрицательных моментов можно назвать рост динамической вязкости при увеличении концентрации СВС-графена в каучуке (табл. 1), что делает нецелесообразным получение композиционных материалов с содержанием графена выше 6%.

Таким образом, создание композиционных материалов с использованием графена имеет реальную перспективу. Он достаточно легко вводится и распределяется по объему бутадиен-нитрильного полимера и существенно улучшает прочностные и термические характеристики последнего.

Выводы

На основании проведенных исследований можно отметить следующее.

Метод СВС-синтеза может быть простым и доступным способом получения графена в количествах, необходимых для практического применения.

Введение СВС-графена в бутадиен-нитрильный каучук приводит к улучшению прочностных и термических характеристик полученного композиционного материала.

Композиционный материал на основе БНК с СВС-графеном обладает антифрикционными свойствами.

Следовательно, можно говорить о перспективности применения графена в качестве наполнителя различных каучуков.

Литература

- 1 Петрова А.П. Клеящие материалы. Справочник. / Под ред. Е.Н. Каблова. – М.: ЗАО «Редакция журнала «Каучук и резина», 2002.
- 2 Могилевич М.М., Туров Б.С., Морозов Ю.Л., Уставщиков Б.Ф. Жидкие углеводородные каучуки. - М.: Химия, 1983. - С. 31-40.
- 3 Rao C.N.R., Satishkumar B.C., Govindaraj A., Nath M. / Nanotubes // Chem. Phys. Chem. – 2001. – V. 2. – P. 78–105.
- 4 Allen M.J., Tung V.C., Kaner R.B. / Honeycomb Carbon: A Review of Graphene // Chem. Rev. – 2010. – V. 110. – P. 132–145.
5. Hyunwoo Kim, Ahmed A. Abdala, Christopher W. Macosko Graphene/Polymer Nanocomposites // Macromolecules -2010. V.43. –No.16. –P. 6515–6530.

6 Loh K.P., Bao Q., Ang P.K., Yang J. / The chemistry of graphene // J. Mater. Chem. – 2010. – V. 20. – P. 2277–2289.

7 A. P. Voznyakovskii, Krutov S.M. Facile synthesis of graphene, as the first step toward new generation superhard materials obtaining //19 International Symposium on Wood, Fibre and Pulping Chemistry August 30 - September 01,2017 - Porto Seguro. Bahia – Brazil. –P329-332.

8 Мержанов А.Г. Твёрдопламенное горение. - Черноголовка, 2000. – 239 с.

9 Voznyakovskii A.P., Neverovskaya A.Yu, Otvalko Ja.A., Gorelova E.V., Zabelina A.N. / Facile synthesis of 2d carbone structures as a filler for polymer composites // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2018. - In press.

10 ТУ 403489-84 Каучук низкомолекулярный СКН-11ХР.

11 Ferrari A.C., Basko D.M. / Raman spectroscopy as a versatile tool for studying the properties of graphene // Nature nanotechnology. – 2013. – Т. 8. – №. 4. – С. 235-246.

12 Stankovich S., Dikin D.A., Piner R.D., Kohlhaas K.A., Kleinhammes A., Jia Y., Ruoff R.S. / Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide // Carbon. - 2007. - V. 45. - №7. – P. 1558-1565.

УДК 678.747.2

Молниезащитные покрытия на основе углеродных наполнителей для ПКМ нового поколения

Гуняева А.Г.¹, к.т.н.; Гуляев И.Н.¹, к.т.н.;

Комарова О.А.

anna-gunyaeva@mail.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

Аннотация:

Разработанные во ФГУП «ВИАМ» молниезащитные покрытия (МЗП) марок ВЭП-1, ВЭП-2 и ВКУ-52МЗ представляют собой композиционные материалы на основе равнопрочных углеродных тканей (различных плотностей) и полимерных связующих, модифицированных углеродными наночастицами (УНЧ). Представлены результаты исследований по разработке молниезащитных покрытий, проведены исследования технологических свойств препрегов, физико-механических характеристик МЗП, а также результаты проведенных испытаний на молниестойкость элементарных и конструктивно-подробных образцов ПКМ с разработанными МЗП.

Ключевые слова:

молниезащитное покрытие, углеродная ткань, медная сетка, углепластики, углеродные наномодификаторы.

Введение

Постоянные требования к улучшению летно-технических характеристик ЛА и к повышению экономичности эксплуатации приводят к поиску новых материалов и все более широкому использованию полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1]. В настоящее время конструкционные углепластики – одни из наиболее прогрессивно развивающихся ПКМ, обладающие удельными показателями статической прочности и жесткости, хорошей вибростойкостью, выносливостью при динамических нагрузениях, размеростабильностью в температурном диапазоне от -60 до +300°C [2]. Подтверждением этого является широкое использование углепластиков в авиационной промышленности для изготовления высоконагруженных агрегатов планера, что позволяет снизить массу на 12–40% [3].

В процессе эксплуатации детали и изделия из ПКМ подвергаются воздействию различных факторов внешней среды, в том числе и воздействию разрядов молнии. Низкая проводимость таких материалов не позволяет надежно проводить токи молнии на элементы, находящиеся под обшивкой внутри летательного аппарата [4]. Кроме тепловых воздействия канала молнии, приводящих к прожигам обшивки из металла, при использовании ПКМ появляются и другие поражающие факторы: электрический пробой, ударная волна, электромагнитное излучение. В условиях эксплуатации летательного аппарата разрушения, такие как пробой, расщепление и расслоение армирующего наполнителя, выгорание связующего достигающие единиц и десятков сантиметров, могут значительно возрасти под действием набегающего потока. Углепластики являются полупроводниковыми материалами, однако их значений проводимости не достаточно для обеспечения надежной защиты ЛА от воздействия молниевых разряда и его последствий. Поэтому решения проблемы молниезащиты приобретает все большую актуальность.

Известно, что для современных конструкций и агрегатов ЛА, изготовленных из углепластиков, разработаны различные варианты защиты от молнии. Используются, в частности, молниезащитные системы на основе приклеенной фольги или напыленных металлов (алюминий, медь, никель), медных или алюминиевых шин, сеток, слоев бороалюминия. В настоящее время наибольшее распространение получило МЗП на основе медных сеток или фольг для углепластиков [4] и алюминиевые фольги для стеклопластиков, которые накладываются на поверхность детали при совместном формовании, однако необходимы поиски новых подходов и способов решения этого вопроса.

Экспериментальная часть

В качестве объектов для исследований выбраны терморезистивные растворные полимерные эпоксидные связующие марок ВС-2526к, ЭНФБ-2м и цианэфирное связующее марки ВСЦ-14; углеродные наполнители полотняного и саржевого плетений. Для модификации полимерных матриц были использованы УНЧ: фуллероидный наномодификатор астрален концентрацией диапазоне от 0,01 до 5,0% масс. и терморасширенный графит (ТРГ) концентрацией от 0,01 до 1,0 % масс.

В работе использованы современные методы исследования. Испытания на молниестойкость образцов ПКМ проведены в соответствии с требованиями Авиационных Правил часть 25 (п.25.581 «Защита от молнии») с параметрами электрического разряда, имитирующего импульс тока молнии: силой тока порядка 200 кА и переносимым зарядом до 30 Кл.

Проведенные фрактографические исследования полимерных матриц, модифицированных УНЧ, показали, что УНЧ астралена весьма активно влияют на процесс фазового расслоения связующего. Установлено, что микрофазовая структура наномодифицированной полимерной матрицы изменяется, частицы дисперсной фазы вытягиваются в цепочки, которые затем образуют разветвленные наноструктуры, на отдельных участках переходящие в редко сетчатые образования. Этот факт подтверждает

проявление эффекта наноструктурирования полимерной матрицы [5] с переходом дисперсной структуры в разветвленные и сетчатые нанообразования (рисунок 1).

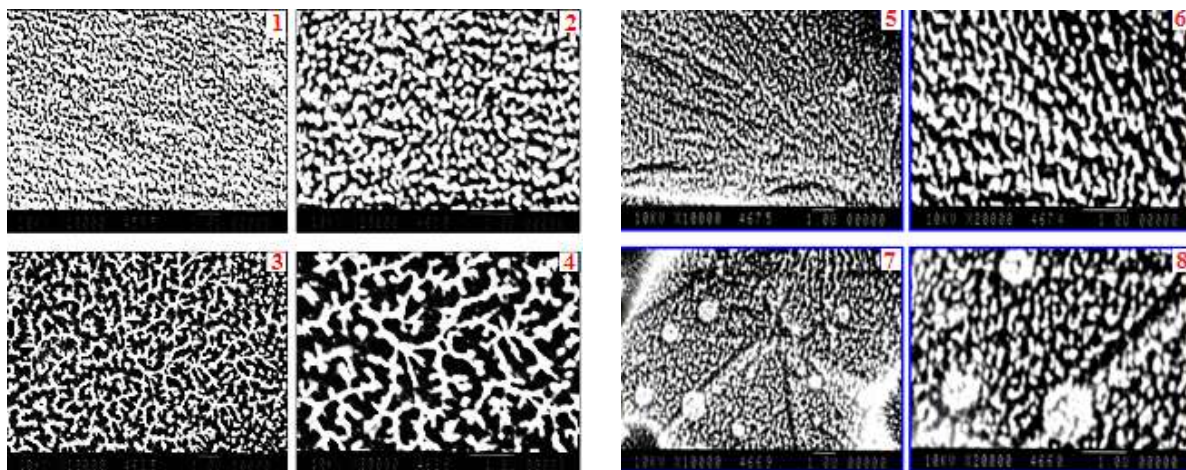


Рис. 1 – Микрофазовая структура: 1, 2 – связующего ЭНФБ-2м без УНЧ, $\times 10000$, $\times 20000$; 3, 4 – связующего ЭНФБ-2м с УНЧ астралена в количестве 3,0 % масс., $\times 10000$, $\times 20000$; 5, 6 – связующего ВСЦ-14 без УНЧ, $\times 10000$, $\times 20000$; 7, 8 – связующего ВСЦ-14 с УНЧ ТРГ в количестве 0,25 % масс., $\times 10000$, $\times 20000$

По результатам анализа ДСК выявлена зависимость теплового эффекта реакции отверждения связующего в препреге от содержания УНЧ в его составе (рисунок 2).

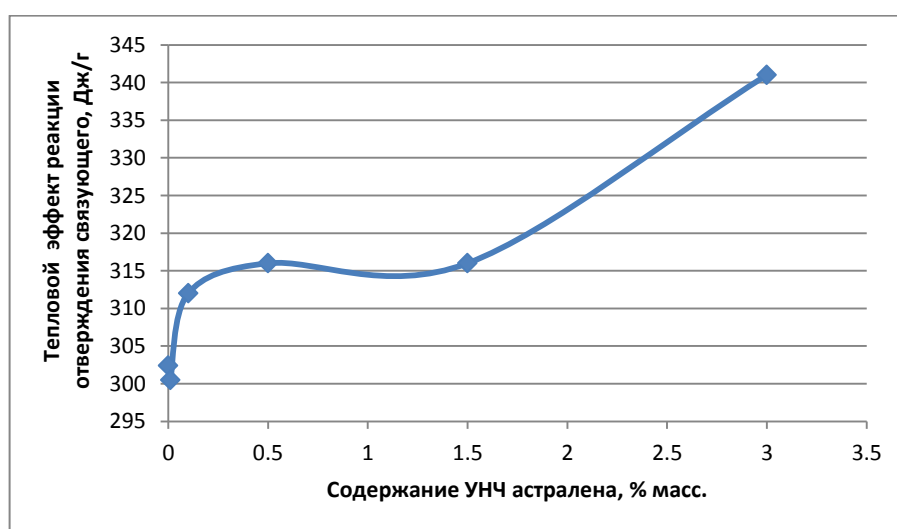


Рис. 2 – Зависимость теплового эффекта реакции отверждения связующего ЭНФБ-2м от содержания УНЧ астраленов в его составе

Введение углеродных наночастиц астралена более 1,0% масс. и терморасширенного графита более 0,5% масс. изменяет реакционную способность препрегов МЗП: повышает тепловой эффект реакции отверждения термореактивных полимерных матриц [6] в препреге и смещает экзотермический пик реакции в сторону более высоких температур, что свидетельствует о повышенной конверсии эпоксидных или цианэфирных групп связующего и сформировании структуры полимерной матрицы с более густой сеткой. Полученные данные свидетельствуют о том, процесс отверждения МЗП на основе термореактивных связующих ВС-2526к, ЭНФБ-2м и ВСЦ-14, модифицированных УНЧ, следует корректировать.

В ходе исследований по разработке составов МЗП экспериментально установлено, что структура углеродного армирующего наполнителя влияет на молниестойкость материала [6] (рисунок 3).



Рис. 3 – Углепластики после воздействия токов молнии с параметрами $I=200$ кА, $Q=20$ Кл:
а) на основе углеродного наполнителя фирмы Porcher арт. 2009 и связующего ЭНФБ-2м;
б) на основе углеродного наполнителя фирмы Porcher арт.4510 и связующего ЭНФБ-2м;
в) на основе углеродного наполнителя фирмы Porcher арт.3692 и связующего ЭНФБ-2м

По результатам испытаний установлено, что саржевые структуры с числом филаментов 3 тысячи при поверхностной плотности 200–280 г/м² и толщине монослоя 0,18–0,22 мм обеспечивают более высокую молниестойкость углекомпозиата.

Исследования по влиянию содержания УНЧ на механические свойства. Механические свойства МЗП на основе углеродной ткани Porcher арт.3692 и

связующего ЭНФБ-2м, модифицированного УНЧ астралена, увеличиваются в диапазоне исследуемых концентраций до 1,5% масс. при температурах испытаний от 20 до 150°C, проходя через максимум при концентрации 0,5% масс. (рисунок 4). Введение в состав МЗП УНЧ в количестве 0,5% масс. позволяет повысить предел прочности при сжатии и предел прочности при изгибе на 15–35 %, предел прочности при межслоевом сдвиге на 10–15 %.

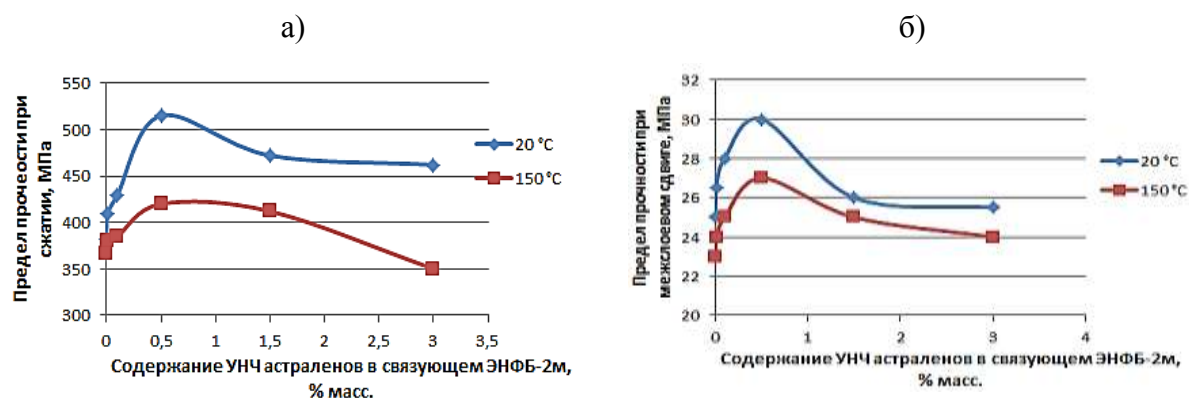


Рис. 4 – Зависимость механических характеристик МЗП на основе углеродной ткани Porcher арт.3692 и связующего ЭНФБ-2м от содержания УНЧ астралена в его составе и температуры испытаний: а) предел прочности при сжатии; б) предел прочности при межслоевом сдвиге

Введение ТРГ концентрацией от 0,05 до 0,5% масс. повышает механические характеристики МЗП. При введении большего количества ТРГ наблюдается падение прочностных характеристик (рисунок 5).

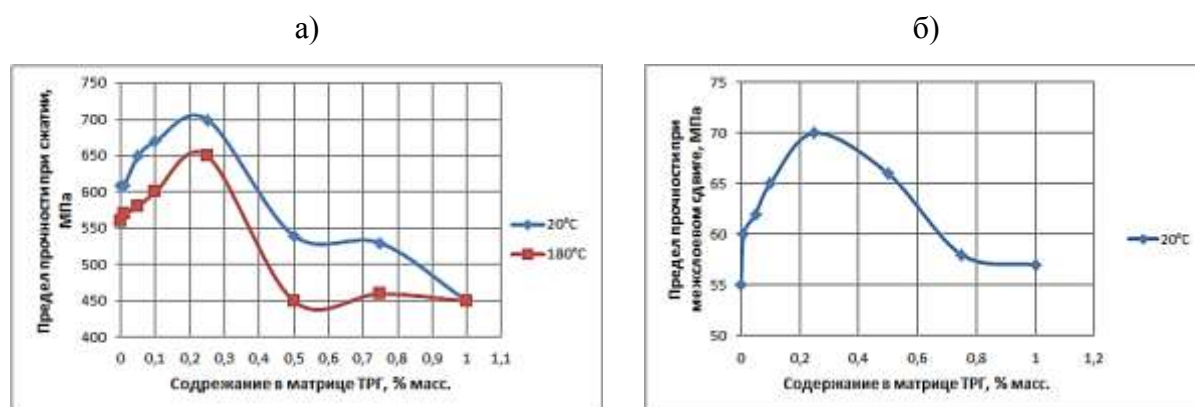


Рис. 5 – Зависимость механических характеристик МЗП на основе препрега УТР300-3-280/ВСЦ-14 от содержания ТРГ в его составе и температуры испытаний: а) предел прочности при сжатии; б) предел прочности при межслоевом сдвиге

По результатам исследований, установлено влияние УНЧ на предел прочности МЗП при сдвиге и сжатии, поскольку эти характеристики в

наибольшей степени зависят от структурного состояния полимерной матрицы и межфазных границ ПКМ [7,8].

Проведены сравнительные испытания на стойкость образцов ПКМ (размером 100×100 мм) к воздействию электрического разряда, имитирующего импульс тока молнии, без покрытий (рисунок 6а) и с различными составами молниезащитных покрытий (МЗП) на основе [9, 10]:

- 2-х слоев углеродных равнопрочных тканей саржевого плетения различных плотностей и термореактивных полимерных связующих марок ВС-25 26 к и ВСЦ-14 без введенных УНЧ (рисунок 6б);
- алюминиевой или медной сетки/фольги (рисунок 6в);
- 2-х слоев МЗП (рисунок 6г).

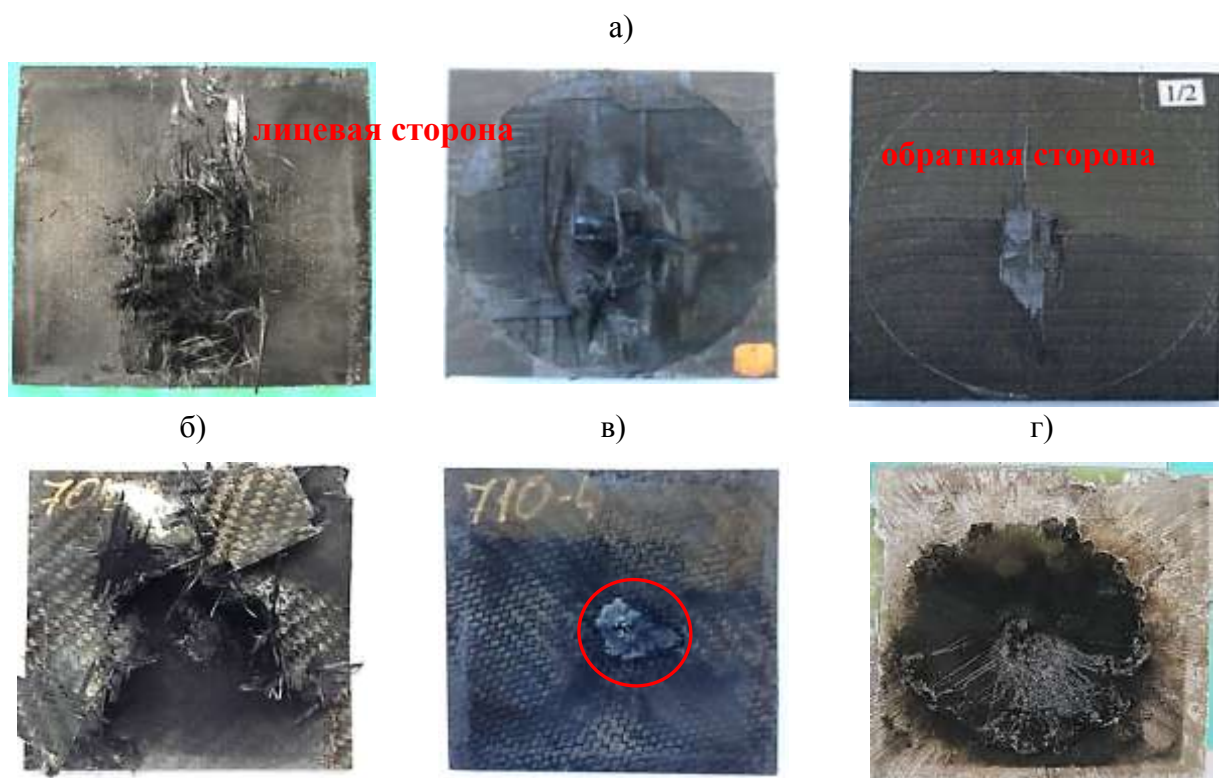


Рис. 6. Образцы ПКМ после воздействия тока в молнии с параметрами $I=200$ кА, $Q=20$ Кл:
а) без МЗП; б) с МЗП на основе 2-х слоев УТР300-3-280/ ВСЦ-14 (без УНЧ); в) с МЗП на основе 2-х слоев УТР300-3-280/ВСЦ-14 (ТРГ 0,25% масс.); г) с МЗП – 1 слой алюминиевой фольги толщиной 0,09 мм

С учетом результатов проведенных исследований разработано 4 МЗП на основе равнопрочных углеродных наполнителей и полимерных связующих, модифицированных УНЧ астралена, которым присвоены марки ВЭП-1, ВЭП-2, ВКУ-53МЗ/230 и ВКУ-53МЗ/480 [11,12]. Покрытия на основе 2-х слоев МЗП

предназначены для изготовления обшивок деталей и агрегатов из ПКМ, выходящих на внешний контур планера самолета, обладающих повышенной молниестойкостью к поражению смещающимися разрядами молнии с силой тока 200 кА, переносимым зарядом 20 Кл [13].

Проведены испытания на молниестойкость фрагментов прототипа трехстрингерной панели крыла (размером 400x400 мм) из углепластика ВКУ-47И с МЗП на основе 2-х слоев МЗП марки ВЭП-1 (рисунок 7).

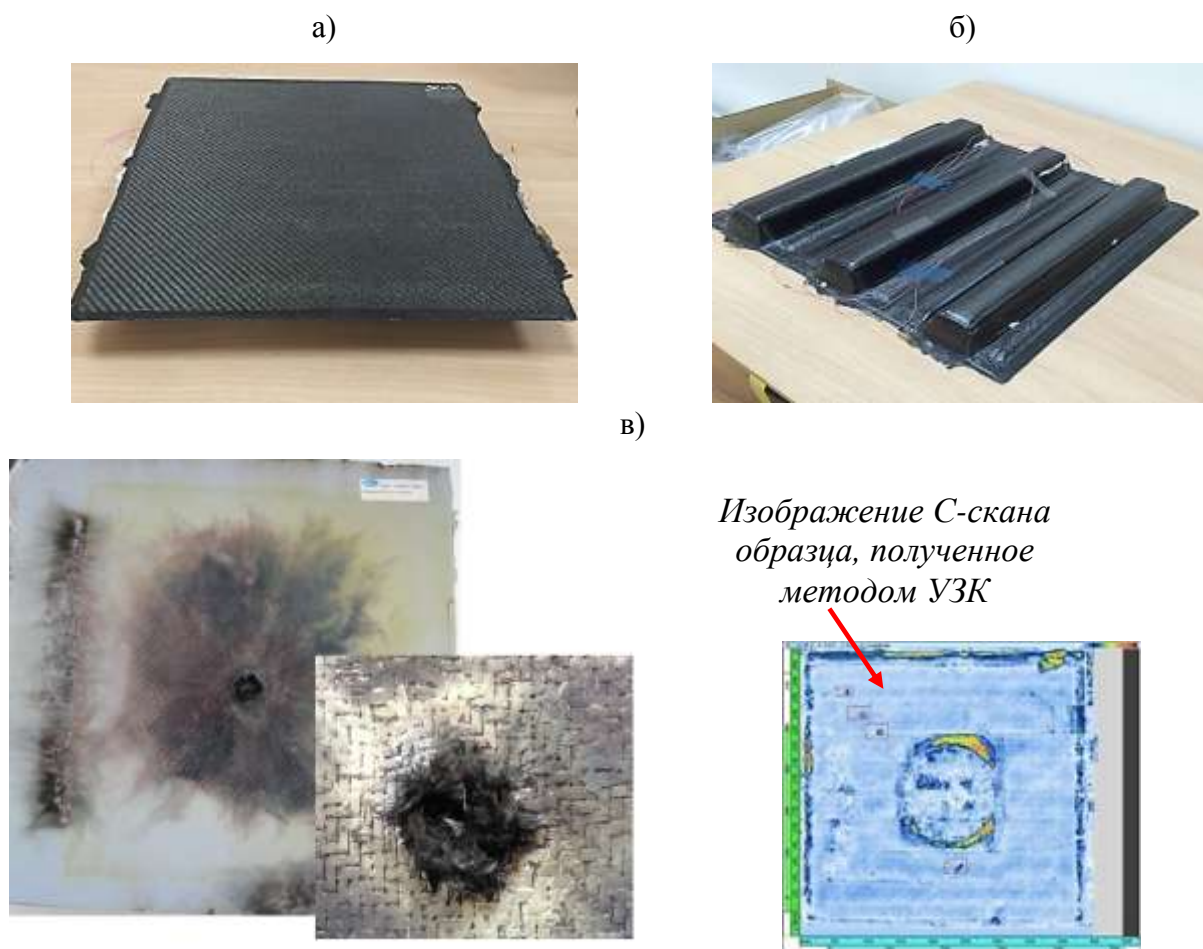


Рис. 7 – Фрагмент прототипа трехстрингерной панели крыла из углепластика ВКУ-47И с МЗП на основе 2-х слоев МЗП марки ВЭП-1: а, б) до испытаний на молниестойкость; в) после испытаний на молниестойкость

Установлено, что фрагменты прототипа конструкции панели получили частичное нарушение целостности волокон углеродного наполнителя и эрозию связующего верхних слоев диаметром не более 45 мм; полностью отсутствуют сквозной пробой, трещины, отрыв слоев и повреждения обратной стороны, зафиксировано выгорание ЛКП в области стекания

разряда молнии (рисунок 7в), что не привело к прогару, деструкции связующего, распушению углеродных волокон МЗП вне зоны эпицентра воздействия электрического разряда, имитирующего импульс тока молнии.

Проведенные исследования и полученные результаты также показали, что для реализации функции молниезащиты для конструкций из ПКМ достаточно покрытия, состоящего из 2-х слоев МЗП [11,12].

Выводы и рекомендации

1. Проведен комплекс исследований, направленных на повышение молниестойкости ПКМ, используемых для изготовления конструкций внешнего контура летательного аппарата, и показано, что для достижения поставленных задач целесообразна модификация терморезистивных полимерных связующих, использованных в их составе, УНЧ.

2. Экспериментально показана способность УНЧ влиять на физико-химические, механические и эксплуатационные свойства МЗП.

3. Испытания образцов обшивки из ПКМ с МЗП показали, что при воздействии электрического разряда, имитирующего импульс тока молнии с параметрами силой тока 200 кА и переносимым зарядом 20 Кл, образцы получают незначительные повреждения в виде распушения углеродного наполнителя, деструкции связующего и обессмоливания верхних молниезащитных слоев диаметром не более 50 мм, в сравнении с ПКМ без покрытия, в котором зафиксированы дефекты в виде расслоений, трещин и сквозных пробоев образца.

4. Экспериментально установлено, что молниестойкость углекомполитов зависит от характера плетения углеродного армирующего наполнителя, толщины ткани, соотношение диаметра жгута и плотности плетения.

5. Разработаны МЗП конструкционного назначения марок ВЭП-1, ВЭП-2, ВКУ-52МЗ/230, ВКУ-52МЗ/480, предназначены для защиты конструкций внешнего контура летательных аппаратов из ПКМ от

электрических разрядов молнии с силой тока 200 кА, переносимым зарядом 20 Кл

Литература

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.

2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.

3. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Гуняева А.Г. Молниестойкость современных полимерных композитов//Авиационные материалы и технологии. 2012. №2 С. 36–43.

4. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Начинкина Г.В., Гуняева А.Г., Куприенко В.М. Молниезащитные покрытия для конструкционных углепластиков, содержащие наночастицы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 3. С. 24–35.

5. Е.Н. Каблов, С.В. Кондрашов, Г.Ю. Юрков Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов, «Российские нанотехнологии». 2013, том 8, № 3-4. С. 28–46.

6. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Алексахин В.М. Модифицирование конструкционных углепластиков углеродными наночастицами //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 5–11.

7. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные полимерные угленанокомпозиты – новое направление материаловедения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011 г. № 12 С. 2–9.

8. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами /В сб.: Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-техн. сб.

(приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 277-286.

9. Бухаров С.В., Гуняева А.Г., Раскутин А.Е. Исследования зоны поражения молниезащитного покрытия из углепластиков высоковольтными разрядами, имитирующими токи молнии // Научно-технический сборник «Научные труды» (Вестник «МАТИ»). 2014. №22 (94).

10. Гуляев И.Н., Гуняева А.Г., Раскутин А.Е., Федотов М.Ю, Сорокин К.В. Молниезащита и встроенный контроль для конструкций из ПКМ // Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).

11. Каблов Е.Н., Гуняева А.Г., Комарова О.А., Раскутин А.Е. Многослойное электропроводящее покрытие на основе термостойкого связующего // Патент РФ № 2565184 от 15.09.2015 г.

12. Каблов Е.Н., Гуняева А.Г., Комарова О.А., Черфас Л.В., Федотов М.Ю. Панель из полимерного композиционного материала с молниезащитным покрытием // Патент РФ № 2588552 от 27.06.2016 г.

13. Гуняева А.Г. Угленанокомпозиты, стойкие к воздействию электрического разряда, имитирующего импульс тока молнии // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2016 г.

УДК 004.94

Анализ и синтез структуры композиционного материала для изделий, изготавливаемых методом намотки

Исаева В.Г.¹; Князев Д.Н.¹, к.т.н.

viksa_chiksa@mail.ru

¹*Южно-Российский Государственный Политехнический Университет (НПИ) имени М.И. Платова*

Аннотация:

Метод непрерывной жгутовой «мокрой» автоматизированной намотки широко применяется при изготовлении оболочечных силовых конструкций. Качество композитных изделий и их эксплуатационные характеристики напрямую зависят от степени оптимизации технологического процесса намотки и являются предметом постоянных исследований. Значения технологических параметров должны определяться заранее и находиться под непрерывным контролем и регулированием в процессе намотки. Отдельное внимание следует уделить обеспечению высокой повторяемости свойств готовых композитных изделий. Целью данной работы является определение и обеспечение контроля возмущающих факторов технологического процесса намотки для повышения качества композитных изделий.

Ключевые слова:

намотка, структура композиционного материала, программирование намоточных станков.

Метод непрерывной жгутовой «мокрой» автоматизированной намотки широко применяется при изготовлении оболочечных силовых конструкций. Качество композитных изделий и их эксплуатационные характеристики напрямую зависят от значений технологических параметров процесса намотки.

Для обеспечения высокой повторяемости свойств готовых композитных изделий значения технологических параметров должны быть определены заранее и находиться под непрерывным контролем и регулированием в процессе намотки. Если какой-либо технологический параметр не контролируется, то его значение в процессе намотки может быть случайным, что впоследствии снизит повторяемость свойств композитного изделия. Поэтому для повышения качества изделий, получаемых методом намотки целесообразно определить и обеспечить контроль всех возмущающих факторов технологического процесса намотки.

Исследования, проводимые в ЮРГПУ (НПИ), показали, что одним из важных возмущающих факторов процесса намотки, влияющих на структуру армирующего материала в композитной конструкции, является такой технологический параметр, как ширина ленты, укладываемой на поверхность оправки. Особенно заметно влияние ширины ленты на структуру материала крупногабаритных изделий, при изготовлении которых лента формируется из большого числа жгутов и имеет ширину от 50 мм и выше. В настоящее время не разработаны механизмы для управления шириной ленты. Нет ни готового программно-математического обеспечения для управления этим технологическим параметром на применяемых на предприятиях отечественных намоточных станках, нет и четких рекомендаций по управлению этим параметром при разработке нового намоточного оборудования.

Известно, что эксплуатационные характеристики композитного изделия (прочность, жесткость, масса) зависят от соотношения матрицы и

связующего в объеме пластика. Это соотношение зависит от плотности укладки армирующих волокон, образующих матрицу (рис. 1).

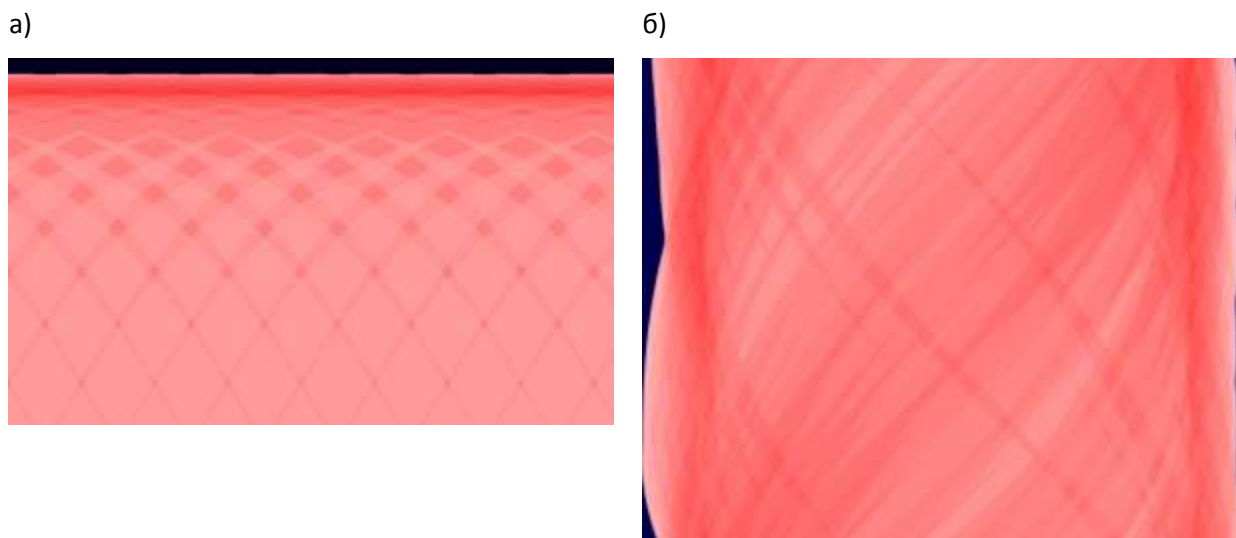


Рис. 1 – Структура укладки материала: а) на участке доньшка баллона; б) на участке трубчатой оболочки с некруговым сечением

Поскольку композитное изделие и материал формируются одновременно, на плотность укладки волокон и, следовательно, на соотношение матрицы и связующего существенное влияние оказывает технологическое оборудование, используемое для намотки. В частности, плотность материала в изделии зависит от возможностей оборудования по управлению шириной ленты армирующего материала.

Планируемая к разработке модель структуры композиционного материала в изделии позволит оценить объем пластика с учетом плотности укладываемого материала. Армирующий материал в такой модели будет представлен в виде ленты с заданной шириной и толщиной, положение которой определено средней и крайними нитями. Пустоты, образованные между различными лентами, а также между лентой и оправкой, условно будем считать заполненными связующим.

Изменение ширины армирующей ленты в процессе намотки позволит управлять соотношением матрицы и связующего (уменьшить объем пустот), что в свою очередь приведет к уменьшению общего объема пластика.

Уменьшение объема пластика будет означать, что была повышена плотность укладки материала в изделии.

Данная модель структуры композиционного материала так же даст возможность учитывать изменение геометрии оправки после укладки слоя пластика при формировании последующего слоя. Такая возможность позволит еще на этапе проектирования с более высокой точностью оценить форму и размеры готового изделия и оптимизировать структуру многослойного материала, исключив неконтролируемое смещение материала для каждого последующего слоя.

Прежде чем управлять структурой материала изделия необходимо выявить все факторы, влияющие на нее, а также оценить степень их влияния. По предварительной оценке к таким факторам можно отнести: расстояние от точки касания материала и оправки до точки схода материала с выходного звена намоточного оборудования (длина свободного участка нити), угол намотки, а также положение и ориентацию выходного ролика и гребенки, размещаемых на раскладывающей головке намоточного станка.

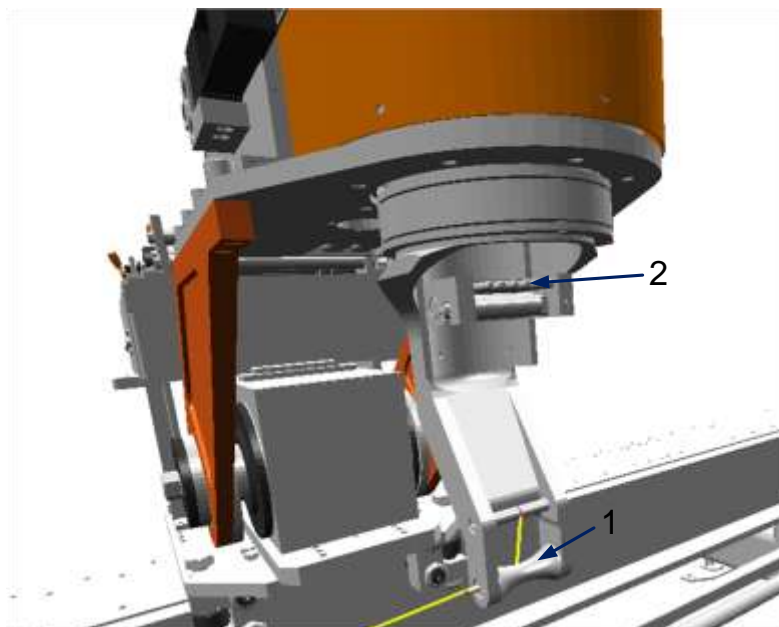
Поэтому требуется ряд численных экспериментов, в ходе которых будут получены зависимости, однозначно определяющие соответствие ширины армирующего материала на поверхности оправки и всех возмущающих факторов. Численные эксперименты будут проводиться с использованием геометрической модели процесса автоматизированной намотки, разработанной в ЮРГПУ (НПИ).

Механизм управления параметрами процесса намотки будет также зависеть от кинематической схемы намоточного оборудования. Необходимо выполнить анализ различных кинематических схем намоточных станков, чтобы определить ее влияние на способ управления шириной материала и найти наиболее оптимальные конструкции и их геометрические параметры, обеспечивающие возможность получения максимального диапазона ширин ленты.

Далее, для выбранных оптимальных кинематических схем намоточных станков осуществим выбор законов управления рабочими органами для получения необходимой ширины армирующей ленты на поверхности оправки.

Так, например, был проведен ряд экспериментов по моделированию процесса намотки на 5-координатном намоточном станке с нитераскладывающим механизмом следующего вида (рис. 2), для оценки степени влияния рассматриваемых факторов на ширину армирующей ленты на оправке.

Гребенка и выходной ролик намоточного станка на рисунке 2 являются независимыми программно-управляемыми координатами.



1 – выходной ролик, 2 – гребенка)

Рис. 2 – Нитераскладывающий механизм намоточного станка

Входные данные для экспериментов были определены следующим образом:

1) в качестве оправки использовался цилиндр с радиусом $r = 150$ мм и длиной $l = 7000$ мм;

2) длину свободного участка нити обозначим λ . Минимальное значение λ должно исключать столкновения оправки и рабочих органов

станка. Максимальное значение λ ограничивается степенью подвижности головы раскладчика. Для эксперимента выбирались значения $\lambda = \lambda_{\min} = 100$ мм, $\lambda = 220$ мм и $\lambda = \lambda_{\max} = 350$ мм;

3) ширина ленты на гребенке d будет принимать следующие значения: 10, 20 и 40 мм;

4) угол намотки будет варьироваться от 20° до 85° с шагом в 5° .

На поверхности цилиндра был построен спиральный слой со следующими параметрами:

– коэффициент трения (тангенс угла геодезического отклонения $tg \theta$) - 0,15;

– число точек на виток – 601;

– в таблице углов на концах оправки задан угол разворота (90°), а на участке $[2000, 5000] \in l$ значение угла намотки будет постоянным; на этом же участке будем оценивать значение ширины ленты на оправке.

Траектория движения точки схода нити будет равнокасательной, т.е. $\lambda = const$.

В ходе моделирования были получены зависимости ширины армирующего материала от угла намотки при различной длине свободного участка нити и синхронном движении гребенки и выходного ролика (табл. 1). В таблице 1 коэффициент представляет собой отношение значения ширины материала на оправке к значению ширины материала на гребенке выходного звена.

Таблица 1

Коэффициенты изменения значения ширины

Угол намотки, $^\circ$	При $\lambda = 100$	При $\lambda = 220$	При $\lambda = 350$
20	0,8926	0,696	0,531
25	0,8673	0,62475	0,413
30	0,8437	0,5697	0,351
35	0,826	0,529	0,3044
40	0,815	0,5	0,2684
45	0,812	0,4833	0,2413
50	0,8167	0,4783	0,2211
55	0,8297	0,4861	0,207

Угол намотки, °	При $\lambda = 100$	При $\lambda = 220$	При $\lambda = 350$
60	0,8502	0,508	0,199
65	0,8778	0,5479	0,198
70	0,9093	0,6101	0,2088
75	0,9423	0,702	0,2391
80	0,9717	0,82	0,314
85	0,992	0,941	0,529

Анализируя результаты экспериментов, можно говорить о том, что длина свободного участка нити λ должна стремиться к минимальному допустимому значению, чтобы не ограничивать максимальное значение ширины ленты на оправке. Также на основе полученных зависимостей можно сделать предположение о том, что при изменении ширины гребенки ширина армирующего материала при прочих равных будет меняться пропорционально.

Также проводилось моделирование, где учитывалась возможность различного взаимного расположения гребенки и выходного ролика намоточного станка.

При этом входные данные для эксперимента имеют следующие изменения:

- 1) Ширина ленты на гребенке d будет принимать значение 40 мм.
- 2) Угол поворота гребенки будет варьироваться от -90° до 0° с шагом в 5°

На поверхности цилиндра был построен спиральный слой с числом точек на виток – 3601.

В результате выполнения моделирования было получено графическое представление зависимости ширины материала на оправке от угла намотки (рис. 3).

Для дальнейшего проведения численных экспериментов по выбору оптимальных параметров процесса намотки, влияющих на структуру материала в изделии, необходимо разработать программно-математическое

обеспечение для моделирования процесса намотки. Результатом работы программно-математического обеспечения станет управляющая программа для намоточного оборудования, реализующая задаваемую структуру материала в изделии.

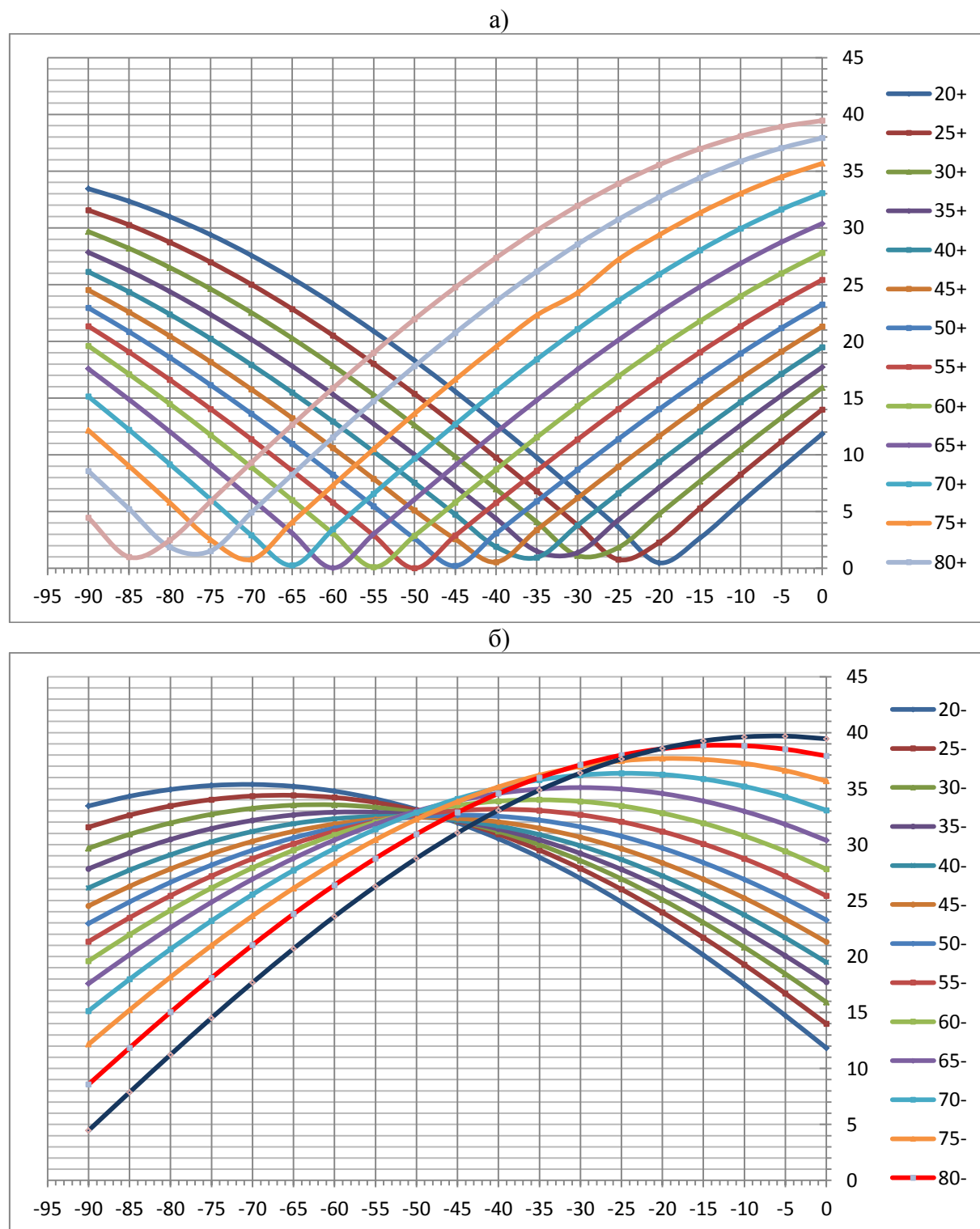


Рис. 3 – Графики изменения ширины армирующего материала на поверхности оправки: а) положительный угол поворота стакана выходного звена; б) отрицательный угол поворота стакана выходного звена

На базе ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова с использованием отечественного оборудования и полученных управляющих программ намотки необходимо будет провести натурные испытания. Сравнение результатов численных экспериментов с результатами натурных испытаний позволит внести корректировки в разработанное программно-математическое обеспечение.

После завершения работы над программно-математическим обеспечением необходимо проанализировать влияние видов получаемой структуры материала на механические характеристики изделия. Анализ предполагается выполнять в системе конечно-элементного анализа ANSYS (модуль ACP).

УДК 67.05

Решение оптимизационных задач при программировании станков для изготовления изделий из полимерных композиционных материалов методом намотки

Князев Д.Н.¹, к.т.н.; Искиндиоров М.С.¹

bodimus@mail.ru, marat-is@mail.ru

¹НИИ ВИУС ЮРГПУ (НПИ)

Аннотация:

В технологическом процессе изготовления изделий из ПКМ методом намотки большую роль играет программа намотки, от которой зависят как выходные характеристики композитных изделий, так и производительность технологического процесса. В настоящей работе рассматриваются две оптимизационные задачи, возникающие при создании управляющей программы для намоточного станка.

Ключевые слова:

Методы оптимизации (optimization methods), программа намотки (winding program), метод динамического программирования (dynamic programming method).

Основная цель программирования намоточных станков состоит в формировании программы намотки, обеспечивающей управление рабочими органами намоточного станка для изготовления изделия из ПКМ с заданными характеристиками.

В ходе подготовки программы намотки выполняется несколько обособленных этапов преобразования данных конструкторской документации на изделие из ПКМ:

- формирование модели технологической оправки;
- конструирование схемы армирования изделия;
- расчет траектории движения выходного звена станка;
- расчет перемещений рабочих органов станка;
- формирование кадров программы намотки.

Рассмотрим постановку и возможное решение задач расчета траекторий движения выходного звена и перемещений рабочих органов намоточного станка.

Траектория движения выходного звена намоточного станка принадлежит линейчатой поверхности касательных к линиям схемы армирования [1]:

$$\mathbf{R}(s) = \mathbf{r}(s) + \lambda(s)\boldsymbol{\phi}(s), \quad (1)$$

где $\mathbf{R}(s)$ – радиус-вектор характеристической точки выходного звена намоточного станка; $\mathbf{r}(s)$ – радиус-вектор линии схемы армирования; $\boldsymbol{\phi}(s)$ – единичный вектор касательной к линии схемы армирования; $\lambda(s)$ – длина участка свободной нити между точкой касания нитью оправки и точкой схода нити с выходного звена раскладчика намоточного станка; s – натуральный параметр линии схемы армирования.

Для конструирования траектории движения выходного звена намоточного станка необходимо определить закон $\lambda(s)$. Математически любой закон $\lambda(s)$ обеспечивает укладку материала вдоль одной и той же линии схемы армирования, однако необходимо учесть технологические ограничения намотки:

- 1) траектория выходного звена не может приближаться к поверхности оправки ближе, чем на заданное расстояние;

2) траектория выходного звена не может удаляться от поверхности оправки дальше, чем позволяет рабочая зона намоточного станка;

3) расход материала в характеристической точке выходного звена должен монотонно возрастать.

При этом траектория выходного звена должна располагаться как можно ближе к поверхности оправки для обеспечения максимальной управляемости положением материала в зоне укладки его на поверхность оболочки.

В такой постановке задача определения траектории движения выходного звена намоточного станка может быть сформулирована как оптимизационная, для решения которой предлагается применить метод дискретного динамического программирования [2]. Оптимальный закон $\lambda(s)$ отыскивается на фазовой плоскости $s \times \lambda$ (рисунок 1).

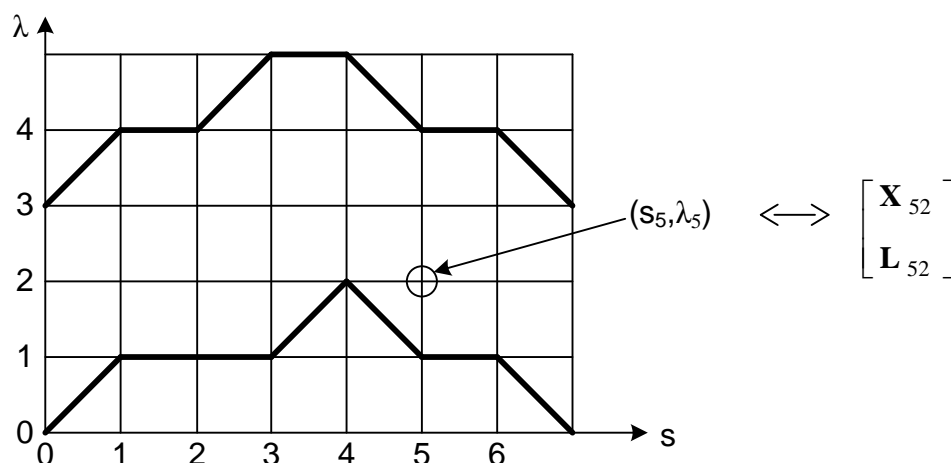


Рис. 1 – Фазовая плоскость $s \times \lambda$

В качестве критерия оптимизации рассматривается минимизация функционала

$$F = \sum_{i=0}^{N-1} \|\Delta \mathbf{R}\| \quad (2)$$

где $\Delta \mathbf{R}$ – приращение вектора характеристической точки выходного звена намоточного станка на переходе из одного узла фазовой плоскости в другой; N – число отсчетов по оси s .

Каждому узлу фазовой плоскости ставится в соответствие вектор обобщенных координат намоточного станка \mathbf{X} и вектор расхода материала \mathbf{L} , который вычисляется на основании вектора \mathbf{X} (рисунок 1). Верхняя и нижняя границы фазовой плоскости определяются при инициализации процедуры динамического программирования таким образом, чтобы выполнялись два первых технологических ограничения намотки. В процедуре динамического программирования переход на узлы, в которых расход убывает, запрещается. Этим обеспечивается соблюдение третьего технологического ограничения намотки.

Процедура дискретного динамического программирования отличается гибкостью. В алгоритм могут быть добавлены другие условия, например, требование исключения обратных вращений оправки. Функционал также может быть модифицирован или заменен на другой.

Еще одна оптимизационная задача возникает на этапе расчета перемещений рабочих органов намоточного станка.

Расчет перемещений рабочих органов намоточного станка должен выполняться с учетом ограничений на максимальные скорости и ускорения движения рабочих органов. В противном случае в ходе намотки возможны рывки рабочих органов, что негативно сказывается на качестве технологического процесса намотки и на долговечности технологического оборудования.

Максимальные скорости рабочих органов станка берутся из руководства по эксплуатации на технологическое оборудование.

Максимальные ускорения должны быть определены на основе оценки динамических характеристик оборудования. Так, максимальное ускорение движения оправки определяется моментом двигателя, установленного для вращения оправки, ее массой и требуемым натяжением материала. Таким образом, для оправок разной массы максимальное ускорение будет разным.

Решая задачу формирования гладких законов движения рабочих органов намоточного станка, будем рассматривать ее как оптимизационную.

При этом будем отыскивать такие законы движения рабочих органов, которые обеспечивают максимальное быстродействие станка при учете ограничений, накладываемых на значения скоростей и ускорений по осям.

Задача может быть решена методом дискретного динамического программирования на фазовой плоскости $s \times \dot{s}$, где s – монотонно возрастающий параметр вдоль линии укладки; \dot{s} – скорость возрастания монотонного параметра.

Рассмотрим особенности поиска решения.

Каждому узлу фазовой плоскости $s \times \dot{s}$ можно поставить в соответствие вектор скоростей обобщенных координат станка следующим образом:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx}{ds} \frac{ds}{dt},$$

где $\frac{dx}{dt}$ – скорость по координате x ; $\frac{ds}{dt} = \dot{s}$ – значение, взятое в узле фазовой

плоскости; $\frac{dx}{ds}$ – производная координаты x по параметру s , вычисленная на

этапе расчета траекторий движения рабочих органов намоточного станка.

Значениями скоростей фазовая плоскость заполняется на этапе инициализации процедуры дискретного динамического программирования.

Рассмотрим для примера элементарный переход на фазовой плоскости из узла (s_1, \dot{s}_2) в узел (s_2, \dot{s}_3) . Путь, пройденный на этом элементарном переходе равен $\Delta s = s_2 - s_1$. Время перехода определяется из условия равноускоренности или равнозамедленности закона следующим образом:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta s}{\dot{s}_m}, \quad (3)$$

где $\dot{s}_m = \frac{\dot{s}_2 + \dot{s}_3}{2}$ – средняя скорость на участке.

Отметим, что если рассчитать время перехода для координаты p (пусть даже она будет монотонно возрастающей) исходя из того же условия

равноускоренности перехода по этой координате, то есть, следующим образом

$$\Delta t_p = \frac{x_2^p - x_1^p}{\dot{x}_m^p}, \quad (4)$$

где $\dot{x}_m^p = \frac{\dot{x}_{12}^p + \dot{x}_{23}^p}{2}$ – средняя скорость укладки на переходе, то полученное значение времени перехода будет отличаться от значения, полученного по формуле (3), то есть $\Delta t_s \neq \Delta t_p$.

Таким образом, на переходе из одного узла в другой невозможно обеспечить равнопеременное движение одновременно по всем координатам, не меняя при этом значений скоростей, рассчитанных при инициализации фазовой плоскости.

Решением этой проблемы может являться использование полиномов третьей степени (рисунок 2).

Полином третьей степени на участке однозначно определяется четырьмя коэффициентами.

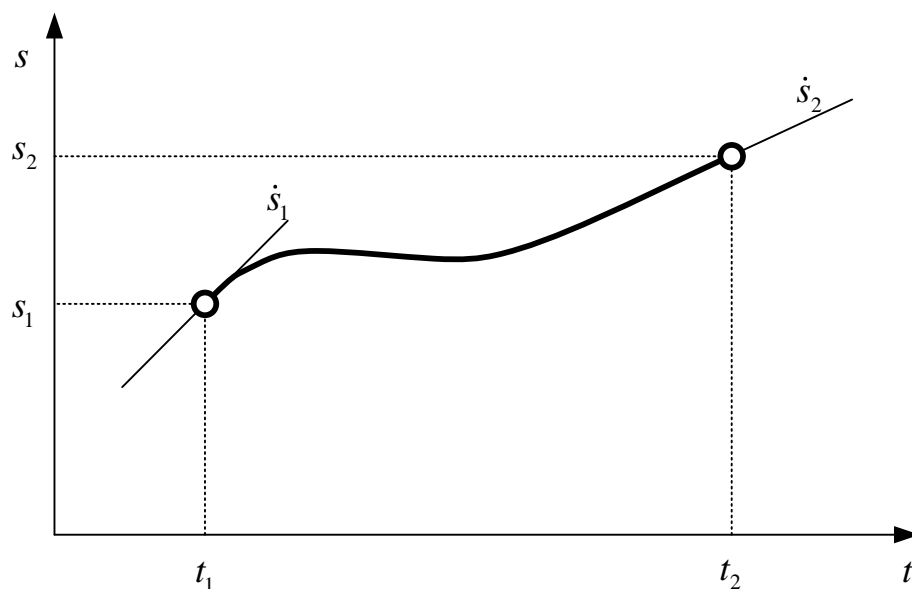


Рис. 2 – Полином третьей степени

Например, полином, изображенный на рисунке 2, определяется известными значениями $s_1, s_2, \dot{s}_1, \dot{s}_2$ при заданном интервале $[t_1, t_2]$.

Используя полином третьей степени можно построить законы для всех обобщенных координат на переходе из одного узла в другой для известного интервала времени, рассчитанного по формуле (3). Таким образом, интервал времени для всех обобщенных координат и для параметра s будет одинаковым, но только для параметра s закон изменения будет равноускоренным или равнозамедленным. Для остальных координат закон изменения на участке будет определяться полиномом третьей степени.

Следует учитывать, что после построения полиномов по всем обобщенным координатам потребуется найти для них максимальные значения скорости и ускорения. Может так случиться, что значение скорости или ускорения по одной или нескольким обобщенным координатам выйдет за допустимые пределы на некотором участке фазовой плоскости. Очевидно, на такой переход в процедуре динамического программирования должен быть наложен штраф, либо он должен быть исключен из множества допустимых переходов.

Важно также отметить, что полученный оптимальный закон изменения обобщенной координаты является непрерывной кривой гладкости 1, то есть в узлах сетки непрерывна только скорость, а вторая производная (ускорение) разрывна.

После завершения процедуры динамического программирования законы по всем обобщенным координатам восстанавливаются при помощи кубических сплайнов, в узлах которых зафиксированы значения обобщенных координат и их скорости, полученные из сетки динамического программирования. При этом гарантируется, что скорости и ускорения не превышают заданных на входе динамического программирования максимальных значений. На основе этих законов формируются кадры программы намотки.

Таким образом, для решения оптимизационных задач в рамках программирования намоточных станков, эффективным оказывается метод дискретного динамического программирования, который в настоящее время

Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения
используется в системе автоматизированного программирования намоточных станков, разработанной сотрудниками ЮРГПУ (НПИ) и внедренной на ряде предприятий РФ.

Литература

1. Структура модели процесса намотки в системе автоматизированного проектирования управляющих программ для станков с ЧПУ. В.В. Алексейчик, В.К. Ершов, А.Н. Иванченко, В.А. Пальцев. Системы управления технологическими процессами. Межвузовский сборник, Новочеркасск, 1980.

2. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. Главная редакция физико-механической литературы изд-ва "Наука", 1974.

УДК 621.8

Применение инфракрасной термографии при дефектации деталей машин из полимерных композиционных материалов

Косенко Е.А.¹, к.т.н.; Зорин В.А.¹, д.т.н.; Баурова Н.И.¹, д.т.н.

KosenkoKate@mail.ru; madi-dm@list.ru; nbaurova@mail.ru

¹ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва

Аннотация:

Рассматривается метод и перспективы применения теплового неразрушающего контроля, позволяющего при помощи тепловизора определить наличие скрытых дефектов в деталях машин, изготовленных с применением полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова:

дефект, инфракрасная термография, неразрушающие методы контроля, полимерный композиционный материал, тепловизор.

Развитие дорожно-строительного машиностроения требует постоянного совершенствования существующих и внедрение новых материалов при производстве и ремонте машин, которые удовлетворяли бы таким противоречивым требованиям, как надежность, простота технологического процесса производства и возможности автоматизации процесса. В настоящее время перспективы развития в этой области во многом связаны с использованием полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1]. Однако, применение методов неразрушающего контроля к деталям машин, изготовленным с применением ПКМ, изучены не достаточно глубоко и при широком внедрении новых материалов в машиностроительное

производство требуют дополнительного внимания. В связи с этим важной и актуальной задачей является повышения точности распознавания технологических дефектов деталей из ПКМ.

Большое количество методов неразрушающего контроля (акустические, вихретоковые, диэлектрические, радиометрические, тепловые и др.), обусловленное разнообразием видов дефектов, свойств материалов и чистотой поверхностей подконтрольных объектов, а также их формами и габаритными размерами - не позволяют с достаточной степенью точности определить наличие в деталях, изготовленных с применением ПКМ наличие таких технологических дефектов, как неполное отверждение связующего, а также других трудно диагностируемых дефектов, имеющих небольшие размеры и/или расположенных на значительной глубине [2, 3]. Это во многом связано с неоднородностью по составу (анизотропией теплофизических и физико-механических свойств) и аморфной (неупорядоченной) структурой ПКМ, а также с физической природой процессов, протекающих в материале при выполнении неразрушающего контроля.

Универсальный характер, иллюстративность (информативность) результатов, высокая производительность, необходимость проверки большого количества ответственных узлов и деталей, изготовленных с применением полимерных композиционных материалов, а также безопасность обслуживания аппаратуры, обуславливают растущий интерес к инфракрасной (ИК) термографии в различных областях промышленности [2].

В Российской Федерации ИК термография применяется при решении прикладных задач в машиностроении, авиастроении, ракетостроении, приборостроении, в дорожно-строительном производстве, металлургии, энергетике, а также энергонадзоре, энергоаудите, жилищно-коммунальном комплексе. До 60% всех контролируемых объектов в различных областях современной промышленности возможно и перспективно контролировать методом теплового неразрушающего контроля [2].

Объединение достижений в области исследования теплопроводности ПКМ (внедрение «теплофизического» подхода к тепловым методам контроля) и ИК термографии, а также введение понятий одно-, двух- и трехмерных моделей теплового контроля создали условия для перехода от качественного применения ИК техники к практическому использованию ИК термографии в неразрушающем контроле деталей из ПКМ [2, 3].

Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено 4 типа образцов, соответствующие наиболее распространенным в машиностроении типам ПКМ:

1. Металлический образец, армированный углеродной тканью (рис. 1, а), имитирующий ремонт металлических деталей машин с использованием армирующих накладок;

2. Металлический образец, усиленный намоткой непрерывного волокна (рис. 1, в), имитирующий ремонт цилиндрических деталей машин с использованием намоточных композитов;

3. Образец из эпоксидного полимера с дисперсным наполнителем (в качестве наполнителя использовался порошок шунгита с содержанием углерода 30,9%), (рис. 1 б, г, д);

4. Образец из эпоксидного полимера с локальными изменениями теплофизических свойств, (рис. 1 е).

Проведение серии экспериментальных исследований, позволило установить, что тепловыми методами неразрушающего контроля можно обнаружить следующие технологические дефекты, наиболее характерные для деталей машин, изготовленных с применением ПКМ: расслоение между отдельными структурными частями образца (рис. 1, а), пустоты (рис. 1, б), внутренние трещины (рис. 1, в), поры (рис. 1, г), инородные включения (рис. 1, д), непрочности, плохой тепловой контакт между слоями, нарушение матрицы в композитах, влагу, примеси, локальные изменения

теплофизических и других характеристик материала (рис. 1, е), связанных с теплофизическими свойствами.

Наиболее удобными в применении и информативными при тепловых методах неразрушающего контроля являются бесконтактные дистанционные измерители температуры – пирометры и тепловизионная аппаратура. Термограммы, представленные на рис. 1, были получены при помощи тепловизора Testo 875-1i, оснащенного матрицей 160×120 пикселей и разрешением термограммы 320×240.

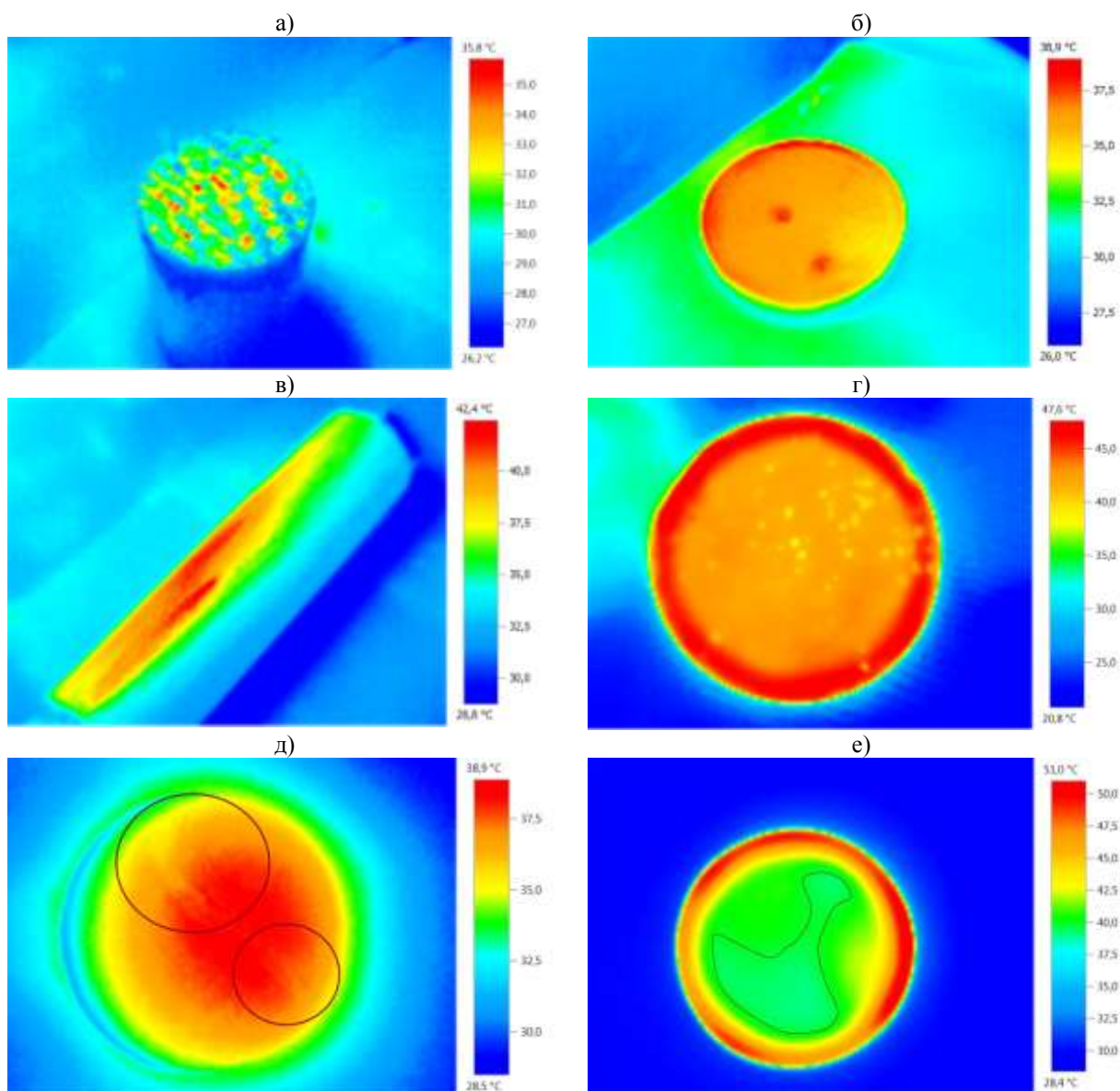


Рис. 1 – Термограммы образцов ПКМ с обнаруженными скрытыми дефектами:
а) расслоение между отдельными структурными частями образца; б) пустоты;
в) внутренние трещины; г) поры; д) локальные изменения теплофизических и других характеристик материала

Принцип работы тепловизора основан на регистрации и преобразовании электромагнитного излучения, испускаемого нагретыми телами.

При сообщении образам контроля дополнительной тепловой стимуляции, тепловая энергия внутри твердого тела распространяется во всех направлениях за счет процесса теплопроводности. Появление на поверхности образцов температурных аномалий, характеризующих наличие скрытых дефектов, связано с перераспределением тепловых потоков внутри объекта контроля.

При малых поперечных размерах дефекта происходит интенсивное перераспределение тепловых потоков внутри объекта контроля и быстрое их выравнивание, из-за чего на поверхности объекта температурные аномалии, соответствующие скрытому дефекту, не появляются.

Температурное нагружение образцов, термограммы которых представлены на рис. 1, осуществлялось с применением оптического нагревателя (рис. 1, а-в) и внешним нагревом воздухом (рис. 1, г, д). В первом случае наблюдение за распределением температуры и появлением температурных аномалий на их поверхности осуществлялось в процессе нагрева образцов, во втором – в процессе охлаждения после сообщения образцам избыточных температур. Различия в способах нагрева и периодах наблюдения обусловлены получаемыми температурными сигналами и их информативностью, а также оптимальным временем наблюдения (моментом времени, при котором обеспечивается оптимальное значение информативного параметра – количественной характеристики динамической теплопередачи в дефектных структурах образцов) [4, 5].

При контроле качества деталей машин, изготовленных с применением ПКМ выходные параметры (пространственное распределение температуры, динамика температуры, температурный сигнал над дефектом, оптимальное время наблюдения) в значительной степени зависят от состава ПКМ, а также способа формования. Поэтому для обеспечения корректного и точного

решения задачи теплового контроля необходимо индивидуальное определение параметров теплообмена (нагрева или охлаждения) для каждого состава и способа формования ПКМ.

Разработке режимов инфракрасной термографии, позволяющих обнаружить трудно диагностируемые дефекты в деталях, изготовленных с применением ПКМ должно предшествовать определение эффектов исследуемого материала на различных масштабных уровнях, проявление которых под действием различных физических явлений позволит получить точный диагностический сигнал.

Следует отметить, что комбинация ИК термографии с другими методами, в частности с ультразвуковым и голографическим, открывает новые перспективы развития неразрушающего контроля деталей из ПКМ.

Литература

1. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин. – М.: МАДИ, 2016. – 264с;
2. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль - М.: ИД Спектр, 2013. - 544с.;
3. Клюев В.В., Кузелев Н.Р. Технологии и средства неразрушающего контроля и технической диагностики НИИ интроскопии МНПО «Спектр» // Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. №1. С. 3–6.
4. Зорин В.А., Баурова Н.И., Косенко Е.А. Дефектация деталей из дисперсно-наполненных полимерных материалов методом инфракрасной термографии / Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2017. – №2. – С. 22–25.;
5. Zorin V.A., Baurova N.I., Kosenko E.A. Detection of defects in components made of dispersion-filled polymeric materials by the method of infrared thermography / Polymer Science. Series D. - 2017. - №3. – pp. 241–243.

Арамидные органопластики, состояние и перспективы

Кулагина Г.С.¹, к.х.н.; Железина Г.Ф.¹, к.т.н.; Тихонов И.В.², к.т.н.;
Дориомедов М.С.¹

gskulagina@gmail.com, jelezina@yandex.ru, termoteks@rambler.ru

¹ *Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

² *АО НПП «Термотекс», Московская область, г. Хотьково*

Аннотация:

Исследованы свойства конструкционных органопластиков на основе арамидных волокон третьего поколения Русар-НТ. Показаны перспективы создания высокопрочных конструкционных полимерных материалов с повышенной устойчивостью к поглощению влаги по сравнению с серийными органопластиковыми авиационного назначения.

Ключевые слова:

aramidnye organoplastiki, aramidnye volokna, svoystva organoplastikov.

Во ФГУП «ВИАМ» разработан широкий ассортимент конструкционных органопластиков, армированных арамидными волокнами первого (СВМ) и второго поколений (Русар, Руслан) отечественного производства [1–3]. Они широко используются в авиационной технике для изготовления обшивок планера вертолетов, хвостовых секций несущих винтов, обшивок элементов механизации самолетов (Ка-50, Ми-26, Ми-28, Ми-34С и др.). Целесообразность применения арамидных органопластиков

обусловлена уникальным комплексом свойств, сочетающих легкость, высокую прочность, высокую ударную вязкость и стойкость к повреждениям. Эти материалы способны сохранять прочность и ресурс после механического удара различных типов и степени интенсивности (град, песок, мелкие камни, соударение с птицами и др.) [4–7].

За последние 5 лет были внедрены органопластики второго поколения марок ВКО-20, ВКО-2ТБ, ВКО-19Л [8], которые позволяют обеспечить стойкость деталей к воздействию осколков взрывных устройств, ударных волн высокой интенсивности, а также повысить надежность работы в неблагоприятных климатических условиях (Супер-Джет-100, Ка-52, Ил-96-300ПУ).

К недостаткам авиационных арамидных органопластиков относят повышенное (по сравнению с угле- и стекло-пластиками) водопоглощение. Это обусловлено наличием полярных групп в химической структуре арамидных полимеров, а также особенностями фибриллярной надмолекулярной организации высокоориентированных волокон.

В соответствии с требованиями к перспективной авиационной технике, совершенствование арамидных органопластиков, повышение прочностных характеристик и уменьшение водопоглощения является важной задачей авиационного материаловедения.

В данной работе рассмотрена возможность использования новых арамидных волокон Русар-НТ для создания конструкционных органопластиков авиационного назначения с повышенной устойчивостью к поглощению влаги и высокой эксплуатационной надежностью в жестких климатических условиях, в том числе в условиях теплого влажного климата.

Объектами исследования являлись:

- 1) арамидные нити Русар-НТ линейной плотности 31,3 и 58,1 текс;
- 2) экспериментальные образцы однонаправленных органопластиков на основе арамидных нитей Русар-НТ и типовых эпоксидных связующих (ЭДТ-69Н (М), ЭНФБ-2М, ВС-2526К).

3) экспериментальные образцы органотекстолитов, армированные тканями из нитей Русар-НТ. Использовали два типа тканей: ткань из нити 14,3 текс с переплетением – атлас 8/3 и поверхностной плотностью 87 г/м²; ткань из нити 58,1 текс с переплетением – полотно, поверхностной плотностью 128,3 г/м². В качестве связующих были взяты ЭДТ-69Н (М) (растворное) и ВСК-14-3 (расплавное).

Изготовление однонаправленных препрегов осуществляли путем пропитки нитей связующим и намотки их на цилиндрическую оправку диаметром 240 мм. Образцы однонаправленного органопластика получали по выкладочной технологии методом прямого прессования препрега.

Органотекстолиты получали из препрегов методом автоклавного формования. Для изготовления препрегов на основе растворного связующего ЭДТ-69Н (М) использовали пропиточную установку УПСТ-1000, на основе расплавного связующего ВСК-14-3 – установку Coatema VL-2800.

Методы исследования. Прочность при растяжении нити Русар-НТ определяли по результатам испытаний микропластика. Прочность нити в микропластике рассчитывали согласно формуле:

$$\sigma = P \cdot \rho / T,$$

где P – разрывная нагрузка микропластика, Н; ρ – плотность элементарного волокна равная 1480 кг/м³; T – линейная плотность нити, текс.

Модуль упругости арамидной нити определяли с помощью прибора ГСП УК-13 по значению скорости распространения ультразвукового импульса в нити длиной 0,5 м согласно формуле:

$$E = \rho \frac{l}{t}^2 10^{-9},$$

где l – база измерения, м; t – время прохождения ультразвуковых колебаний, с; ρ – плотность нити, равная 1480 кг/м³.

Реакционную способность связующих в присутствии наполнителя Русар-НТ исследовали методами термического анализа: дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) и термомеханический анализ (ТМА).

Коррозионную безопасность арамидного наполнителя Русар-НТ и органопластиков на его основе оценивали в соответствии с ГОСТ 9.902–81 по водородному показателю pH и концентрации ионов Cl^I и SO_4^{II} в водной вытяжке измельченного образца материала.

Влагосодержание арамидных нитей Русар-НТ определяли путем измерения потери массы образца методом ТГА при нагревании в интервале температур от 25 до 170°C. Влагопоглощение образцов органопластиков определяли в соответствии с ГОСТ 4650–80.

Испытания органопластиков на горючесть проводили по ОСТ 1 90094–79 (АП-25 Приложение F Часть I) в пламени газовой горелки со следующими характеристиками: диапазон температур 840–850°C, диаметр факела 60 мм, время воздействия 60 с. Размер образцов составлял 290×75 мм.

Физико-механические испытания органопластиков проводили на машинах Тиратест-2200 и РКМ-50. Предел прочности и модуль упругости при растяжении определяли по ГОСТ 25.601–80, предел прочности при сжатии – по ГОСТ 25.602–80, предел прочности и модуль упругости при изгибе – по ГОСТ 25.604–82.

Коэффициент реализации прочности арамидных волокон в органопластике рассчитывали по формуле:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{ар}^{оп}}{\sigma_{ар}}$$

где $\sigma_{ар}^{оп} = \frac{\sigma_{оп}}{V_{ар}}$ – прочность арамидного волокна в органопластике; $\sigma_{ар}$ – прочность элементарного арамидного волокна; $\sigma_{оп}$ – прочность органопластика; $V_{ар}$ – объемное содержание волокон в органопластике.

При расчете коэффициента реализации были сделаны следующие допущения: за прочность элементарного волокна принята прочность нити в микропластике, прочностью связующего пренебрегли ввиду его малого численного значения.

Тепло-влажностное старение органопластиков проводили в климатической камере «Climats» (Франция) согласно ГОСТ 9.707 при температуре 60°C и относительной влажности 85%, время испытаний 60 сут. В процессе испытаний проводили контроль массы образцов и их внешнего вида.

Результаты исследований

В таблице 1 представлены сравнительные свойства промышленных марок арамидного волокна отечественного и зарубежного производства. Видно, что по уровню физико-механических свойств арамидные волокна Русар-НТ превосходят зарубежные и российские аналоги. Что касается водопоглощения, то согласно полученным данным, наибольшей стойкостью к поглощению влаги обладают нити Русар-НТ, влагопоглощение которых в 5 и в 2,5 раза меньше по сравнению с серийными нитями СВМ и Руслан, соответственно, выпускаемых АО «Каменскволокно».

Таблица 1

Сравнительные свойства марок арамидного волокна

Наименование показателей	Kevlar	Twaron	СВМ	Руслан	Русар-С	Русар-НТ
			АО «Каменскволокно»		АО НПП «Термотекс»	
Плотность, г/см ³	1,44	1,44–1,45	1,44–1,45	1,45	1,45	1,45
Удельная разрывная нагрузка нити, сН/Текс	200–210	165–250	200–210	230–260	290	290
Прочность при растяжении, ГПа	2,9–3,0	2,4–3,6	3,8–4,0	4,5–5,2	5,5–6,5	5,8–6,0
Модуль упругости, ГПа	70–112	60–120	110–120	125–155	165–175	165–175
Удлинение при разрыве, %	2,4–3,6	2,2–4,4	3,8–4	2,6–3,0	2,5	2,0
Водопоглощение при φ=50-65% и Т=20°C, масс %	3,5–4,5	3,2–5	3,1	1,5	–	0,6

Важное преимущество арамидных волокон Русар-НТ перед серийными российскими волокнами СВМ и Руслан – нейтральные значения рН непосредственно после изготовления волокна. Так рН водной вытяжки

арамидных волокон Русар-НТ составляет ~6,9, ионы Cl^I и SO_4^{II} в водной вытяжке отсутствуют. Следовательно, введения дополнительного этапа по нейтрализации волокон Русар-НТ, снижающей их прочностные свойства, не требуется, и по коррозионной безопасности волокна удовлетворяют требованиям, предъявляемым к армирующим наполнителям авиационных органопластиков.

Для разработки состава и технологии изготовления органопластиков были проведены исследования отверждения полимерного связующего в препреге. По данным параметрам можно оценить влияние армирующего наполнителя, которое может быть связано с процессами на межфазной границе волокно-связующее – это химическое взаимодействие активных групп, избирательная сорбция компонентов связующего поверхностью волокна и др.

Были определены ряд параметров процесса отверждения связующих в индивидуальном состоянии и в составе препрегов на основе нитей Русар-НТ: температурный интервал процесса отверждения (T_n , T_k), температуру начала активной реакции отверждения T_o , температуру максимума реакции отверждения T_m , тепловой эффект реакции отверждения ΔH , Дж/г. Для препрегов дополнительно рассчитывали тепловой эффект реакции отверждения $\Delta H_{100\%}$ в пересчете на 100 % связующего, учитывая массовую долю связующего в препреге. Было определено время гелеобразования t_{gel} .

В табл. 2 приведены результаты исследования реакционной активности полимерных связующих марок ЭНФБ-2М, ВК-36РТ, ЭДТ-69Н(М), ВС-2526К и ВСК-14-3 в индивидуальном состоянии и в составе препрегов на основе Русар-НТ. Видно, что присутствие арамидных волокон практически не изменяет параметры отверждения связующих ВК-36РТ, ЭДТ-69Н(М), ВС-2526К, ВСК-14-3, но оказывает влияние на процесс отверждения связующего ЭНФБ-2М. Температурный интервал отверждения ЭНФБ-2М сдвигается в область более высоких температур, увеличивается тепловой эффект процесса отверждения. Вероятно, это связано с химической

активностью волокон Русар-НТ по отношению к полимерному связующему ЭНФБ-2М и должно учитываться при выборе технологических режимов формования органопластика. В целом, результаты исследований показали, что переход на новые волокна Русар-НТ потребует незначительной корректировки технологических процессов.

Таблица 2

Параметры реакционной способности связующих

Объект исследования	$T_n, ^\circ\text{C}$	$T_k, ^\circ\text{C}$	$T_o, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	$\Delta H, \text{Дж/г}$	$\Delta H_{100\%}, \text{Дж/г}$	$t_{\text{gel}} (120^\circ\text{C}), \text{мин}$
ЭНФБ-2М	95	287	137	167	412	412	22,0
Русар-НТ/ЭНФБ-2М	121	235	180	189	12	29	147
ВК-36РТ	159	249	190	203	–	310	–
Русар-НТ/ВК-36РТ	157	261	184	201	228	350	7,5
ЭДТ-69Н(М)	113	279	140	165	267	267	20,5
Русар-НТ/ЭДТ-69Н(М)	122	251	144	167	95,0	183	22,6
ВС-2526К	–	–	129	155	–	368	–
Русар-НТ/ВС-2526К	92	283	183	231	144	300	40,6
ВСК-14-3	–	–	189	195	513	–	–
Русар-НТ/ ВСК-14-3	–	–	189	197	315	508	–

Физико-механические свойства образцов органопластиков на основе волокон Русар-НТ в сравнении с разработанными ранее паспортизованными органопластиками на основе арамидного наполнителя второго поколения Руслан представлены в таблице 3. Порученные результаты свидетельствуют о том, что использование арамидного наполнителя Русар-НТ взамен наполнителя Руслан для изготовления однонаправленного органопластика позволяет повысить уровень механических свойств на 10–30% (органопластик на основе Русар НТ/Органит 18НЖ-Рус). Особо следует отметить увеличение на 30% прочности органопластика при сжатии. По этой характеристике традиционно амидные органопластики уступают стекло- и углепластикам, поэтому увеличение ее значения послужит для расширения областей использования органопластиков.

Физико-механические свойства органопластиков

Характеристики	Однонаправленный органопластик на основе Русар-НТ/аналог Органит 18НЖ-Рус	Органотекстолит на основе ткани Русар-НТ/аналог Органит 18Т-Рус	Органотекстолит на основе ткани Русар-НТ/аналог Органит 12Т(М)-Рус
Плотность, кг/м ³	1320/1320	1360/1350	(1380÷1390)/(1340÷1380)
Предел прочности при растяжении, МПа	1900/1500	840/820	930/880
K_{σ} , отн. ед.	-/-	(0,57-0,60)/ (0,70-0,75)	(0,70-0,74)/(0,70-0,75)
Модуль упругости при растяжении, ГПа	97/79	42/38	42/35
Предел прочности при сжатии, МПа	380/290	210/190	210/210
Предел прочности при изгибе, МПа	720/710	510/490	570/470
Модуль упругости при изгибе, МПа	67/55	30/25	34/25

Для органотекстолита, армированного тканым наполнителем Русар-НТ можно наблюдать незначительное увеличение упруго-прочностных характеристик в сравнении с типовым органотекстолитом Органит 18Т-Рус на основе ткани из нити Руслан. При этом коэффициент реализации прочности (K_{σ}) нитей Русар НТ в органопластике ниже, чем Руслан. Как известно, реализация свойств высокопрочных волокон в составе композиционных материалов в значительной степени зависит от текстильной структуры армирующей ткани, основным фактором при этом является изгибность нити. В данном случае использовалась ткань с повышенной изгибностью нитей из-за высокой толщины нити и полотняного

переплетения ткани, что вероятно привело к снижению прочностных свойств. Типовые армирующие ткани на основе нитей СВМ, Руслан для авиационных органопластиков имеют переплетение атлас 8/3 из нитей тонких номиналов, где изгибность нитей минимальная. Для повышения коэффициента реализации прочности нитей Русар-НТ в составе авиационных органопластиков были изготовлены органопластики на основе ткани 14,3 текс с атласным переплетением. Как видно из таблице 3 по уровню физико-механических свойств при растяжении и изгибе полученный органотекстолит превосходит на 20–25% его типовой аналог Органит 12Т(М)-Рус на основе нитей Руслан. Прочность при сжатии и коэффициент реализации прочности остаются на том же уровне. Следовательно, оптимизация текстильной структуры ткани, используемой для армирования органопластиков позволяет повысить уровень физико-механических свойств органопластиков.

На рис. 1 представлены кинетические кривые водопоглощения, полученные при температуре 70°C и влажности 98% для серийных органопластиков Органит 18Т (на основе волокна СВМ), Органит 18Т-Рус (на основе волокна Руслан) и образцов органопластика на основе волокна Русар-НТ. Как видно способность к водопоглощению снижается в зависимости от марки армирующего наполнителя. Так при использовании арамидного волокна СВМ, Руслан и Русар-НТ в составе органопластика равновесное содержание воды составляет ~ 3,2, 2,4 и 0,9, соответственно. Таким образом, по сравнению с серийными органопластиками экспериментальный образец органопластика на основе волокна Русар-НТ более устойчив к поглощению влаги в 2,5÷3,5 раза.

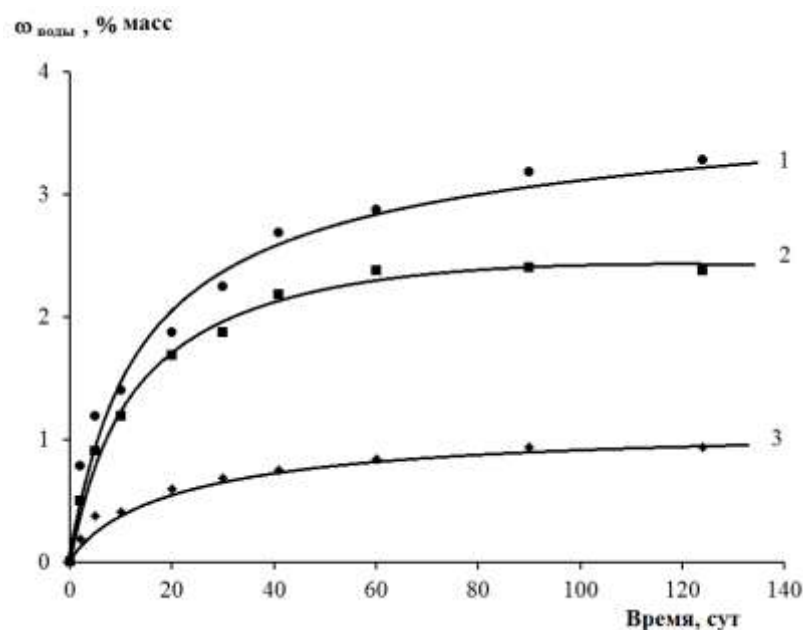


Рис. 1 – Кинетические зависимости водопоглощения образцов органопластиков при $T = 70^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности 98%.

1 – Органит 18Т на основе СВМ; 2 – Органит 18Т(Рус) на основе Руслан;
3 – органопластик на основе Русар-НТ

Испытания на горючесть органопластика на основе армированного тканого наполнителя из нити Русар-НТ показали, что материал относится к категории «самозатухающий». Продолжительность остаточного горения составляет 1 с (допустимые значения не более 15 с), размер участка прогоревшего материала 82 мм (допустимые значения не более 152 мм).

С целью оценки эксплуатационной надежности органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ были проведены исследования физико-механических свойств материала после длительного теплового или тепло-влажностного воздействия (табл. 4). Установлено, что уровень сохранения прочности и модуля упругости составляет 92–100% (табл. 4), что свидетельствует о высокой устойчивости органопластика к условиям тепло-влажностной среды.

Свойства органопластиков после термо- и тепло-влажностного старения

Характеристика	Исходное состояние	Тепло-влажностное старение (влажность 85%, T=60°C)		Термо-старение (T=80°C)	
		30 сут	60 сут	500 ч	1000 ч
Прочность при изгибе, T=20°C	710	705	700	710	720
Прочность при изгибе T=80°C	570	550	525	570	570
Модуль упругости при изгибе, T=20°C	30,0	29,5	30,0	30,0	30,0
Модуль упругости при изгибе, T=80°C	27,5	27,5	27,5	27,6	27,6

Таким образом, проведенные исследования возможности использования нового арамидного наполнителя третьего поколения Русар-НТ в виде нитей и текстильных форм для получения высокопрочных, влагостойких конструкционных органопластиков показали, что:

- волокна Русар-НТ являются нейтральными непосредственно после формования и совместимы с типовыми эпоксидными связующими авиационного назначения;
- органопластики на основе Русар-НТ (однонаправленные и равнопрочные) имеют высокие физико-механические свойства, превосходящие серийные российские органопластики, армированные волокнами (Руслан, СВМ) и зарубежные аналоги;
- органопластики обладают рекордно низким для арамидных органопластиков водопоглощением;
- применение конструкционных органопластиков на основе арамидных волокон Русар-НТ позволит повысить эксплуатационную надежность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях воздействия повышенной влажности и жестких климатических условий.

Таким образом, по предварительным результатам можно сказать, что органопластики на основе волокон Русар-НТ отвечают требованиям, предъявляемым к армирующим наполнителям авиационных органопластиков

и являются перспективными для создания новых полимерных композиционных материалов, предназначенных для элементов конструкций, подвергающихся в процессе эксплуатации воздействию жестких климатических условий и повышенной влажности. Дальнейшие работы следует проводить в направлении всестороннего исследования комплекса свойств новых органопластиков с учетом требований, предъявляемым к материалам авиационной техники.

Литература

1. Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов //Конверсия в машиностроении. 2004. №4 (65). С. 65–69.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
3. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Плетинь П.И., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А. Разработка и производство конструкционных органопластиков для авиационной техники //Известия самарского научного центра РАН 2012, том 14, №4. С. 411–416.
4. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органопластиков при ударных воздействиях //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 272–277.
5. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Орлова Л.Г., Войнов С.И. Баллистически стойкие арамидные слоисто-тканые композиты для авиационных конструкций //Все материалы. Энциклопедический справочник. Композиционные материалы. 2012. №12. С. 23–26.
6. Валуева М.И, Железина Г.Ф. Органопластики с высокой термо- и ударостойкостью.//Материаловедение, 2017, №10 (247), С. 21–24.
7. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Арамидный слоисто-тканый материал для защиты от баллистических и ударных воздействий //Труды

ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №9. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-6-6.

8. Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций //Авиационные материалы и технологии, 2017. №S. С. 368–378. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.

УДК 691.175.3

Оценка влияния анизотропии короткоармированного композиционного материала на механические характеристики проушин

Куркин Е.И.¹, к.т.н.; Спирина М.О.¹; Чертыковцева В.О.¹

eugene.kurkin@mail.ru; maryspirina@gmail.com;_vladslaava.s@yandex.ru

¹*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара*

Аннотация:

Проведено экспериментально-аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния проушин двух размеров из короткоармированного композиционного материала Victrex PEEK 90HMF20 с учетом его анизотропии.

Ключевые слова:

композиционный материал, проушина, напряженно-деформированное состояние, эксперимент.

Применение армированных композиционных материалов позволяет изготавливать из них геометрически сложные аэрокосмические конструкции [1]. Одним из перспективных материалов является материал PEEK 90HMF20 фирмы Victrex [2], армированный короткими угольными волокнами. Данный материал обладает высокими механическими характеристиками, устойчив к воздействию химически агрессивных сред и высоким температурам. В настоящее время идут активные испытания по его использованию в авиационной и космической промышленности [3, 4]. Исследование

поведения композиционного материала в областях с высоким градиентом напряжений возможно проводить на примере проушин, поскольку они содержат концентраторы напряжений и являются типовыми элементами конструкций [5]. В работе исследуются проушины двух размеров. Жесткость и прочность рассматриваемого материала сильно зависит от ориентации волокон в изделии. Поэтому важным является обеспечение управления течением расплава и, в следствии этого, расположением волокон в таких материалах [6]. Сравнение данных, получаемых в программных комплексах, моделирующих литье, с экспериментальными данными показывают хорошую сходимость [7]. В работе представлено сравнение картин ориентации волокон в проушинах, полученных в программном комплексе Moldex 3D и на электронном микроскопе TESCAN VEGA. Применение технологии литья под давлением позволяет добиться заданных механических характеристик изделия в требуемых направлениях. Благодаря этому свойству изготовленные из таких материалов узлы совмещают в себе преимущества металлов не подверженных расслоению и низкую массу. Расчет напряженно-деформированного состояния проушин проведен в ANSYS Workbench.

В данной работе проведено исследование проушин, вырезанных из пластины, изготовленной литьем из короткоармированного композиционного материала РЕЕК 90НMF20. Размеры пластины составляют 150×200 мм и определены условием обеспечения возможности размещения проушин двух размеров. Толщина пластины находится в диапазоне от 3,7 до 4,85 мм. В соединениях с проушинами присутствует контактное взаимодействие с цилиндрическим телом, обычно металлическим, имеют место контактные напряжения. При использовании технологии литья и армированного материала важным является место вырезки проушин. Раскрой пластин выбран таким образом, чтобы каждый размер проушин был расположен как вертикально, так и горизонтально на пластине (рис. 1).

Моделирование литья пластины под давлением проводилось в программном комплексе Moldex3D. Для этого была создана расчетная

структурированная сетка пластины и литниковой области с пограничным слоем в Rhinoceros. Сеткам заданы следующие атрибуты: литник, изготавливаемая форма, система охлаждения. Количество элементов в сетке составило 2622420, сетка состоит из 20 слоев, размеры ячейки 0,5×0,2 мм.

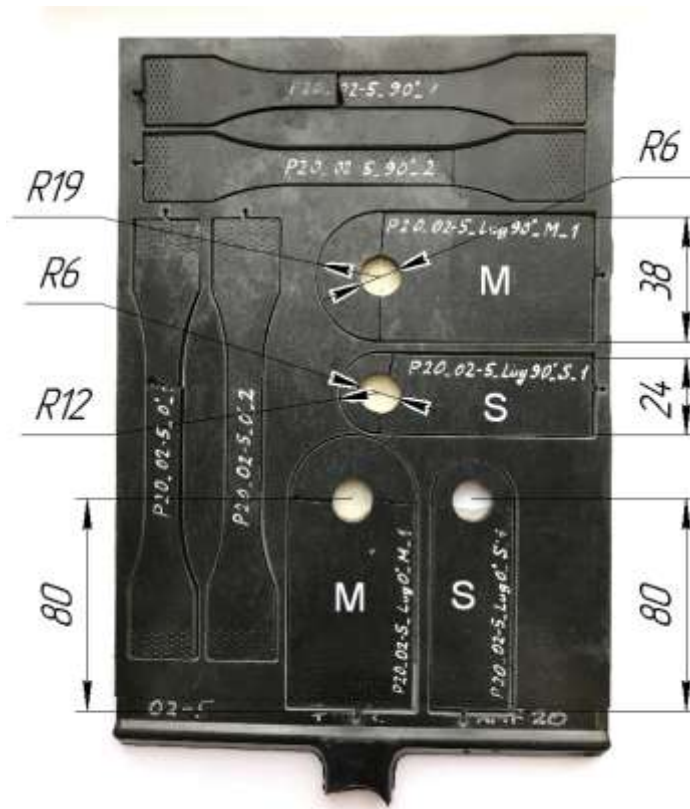


Рис. 1 – Раскрой пластины, изготовленной методом литья

Для построения модели материала, из которого будет осуществляться литье, важную роль играет вязкость материала. Для РЕЕК 90НMF40 в системе Moldex3D уже существуют характеристики, определяющие его модель вязкости. Используя характеристики разработчиков [2, 8] модель материала была изменена для РЕЕК 90НMF20. Данный материал имеет в 1,7 раз меньшее значение вязкости. Это позволило смоделировать процесс литья формы из РЕЕК 90НMF20.

Технологические параметры процесса литья [9] заданы с использованием параметров литьевой машины Negro Bossi VE 210-1700. Основные технологические параметры представлены в таблице 1.

Основные технологические параметры

Температура расплава, °С	400
Температура формы, °С	220
Максимальное инжекционное давление, МПа	150
Объем впрыска материала, см ³	184

Рассчитана ориентация волокон в пластине. Для сравнения полученной структуры материала с проведенным моделированием было проведено исследование среза проушин на электронном микроскопе фирмы TESCAN серии VEGA (рис. 2).

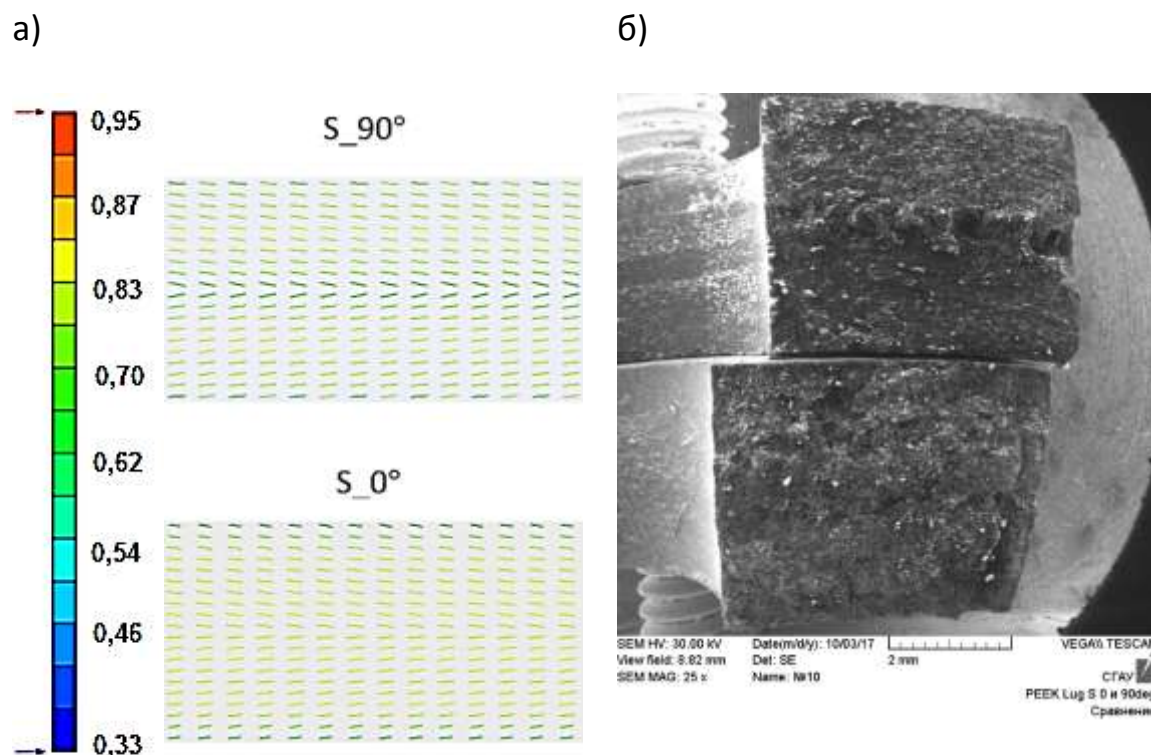


Рис. 2 – Ориентация волокон в торце проушин: а) ориентация, полученная в Moldex 3D, б) ориентация, полученная на электронном микроскопе TESCAN VEGA

С помощью модуля Digimat MAP произведена выборка и сохранение информации об ориентации волокон в месте вырезки проушины.

Анизотропный характер используемого материала PEEK 90HMF20 предполагает использование многоуровневого подхода к процессу его моделирования. В модуле Digimat-MF построена многоуровневая модель

материала, зависящая от микроструктуры, созданная на основе параметров компонентов композита, исходя из паспортных характеристик каждого компонента. Применена концепция ячейки представительного объема, позволяющая осуществлять переход между уровнями одним из методов гомогенизации, а именно численно-аналитическим подходом гомогенизации по методу «среднего поля» [10].

Для дальнейшего расчета полученный файл анализа материала передается в модуль Digimat-MX, в котором проходит реверс-инжиниринг. Цель данного процесса - поиск оптимальных значений, так называемых проектировочных переменных, то есть переменных, определяющих константы выбранного закона деформирования материала. Оптимальные значения проектировочных переменных минимизируют разницу между аналитической моделью Digimat-MF и экспериментальными данными, которые также добавлены в базу Digimat-MX в качестве тестового файла, содержащего значения напряжений и деформаций. Реверс-инжиниринг был выполнен по двум постановкам: по напряжениям и по деформациям. В таблице 2 представлены значения параметров материала до и после их оптимизации.

Таблица 2

Значения основных параметров материала до и после оптимизации

Параметр	Начальное значение	Оптимизированное значение
Модуль Юнга	4318	5313
Коэффициент Пуассона	0,44	0,441037
Предел текучести	11	11,9678

Результатом реверс-инжиниринга является модель материала, содержащая оптимизированные свойства компонентов композита, которая использована при расчёте напряженно-деформированного проушин с учетом анизотропии свойств перспективного композиционного материала.

Моделирование прочностной модели осуществлялось в программном комплексе ANSYS. Для корректного задания нагружения вместе с

геометрией проушины была построена геометрическая модель оси, представляющей собой цилиндр, диаметр которого равен диаметру отверстия проушины 12 мм. Длина оси равна 9,7 мм. Конечно-элементная модель проушины с осью построена в ANSYS Mechanical и содержит 40980 конечных элементов и 180694 узла. Ось вставляется в проушину симметрично – расстояние от его торцов до соответствующих ближайших поверхностей проушины одинаковы. Для соединения оси и проушины используется односторонний контакт «без трения» (Frictionless). Заданы следующие граничные условия нагружения:

- торец проушины жестко заделан;
- перемещение оси направлено вдоль оси проушины;
- условие жесткой заделки оставалось постоянным, в то время как перемещение болта было переменным.

В расчете задавался ряд значений перемещения оси для каждого размера проушин. Для каждого значения перемещения определялась сила растяжения проушины, поля эквивалентных напряжений и деформаций, а также овализацию отверстия.

Модуль перемещений проушины зависит от места закрепления (заделки) ее свободного конца, поэтому трудно проверяется экспериментально. Для сравнения результатов с экспериментом оценена величина овализации отверстия:

$$\omega = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \cdot 100\%$$

где $D_0=12$ мм – исходный диаметр отверстия, D_1 – диаметр отверстия в результате его деформации.

На рис. 3 представлены поля эквивалентных напряжений и деформаций для проушины второго размера при расположении вертикально и горизонтально на пластине толщиной 3,7 мм. В качестве силы растяжения проушин было выбрано 3000 Н.

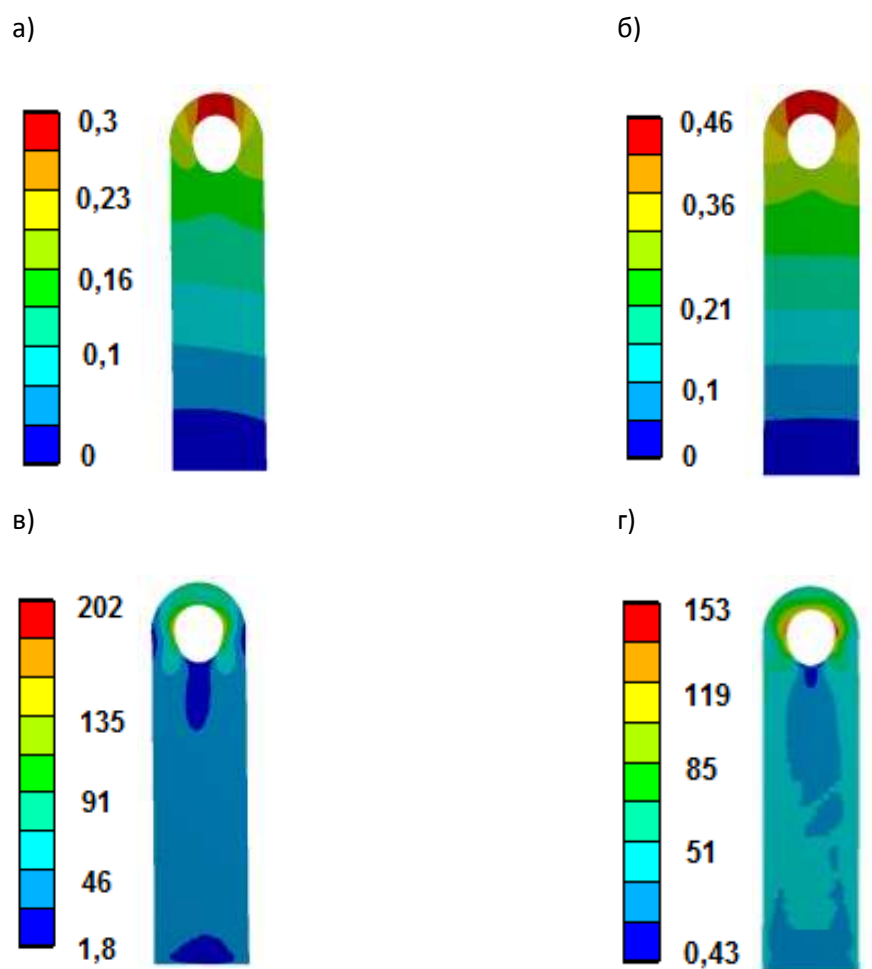


Рис. 3 – НДС проушин размера S с толщиной 3,7 мм: а) поля перемещений (мм) проушины, расположенной вертикально на пластине; б) проушины, расположенной горизонтально на пластине; в) поля эквивалентных напряжений (МПа) проушины, расположенной вертикально на пластине; г) проушины, расположенной горизонтально на пластине

Проушины были испытаны на растяжение с плавным возрастанием нагрузки вплоть до момента разрушения. Испытания проведены по схеме, предложенной Комаровым В.А. [5]. Проушины вырезаны из 4 пластин, для каждой проушины получены значения сил и овализации отверстия. С помощью системы MATLAB для каждого размера проушин были построены зависимости усилия на единицу толщины от овализации отверстия проушины (рис. 4). Пластины-заготовки и проушины, исследуемые в ANSYS, имеют толщину в диапазоне от 3,7 до 4,85 мм. Для корректного сравнения результатов моделирования и экспериментальных данных испытаний проушин разной толщины построены зависимости усилий на единицу

толщины от овализации отверстий проушин. Эксперимент на растяжение проушин неизбежно сталкивается с наличием люфтов в испытательной оснастке. Начало кривой овализации выбирается по продолжению линейного участка кривой нагружения. Такая методика соответствует подходам, используемым при испытаниях образцов на растяжение [11].

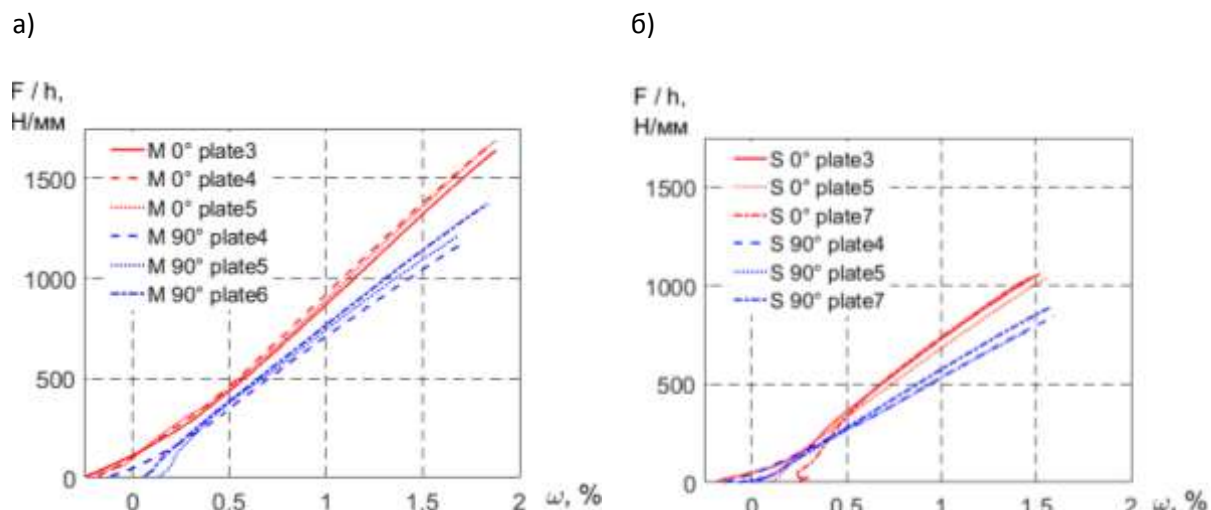


Рис. 4 – Зависимости усилий на единицу толщины от овализации отверстий проушин:

а) размера М, б) размера S

После усреднения графиков с эксперимента они были сравнены с графиками, полученными из ANSYS (рис. 5).

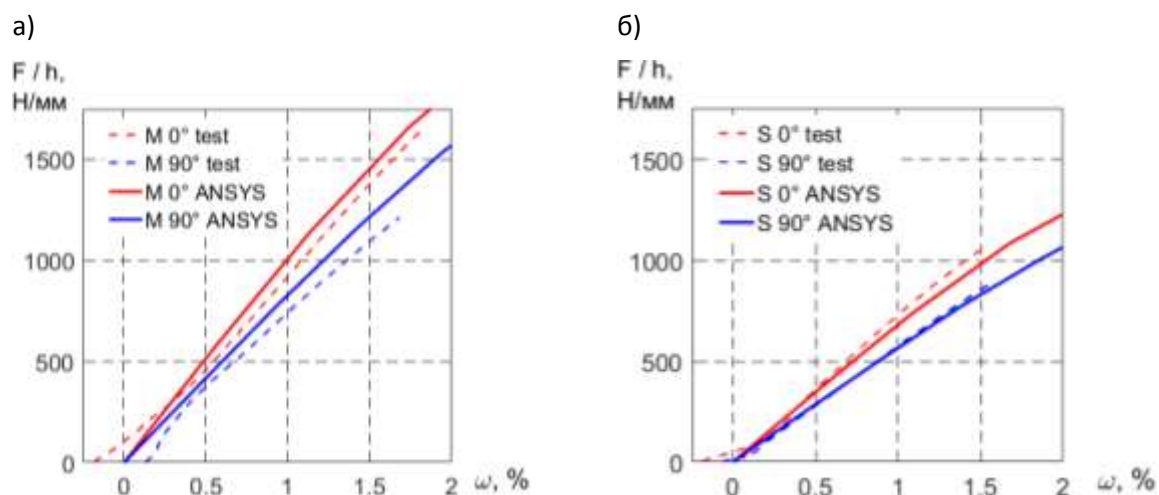


Рис. 5 – Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей усилий на единицу толщины от овализации отверстий: а) проушина размера М, б) проушина размера S

Выводы

В данной работе проведено исследование напряженно-деформированного состояния типовых аэрокосмических конструкций – проушин для передачи сосредоточенных сил. Рассмотрены проушины двух размеров, вырезанные из пластин из материала Victrex PEEK 90NMF20, армированного короткими угольными волокнами. Раскрой выбран так, что каждая из проушин располагается как горизонтально, так и вертикально на пластине. Проведено моделирование литья пластины в программном комплексе Moldex3D. Выполнено сравнение полученной при моделировании ориентации волокон в проушинах с картиной ориентации, полученной на электронном микроскопе TESCAN VEGA. В DIGIMAT построена модель материала, содержащая оптимизированные значения его основных характеристик. Данная модель использована при расчёте напряженно-деформированного проушин с учетом анизотропии свойств композиционного материала в ANSYS. Для каждого значения перемещения определена сила растяжения проушины, поля эквивалентных напряжений и деформаций, а также овализация отверстия. С помощью системы MATLAB для каждого размера проушин были построены зависимости усилий на единицу толщины от овализаций отверстий. Сравнение зависимостей растягивающих усилий от овализации отверстий проушины, полученных экспериментально и путем математического моделирования показало хорошее соответствие. В расчетах и в эксперименте получено, что жесткость проушин, вырезанных из пластины вдоль направления литья выше жесткости проушин, вырезанных поперек к направлению литья.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60093 мол_а_дк.

Литература

1. Fu S-Y, Lauke B, Mai Y-W. Science and engineering of short fibre reinforced polymer composites // Cambridge: Woodhead Publishing Limited; 2009. 364 с.

2. VICTREX PEEK 90HMF20 TDS [Электронный ресурс] // https://www.victrex.com/~media/datasheets/victrex_tds_90hmf20.pdf
3. Ready for take-off: Doors on the A350 with a primary structural component made from Victrex polymer [Электронный ресурс] // <https://www.victrex.com/en/news/2015/09/airbus-bracket>
4. Space Environmental Testing of PEEK and PFA sample (ExHAM-PEEK) [Электронный ресурс] // https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/2009.html
5. Комаров В.А., Кишов Е.А., Чарквиани Р.В., Павлов А.А. Расчётно-экспериментальный анализ прочности изделий из тканевого эпоксидного углепластика // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т.14, № 2. С. 106–112.
6. Huan-Chang Tseng, Rong-Yeu Chang, Chia-Hsiang Hsu Numerical predictions of fiber orientation and mechanical properties for injection-molded long-glass-fiber thermoplastic composites // Composites Science and Technology 150, 2017. С. 181–186.
7. Huan-Chang Tseng, Rong-Yeu Chang, Chia-Hsiang Hsu Improved fiber orientation predictions for injection molded fiber // Composites Composites: Part A 99, 2017. С. 65–75.
8. VICTREX PEEK 90HMF40 TDS [Электронный ресурс] // https://www.victrex.com/~media/datasheets/victrex_tds_90hmf40.pdf
9. Барвинский И. Основы инженерных расчетов литья термопластов: технологические параметры // CADmaster. 2015. № 2. С. 70–77.
10. Stéphane Berbenni, Laurent Capolungo A Mori–Tanaka homogenization scheme for non-linear elasto-viscoplastic heterogeneous materials based on translated fields: An affine extension // C. R. Mecanique 343, 2015. С. 95–106.
11. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88) Металлы. Методы испытаний на растяжение // Москва, 35 с.

УДК 678.067.5

Композиционные материалы на основе термореактивных связующих и стеклянных наполнителей для изделий авиационной техники

Курносков А.О.¹; Соколов И.И.¹, к.т.н.; Мельников Д.А.¹

admin@viam.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

Аннотация:

Представлены сведения о стеклопластиках конструкционного назначения на основе растворных и расплавных связующих. Приведены данные о разработках ВИАМ, применяемых в изделиях авиационной техники. Описаны основные преимущества стеклопластиков на основе расплавных связующих. Изучены упруго-прочностные характеристики разработанных стеклопластиков в условиях воздействия повышенных температур, влажности и различных агрессивных сред.

Ключевые слова:

стеклопластики, прецизионные препреги, растворные и расплавные связующие.

Исследования в области создания стеклопластиков – композиционных материалов на основе стеклянных армирующих наполнителей и полимерных связующих (матриц) – впервые в нашей стране были начаты еще в 1945 г. по инициативе ВИАМ. Высокая механическая прочность, хорошие электро- и теплоизоляционные свойства, стойкость к воздействию агрессивных сред и

климатическим факторам, возможность конструирования изделий с учетом действующих нагрузок путем выбора рациональной структуры армирования, доступность и относительно низкая стоимость стеклянных наполнителей – все это позволило широко применять стеклопластики для изготовления различных деталей и агрегатов авиационной техники, с целью создания изделий с необходимыми эксплуатационными характеристиками.

Механические свойства стеклопластиков определяются уровнем упруго – прочностных свойств стеклянных волокон и матриц, их соотношением и прочностью связи на границе раздела. Промышленность производит стеклянные наполнители разнообразного состава в виде волокна различного диаметра – непрерывного или штапельного, стеклонитей и стекложгутов различной толщины, тканей разнообразного плетения, стекломатов, стеклохолстов и др. [1, 2].

Наибольшее распространение в авиационной промышленности получили армирующие наполнители на основе волокон следующих составов:

– из алюмоборосиликатного стекла (Е-стекло) следующего химического состава (массовое содержание, %): 52 – 56 SiO_2 ; 4 – 6 B_2O_3 ; 12 – 15 Al_2O_3 ; 21 – 23 CaO и др. Из алюмоборосиликатного стекла производят конструкционные стеклянные ткани марок Т-10, Т-11, Т-13 и др., а также ткани на основе полых капиллярных волокон – Т-15, Т-45;

– из высокомодульного магниального алюмосиликатного стекла (ВМП-стекло, за рубежом – S-стекло) следующего химического состава: 60 – 65 % SiO_2 ; 23 – 35 % Al_2O_3 ; 6 – 11 % MgO и др. Из алюмомагнийсиликатного стекла производят конструкционные стеклянные ткани марок Т-10(ВМП), Т-25(ВМП), Т-64(ВМП) и др.;

– из кварцевых волокон с содержанием 99,5 – 99,9 % SiO_2 изготавливают ткань марки ТС-8/3-К-ГО.

Выбор наполнителя обуславливает свойства стеклопластика на его основе. Так, использование наполнителей алюмомагнийсиликатного состава приводит к получению материалов с наиболее высокими значениями

прочности и модуля упругости при растяжении и изгибе, а также других видах нагружения, наиболее чувствительных к упруго-прочностным свойствам армирующего наполнителя.

Для изготовления материалов радиотехнического назначения, сочетающих комплекс высоких механических и диэлектрических характеристик, целесообразно применение кварцевых наполнителей, обладающих наряду с достаточно высокой прочностью (на уровне стекол марки Е) относительно низкой плотностью, хорошими теплофизическими и диэлектрическими свойствами.

Основным недостатком кварцевых наполнителей является высокая стоимость, вследствие чего в ряде случаев используют стеклянные ткани на основе полых волокон, которые при достаточно высоком уровне механических свойств (хотя и уступающем кварцевому наполнителю) обладают существенно меньшей стоимостью.

Основные характеристики волокон (плотность ρ , диэлектрическая проницаемость ϵ (при частоте 10^6 Гц), температурный коэффициент линейного расширения α , прочность при растяжении $\sigma_{\text{раст.}}$) различного химического состава представлены в табл. 1. [3]

Таблица 1

Основные характеристики минеральных волокон

Тип волокна	ρ , г/см ³	α , 10^{-6} °C ⁻¹	ϵ	$\sigma_{\text{раст.}}$, МПа
Е-стекло	2,54	6,0	6,6	3400
Полое из Е-стекла	1,70	–	4,1	2800
ВМП-стекло	2,56	3,5	5,2	4500
Кварцевое	2,20	0,5	3,7	4000
Кремнеземное	–	–	3,9	–
Базальтовое	2,70	–	6,5	3200

Прочностные свойства стекловолокон зависят от химического состава стекла, технологии их получения, наличия механических повреждений на поверхности волокон и их диаметра. С увеличением диаметра волокон их прочность падает.

Для изготовления стеклопластиков используются различные типы стеклянных тканей. Формирование стеклянной ткани, как и всякой другой ткани, происходит в результате взаимного переплетения двух систем нитей (основы и утка). Основные нити располагаются вдоль ткани, уточные нити – в поперечном направлении ткани. Переплетением называется определенный порядок чередования перекрытий нитей одной системы с нитями другой. Переплетение нитей в ткани определяет ее строение, а следовательно и свойства.

Существуют различные виды переплетений основы и утка для создания прочных тканей. Варьируя вид ткани, можно создать разнообразные армирующие структуры, влияющие в определённой степени на свойства композитов из них. Для производства стеклопластиков наиболее широко применяются ткани следующих типов: полотняного, саржевого, сатинового и однонаправленного.

Основные марки стеклянных тканей, их строение, виды замасливателей и аппретирующих составов, применяемые при изготовлении стеклопластиков конструкционного назначения приведены в таблице 2 [4, 5]. В таблице представлены: стеклоткань Т-10, Т-10(ВМП), Т-25(ВМП), Т-60(ВМП), стеклоткани на основе полых волокон Т-15(П) и Т-45(П) из стекла Е, а также стеклоткани типа 7781 и 120.

Марки стеклянных тканей

Марка ткани	Номинальная масса единицы площади, г/м ²	Количество нитей на 1 см, н/см		Вид переплетения ткани	Вид замасливателя и аппретирующего вещества
		Основа	Уток		
T-10	290	36 + 1	20 ± 1	Сатин 8 / 3	№ 14, парафиновая эмульсия
T-10(ВМП)	310	36 + 1	20 ± 1	Сатин 8 / 3	№ 14, № 4с
T-25(ВМП)	365	10 + 1	6 ± 1	Плотняное	№ 78, № 14, парафиновая эмульсия
T-60(ВМП)	235	28 + 1	6 ± 1	Плотняное	№ 14
T-15(П)	160	24 + 1	18 ± 1	Сатин 5 / 3	№ 76
T-45(П)	216	22 + 1	16 ± 1	Сатин 5 / 3	№ 76
7781	296	22,9	21,1	Сатин 8	К 506
120	105	23,6	22,9	Сатин 4	К 506

При производстве нагруженных изделий из стеклопластиков для авиационной техники наиболее широкое распространение получила автоклавная технология переработки с применением полуфабрикатов (препрегов) – предварительно пропитанных связующим армирующих наполнителей. Для обеспечения процесса пропитки армирующего наполнителя связующим применяют, как правило, две основные технологии изготовления препрегов – растворная, в которой необходимые технологические свойства связующего достигаются применением активных или пассивных растворителей, и расплавная, где требуемые реологические характеристики связующего обеспечиваются применением повышенной температуры. Традиционно при изготовлении препрегов использовали растворную технологию, которая является наиболее простой. При расплавной технологии в состав связующего растворитель не добавляют, а само связующее подогревают на каландрах пропиточной машины непосредственно в процессе нанесения на армирующий наполнитель. Температура нагрева зависит от свойств связующего.

На основе различных видов стеклянных наполнителей и полимерных связующих растворного типа в ВИАМ разработан широкий спектр стеклопластиков, нашедших применение в изделиях авиационной техники. Так, разработка эпоксидного стеклопластика марки СТ-69Н (табл. 3) на основе связующего ЭДТ-69Н обеспечила создание средненагруженных элементов внешнего контура летательных аппаратов конструкционного и радиотехнического назначения – обтекателей РЛС, створок шасси и грузовых отсеков, капотов. С применением стеклопластика СТ-69Н изготавливают силовую панель реверса, кожух задней подвески реверса звукопоглощающей конструкции двигателя ПС-90А2. Эпоксидные стеклопластики марок ВПС-33 и ВПС-34 на основе связующего ЭНФБ-2м применяют при изготовлении обшивок трехслойных панелей, люков, дверей, створок. На основе стеклопластика ВПС-33 изготавливают кожух сопла звукопоглощающей конструкции мотогондолы двигателя ПС-90А2 [2].

Таблица 3

Физико-механические свойства стеклопластиков на основе эпоксидных связующих растворного типа

Свойства	Температура испытания, °С	Направление приложения нагрузки	Значения свойств для стеклопластика марки		
			ВПС-33	ВПС-34	СТ-69Н
Предел прочности при растяжении, МПа	20	По основе По утку	600 300	460 200	630 325
	100*	По основе	530	350	500
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	По основе По утку	29 19	20 15	30 19
	20	По основе По утку	450 300	370 260	550 360
Предел прочности при сжатии, МПа	100*	По основе	330	260	420
	20	По основе По утку	710 410	470 275	900 525
Предел прочности при изгибе, МПа	100*	По основе	500	370	685
	–	–	1,58–1,73	1,88–1,97	1,8–1,9
Плотность, г/см ³	–	–	от -60 до +100	от -60 до +100	от -60 до +80
Температура эксплуатации, °С	–	–			

* Для стеклопластика марки СТ-69Н данные приведены при температуре испытаний 80°С.

Расширение областей применения ПКМ обуславливает повышение интереса к материалам, обладающими высокой тепло- и термостойкостью.

В изделиях авиационной и ракетной техники наиболее широкое применение нашли высокотемпературные стеклопластики на основе полиимидных и кремнийорганических связующих с температурой эксплуатации 300–350°C.

Интерес к кремнийорганическим связующим обусловлен их высокой термоокислительной устойчивостью и хорошими диэлектрическими свойствами. Однако, кремнийорганические полимеры обладают высокой размероизменяемостью и малой прочностью, это связано со значительной полидисперсностью, малой частотой сшивки и слабыми силами меж- и внутримолекулярного взаимодействия.

Особую важность в производстве высокотемпературных стеклопластиков приобрели полиимидные связующие. Они негорючие, обладают высокой термостабильностью, радиационной стойкостью, грибостойкостью и сохраняют свои физико-механические характеристики при повышенных температурах на достаточно высоком уровне. Так, на основе полиимидного связующего СП-97с (разработка ОАО «Институт пластмасс») во ФГУП «ВИАМ» был разработан стеклопластик СТП-97с обладающий высокой термостойкостью, огнестоек, практически не выделяет дыма при воздействии пламени и нетоксичен.

Основными недостатками стеклопластика СТП-97с являются низкие показатели экологической безопасности в процессе его переработки, повышенная пористость, а также высокая (350°C) температура формования. Высокая температура формования, из-за отсутствия или дороговизны соответствующего оборудования, препятствует его широкому использованию при изготовлении конструкций, к которым предъявляются повышенные температурные требования. Особенно это касается крупногабаритных конструкций, изготавливаемых, как правило, методами вакуумного или автоклавного формования. Кроме того, особенность формования стеклопластиковых деталей определяется реологическими

свойствами связующего, а именно – резким падением его вязкости при нагреве до температуры 160°C, что, в свою очередь, требует специальных приемов при формовании [6].

Стремление снизить температуру отверждения без существенного снижения механической прочности, теплостойкости и огнестойкости стимулировало исследования по модификации полиимидного связующего СП-97с различными мономерными и олигомерными соединениями, содержащими функциональные группы, взаимодействующие с amino- и карбоксигруппами полиимидообразующих компонентов.

В результате исследований было разработано связующее СП-97К с конечной температурой отверждения 170°C. В табл. 4 приведены сравнительные характеристики стеклопластиков на основе связующих СП-97с и СП-97К, в качестве армирующего наполнителя использовалась стеклоткань марки Т-10-80 из стекла алюмоборосиликатного состава [6].

Таблица 4

Характеристики стеклопластиков на основе связующих СП-97с и СП-97К

Характеристика	Материал	
	СП-97с	СП-97К
Прочность при растяжении, МПа	500	490
Прочность при сжатии, МПа	350	400
Прочность при изгибе, МПа	640	400
Диэлектрическая проницаемость при 10 ⁶ Гц	4,71	4,57
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10 ⁶ Гц	0,012	0,008
Температура формования, °С	350	170

Приведенные выше стеклопластики по уровню свойств не уступают аналогичным зарубежным материалам, однако из-за особенностей растворной технологии изготовления им присущ ряд неизбежных недостатков. В процессе формования стеклопластиков на основе растворных связующих выделяется значительное количество остаточных растворителей (ацетон, спирт), что повышает уровень пористости материала. Поры в изделиях из ПКМ, как известно, серьезно ухудшают механическую прочность материала – особенно под воздействием сжимающих и сдвиговых

нагрузок. Помимо этого, растворные связующие не соответствуют принципам «зеленой» химии [7, 8].

С каждым годом требования к экономической эффективности технологий и стоимости деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) все более ужесточаются. Повышаются требования к материалам как с точки зрения обеспечения необходимого уровня технологических свойств, так и широкого спектра эксплуатационных и специальных характеристик, что обуславливает крайнюю необходимость создания новых ПКМ и технологий их изготовления в рамках реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [9].

В ВИАМ разработан ассортимент стеклопластиков на основе расплавных связующих, не содержащих органических растворителей, что позволяет минимизировать образование газообразных продуктов в процессе формования, и тем самым снизить пористость ПКМ и повысить упруго-прочностные характеристики. Благодаря отказу от работы с экологически опасными растворителями снижается количество выделяемых в атмосферу вредных веществ. Такой подход требует использования специализированного оборудования для производства препрегов – современных пропиточных установок, позволяющих изготавливать так называемые прецизионные препреги с минимальным разбросом содержания связующего в препреге, отличающегося от номинального не более чем на 2%. Следует отметить, что созданное в ВИАМ производство расплавных препрегов из ПКМ является первым сертифицированным Авиационным регистром МАК производством препрегов в РФ [10].

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны и паспортизованы стеклопластики марок ВПС-48/7781 и ВПС-48/120 на основе расплавного эпоксидного связующего ВСЭ-1212 и стеклотканей арт. 7781 и 120 (табл. 5). Связующее ВСЭ-1212 с повышенными механическими и деформационными характеристиками, а также препреги на его основе обеспечивают возможность изготовления изделий с высоким уровнем упруго-прочностных

характеристик, устойчивых к воздействию неблагоприятных эксплуатационных факторов.

Таблица 5

Физико-механические свойства стеклопластиков на основе расплавного связующего ВСЭ-1212

Свойства	Температура испытаний, °С	Значения свойств для стеклопластика марки	
		ВПС-48/120	ВПС-48/7781
Предел прочности при растяжении, МПа	20	400	450
	120	365	385
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	24	29
	120	23	26
Предел прочности, МПа: – при межслойном сдвиге – при изгибе – при сжатии	20	66	71
	120	55	53
	20	450	640
	120	400	550
	20	540	630
	120	350	460
Плотность, г/см ³	–	1,80	1,89

Проведены исследования стеклопластиков в условиях воздействия повышенных температур, влажности и различных агрессивных сред. Характер изменения прочности при межслойном сдвиге стеклопластика ВПС-48/7781 после теплового (2000 ч) и термовлажностного старения (3 мес) представлен на рис. 1, а после воздействия агрессивных сред – на рис. 2.

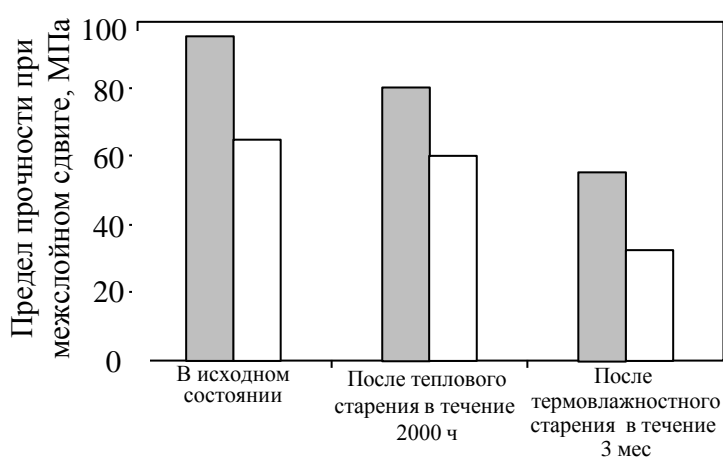


Рис. 1 – Прочность при межслойном сдвиге стеклопластика ВПС-48/7781 после теплового и термовлажностного старения при температуре испытаний 20 (■) и 120°С (□)

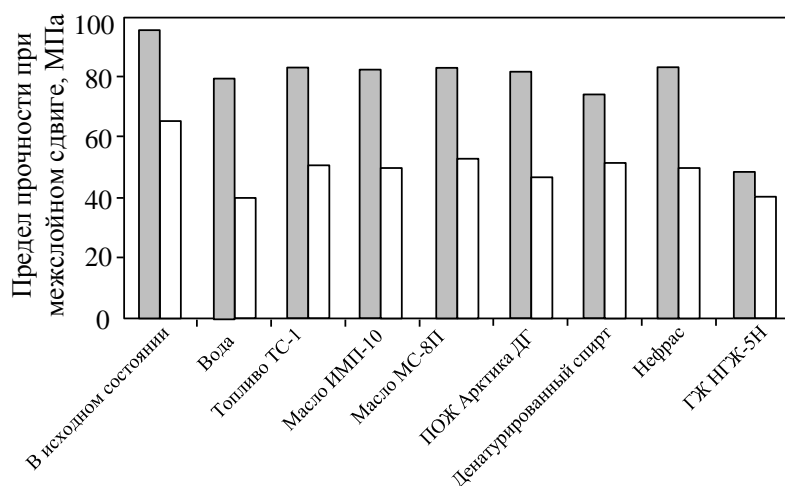


Рис. 2 – Прочность при межслойном сдвиге стеклопластика ВПС-48/7781 после воздействия агрессивных сред при температуре испытаний 20 (■) и 120°C (□)

Так же, во ФГУП «ВИАМ» разработан стеклопластик марки ВПС-53/120 на основе расплавленного эпоксидного связующего ВСЭ-34 с температурой отверждения не выше 140°C и равнопрочной стеклоткани типа 120 [7, 11]. Основные физико-механические свойства стеклопластика приведены в таблице 6.

Таблица 6

Свойства стеклопластика марки ВПС-53/120

Свойства	Температура испытаний, °С	Значения свойств при схеме армирования [0], нормализованы на	
		ВПС-48/120	Аналог М21/45%/120 фирмы Hexcel
Предел прочности при растяжении, МПа	20	440	320
	80	420	-
Модуль упругости при растяжении, ГПа	20	25	25
	80	23	-
Предел прочности, МПа:	– при межслойном сдвиге	20	63
		80	57
	– при изгибе	20	690
		80	580
Плотность, г/см ³	–	1,81	1,89
Содержание матрицы, % масс.		36,5	45
Толщина монослоя, мм		0,095	0,106

Данный стеклопластик может быть применен в деталях силовых конструкций планера, конструкций механизации крыла и элементов хвостового оперения изделий авиационной техники в том числе для ближне-средне магистрального самолета МС-21.

Полученные результаты наглядно демонстрируют, что разработанные стеклопластики обладают высоким уровнем упруго-прочностных характеристик, в том числе в условиях воздействия повышенных температур, влажности и агрессивных сред, что в значительной мере связано с использованием связующих расплавно-го типа [12].

Несмотря на то, что в последнее время широко ведутся работы по созданию и применению композиционных материалов на основе других наполнителей (углеродных, органических), еще многие годы стеклопластики, благодаря своей низкой стоимости и широкой сырьевой и производственной базы, будут занимать ведущее место по объему применения в качестве материала для изделий авиационной техники.

Литература

1. Аврасин Я.Д., Бородин М.Я., Киселев Б.А. Стеклопластики в авиационной промышленности //Авиационная промышленность. 1982. №8. С. 80–84.
2. Курносков А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиационной промышленности //Труды ВИАМ. 2015. №8. Ст. 8. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.10.2017). DOI 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8.
3. Соколов И.И., Трошкин И.В. Влияние химической природы тканых минеральных наполнителей на свойства полимерных композиционных материалов // Стекло и керамика. 2016. №6. С. 36–38.
4. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Свойства и особенности армирующих стеклянных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3 (32). С. 33-37 DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37.

5. Соколов И.И., Вавилова М.И. Конструкционные стеклопластики на основе расплавных связующих и тканей Porcher //Новости материаловедения. Наука и техника.2013.№5. Ст. 02 (materialsnews.ru).
6. Курносов А.О., Раскутин А.Е., Мухаметов Р.Р., Мельников Д.А. Полимерные композиционные материалы на основе термореактивных полиимидных связующих для авиакосмической техники. Обзор// Вопросы материаловедения, 2016. №4. С. 50–62.
7. Мельников Д.А., Павловский К.А., Курносов А.О., Вавилова М.И. Воздействие воды на эксплуатационные характеристики эпоксидных стеклопластиков// Все материалы. Энциклопедический справочник, 2017. №6. С. 17–22.
8. Курносов А.О., Мельников Д.А. Характеристики стеклопластиков на основе высокодеформативных расплавных связующих в условиях воздействия эксплуатационных факторов// Все материалы. Энциклопедический справочник, 2015. №11. С. 14–17.
9. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1. С. 3-33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
10. Курносов А.О. Полимерные композиционные материалы на основе высокодеформативного связующего для применения в мотогондолах двигателей // Сборник тезисов докладов. XIII Российская еже-годная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». М.: ИМЕТ РАН. 2016. С. 398–399.
11. Мельников Д.А., Громова А.А., Раскутин А.Е., Курносов А.О. Теоретический расчет и экспериментальное определение модуля упругости и прочности стеклопластика ВПС-53/120// Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2017. №1. Ст. 8. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 12.10.2017). DOI 10.18577/2307-6046-2017-0-1-8-8.

12. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2013. №4. Ст. 10св. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.10.2017).

Применение волоконных брэгговских решеток для определения деформации материала конструкции из полимерного композиционного материала

Махсидов В.В.¹, к.т.н.; Кашарина Л.А.¹; Евдокимов А.А.¹;
Раскутин А.Е.¹, к.т.н.

makhsidov_vv@viam.ru; admin@viam.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)

Аннотация:

В работе рассмотрены два метода определения деформации материала конструкции из ПКМ с использованием оптоволоконных сенсоров на основе волоконной брэгговской решетки (ВБР) на примере стандартных образцов и трехстрингерной панели из углепластика. Первый метод, основанный на измерении деформации ПКМ методом калибровки по деформации тензодатчика, имеет погрешность 6%. Такая методика рекомендована для стандартных образцов, например, применяемых для определения свойств ПКМ. Второй метод представляет собой модифицированный вариант первого и основан на калибровке по деформации, полученной в результате теоретического расчета конструкции в системе автоматизированного проектирования. Этот метод определения деформации ПКМ имеет погрешность 9%. Модифицированный вариант калибровки имеет преимущество в том, что не требует разрушения изготовленной конструкции и позволяет калибровать

конструкцию, имеющую труднодоступные места. По результатам выполнения данной работы был изготовлен демонстратор системы определения деформации материала конструкции из ПКМ с использованием интегрированных оптоволоконных сенсоров на основе ВБР на примере фрагмента верхней панели из углепластика ВКУ-47И центроплана самолета Ту-204СМ и разработана оптоволоконная система мониторинга деформации материала конструкции из ПКМ, установленная на возведенном арочном автомобильном двухполосном мосте в пос. Языково Ульяновской области.

Ключевые слова:

оптоволоконный чувствительный элемент, волоконная брэгговская решетка, полимерный композиционный материал, углепластик, мониторинг, встроенный контроль.

1. ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) в сравнении с традиционными материалами (сталь, алюминиевые и титановые сплавы и т. п.) обладают низким удельным весом, высокой прочностью, коррозионной стойкостью и долговечностью. По этой причине растет объем применения ПКМ в различных отраслях промышленности, особенно в авиастроении, судостроении, железнодорожном транспорте, строительстве и др. [1–4]. Несмотря на очевидные преимущества ПКМ, существует ряд факторов, которые ограничивают их широкое применение в изделиях, эксплуатирующихся длительное время, например, в авиационной технике и в строительных объектах. В силу своей природы и особенностей технологии производства ПКМ в сравнении с алюминиевыми сплавами не могут накапливать повреждения, обладают гораздо большим разбросом значений свойств, способностью поглощать влагу из окружающей среды и под воздействием механической нагрузки разрушаются практически мгновенно [5–8]. Если для конструкций на основе алюминиевых сплавов накоплен

большой опыт эксплуатации и существуют проверенные практикой методы оценки ресурса, то для конструкций на основе ПКМ такой опыт незначителен.

Вместе с тем, для ряда изделий, например военной или специальной авиации, некоторых строительных объектов, ресурс реальной конструкции и ресурс, определяемый расчетным методом, может значительно отличаться, что затрудняет оценку остаточного ресурса и обычно ведет к преждевременному съему и утилизации дорогостоящего узла или изделия в целом. Статистика для 70 самолётов F/A-18 показывает, что в течение 135 тысяч лётных часов скорость накопления повреждений различается примерно в 2 раза [9]. Такая разница в оценке прогнозируемого и реального ресурса связана с условиями эксплуатации и использование системы встроенного контроля для таких конструкций крайне актуально.

Перспективным с точки зрения встроенного контроля материала конструкции являются оптические волоконные датчики на основе брэгговской решетки [10, 11]. Волоконные брэгговские решетки (ВБР) в сравнении с традиционно применяемыми тензодатчиками более компактны, не подвержены электромагнитным помехам и могут интегрироваться в единое оптоволокно. Вместе с этим, оптоволокно достаточно легко интегрируется в ПКМ (например, в угле-, стекло-, органопластики и т. п.) в процессе изготовления элемента конструкции.

Эксплуатация авиационной техники требует периодической диагностики конструкции и оценки ее остаточного ресурса. В ряде случаев необходима внеплановая проверка конструкции. Актуальность в системах мониторинга подтверждается тем, что на примере эксплуатации вертолётов УН-60 (1900 шт.) и АН-64 (725 шт.) в течение двух лет общий эффект за счёт применения бортовых систем мониторинга составил \$112 млн при одновременном снижении непредвиденных отказов техники, затрат на незапланированные осмотры и т. п. [12].

Благодаря своим преимуществам, ВБР начинают применяться для систем встроенного контроля в авиационной, строительной, а также в других областях. Исследуется возможность использования ВБР для изделий авиационной и космической техники, например, для измерения деформации материала в фрагменте фюзеляжа гражданского самолета В-737 [13] и широкофюзеляжного типа А-350ХВВ [14], измерения остаточных технологических деформаций углепластика космического назначения [15], а также для оптоволоконных детекторов транспортного потока [16].

В данной работе показаны способы определения деформации ПКМ с использованием оптоволоконных сенсоров на основе ВБР: калибровка изготовленной конструкции из ПКМ с интегрированной ВБР и его модификация с использованием «эталонной» деформации, полученной в результате расчета в системе автоматизированного проектирования (САПР) [17]. Преимуществом второго метода является отсутствие необходимости разрушения изготовленной конструкции и возможность калибровки конструкции, имеющей труднодоступные места.

По результатам проведенных исследований был изготовлен демонстратор системы определения деформации материала конструкции из ПКМ с использованием интегрированных оптоволоконных сенсоров на основе ВБР на примере фрагмента верхней панели из углепластика ВКУ-47И центроплана самолета Ту-204СМ и разработана оптоволоконная система мониторинга деформации материала конструкции из ПКМ, установленная на возведенном арочном автомобильном двухполосном мосте через ручей Соловей в пос. Языково Ульяновской области. Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 4.1 «Интеллектуальные ПКМ II и III поколений» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Материалы и методика исследований

Определение деформации ПКМ методом калибровки по деформации тензодатчика проводили на стандартных образцах углепластика длиной, шириной и толщиной, соответственно $250 \times 10 \times 2$ мм. Для изготовления образцов использовали однонаправленный препрег марки ВКУ-47И на основе углеродного волокна IMS65 (Toho Tenax, Япония) и эпоксидного связующего ВСЭ-1212 (ФГУП «ВИАМ»). Пакет состоял из 12-ти слоев препрега, уложенных в одном направлении. С целью измерения деформации в образце в процессе сборки пакета между 6-м и 7-м слоем укладывали в направлении армирующих волокон оптоволокно с сформированной ВБР. Диаметр используемого кварцевого оптоволокна составил 125 мкм, а наружный диаметром его полимерной оболочки – 250 мкм. Заготовку под образцы из углепластика изготавливали в лабораторных условиях прессовым методом. При формовании углепластика использовали специальную пресс-форму для организации вывода оптоволокна с поверхности будущего образца в его переходной части (между рабочей и захватной частями). Деформацию образца углепластика определяли вдоль оси его нагружения при испытании на растяжение по ГОСТ 25.601-80 при комнатной температуре на испытательной машине Zwick/Roell Z100. Перед испытанием на захватную часть образца приклеивали накладки. Для измерения продольной деформации по его центру над местом интегрированной ВБР проводили аппликацию тензодатчика, а на рабочую зону крепили навесной экстензометр с базой 25 мм.

Для определения деформации ПКМ вначале экспериментально определяли коэффициент пропорциональности между осевой деформацией интегрированного оптоволокна, содержащего ВБР, и продольной деформацией образца, измеренной с помощью тензодатчика. Осевую деформацию оптоволокна определяли по формуле, приведенной в работе [18]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(1 - \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right) \varepsilon_z \quad (1)$$

где: λ_B – резонансная длина волны ВБР; $\Delta\lambda_B$ – изменение резонансной длины волны ВБР; n_{eff} – показатель преломления кварцевого стекла; p_{11} , p_{12} – коэффициенты Поккелься упруго-оптического тензора; ν – коэффициент Пуассона кварцевого стекла; ε_z – осевая деформация оптоволокна.

В работе было принято два допущения. Первое: радиальная деформация оптоволокна вызвана его осевой деформацией, что позволило использовать формулу (1). Второе: для данного метода испытания все слои в рабочей части образца в направлении приложения нагрузки деформируются равномерно. Выражая осевую деформацию из формулы (1) и подставляя значения постоянных ($n_{eff}=1,447467$; $p_{11}=0,113$; $p_{12}=0,252$; $\nu=0,19$ [18, 19]) получаем:

$$\varepsilon_z \approx \frac{\Delta\lambda_B}{0,809\lambda_B} \quad (2)$$

Затем при последующих испытаниях полученное значение деформации от ВБР умножали на определенный ранее коэффициент пропорциональности и получали продольную деформацию образца. Во время испытания продольную деформацию образца одновременно измеряли с помощью экстензометра, тензодатчика и ВБР. Более подробно данная методика описана в работе [20].

Второй использованный метод определения деформации ПКМ с использованием интегрированных ВБР является модификацией первого и основывается на калибровке по расчетной деформации. Эксперимент проводили на трехстрингерных панелях из углепластика ВКУ-47И с интегрированными оптоволоконными сенсорами на основе ВБР. Данная

панель является конструктивно подобным фрагментом верхней панели центроплана для модификации самолета Ту-204. Изначально, в соответствии с действующими на элемент конструкции силовыми факторами и его расположением, выбирали ориентацию слоев ПКМ и определяли геометрию поперечного сечения панели, проводя прочностной расчет. По полученным данным по автоклавной технологии из препрега ВКУ-47И были изготовлены трехстрингерные панели длиной 2000 мм и шириной 400 мм. Интеграцию оптоволокон с ВБР проводили в определенный слой ПКМ обшивочной части панели под стрингером.

Методом конечно-элементного моделирования в САПР «ABAQUS» проводили анализ распределения деформаций по сечению трехстрингерной панели при ее нагружении. Для возможности последующей экспериментальной проверки этого метода и удобства закрепления панели в оснастке моделировали испытание на трехточечный изгиб (рабочая база 1500 мм): панель ориентирована обшивкой к опорам и стрингерами к нагружающему пуансону. При таком изгибе обшивка панели работает на растяжение. Нагружение трехстрингерной панели проводили на вертикальном стенде для испытаний крупногабаритных конструкций фирмы «Walter + Bai» AG (Швейцария) в ГЦКИ им. Г.В. Акимова (г. Геленджик) [21]. Для последующего расчета нагрузку на панель при изгибе принимали как 90% (2575 кг) от разрушающей (2860 кг), определенной ранее при испытании аналогичной панели. Далее определяли коэффициент пропорциональности между рассчитанным значением деформации вдоль продольной оси панели и измеренным с помощью ВБР. На полученный коэффициент пропорциональности умножали значение деформации, измеренное ВБР с помощью формулы (2), и получали продольную деформацию материала в области с ВБР. В данном методе погрешность находили путем сравнения с деформацией, полученной из расчета в САПР.

2.2 Результаты исследований

При определении деформации ПКМ методом калибровки по деформации тензодатчика необходимо определить коэффициент пропорциональности между деформацией, измеряемой ВБР и определяемой тензодатчиком. В упоминаемой работе [20] для однонаправленных образцов углепластика марки ВКУ-47И коэффициент пропорциональности составил 1,136. По результатам экспериментов на образцах, изготовленных из различных партий, точность определения деформации с использованием ВБР по отношению к результатам, полученным с помощью тензометрии и экстензометра, составила для одинаковых уровней нагрузок не более 6 % при общей деформации образцов до 0,83 % (рисунок 1).

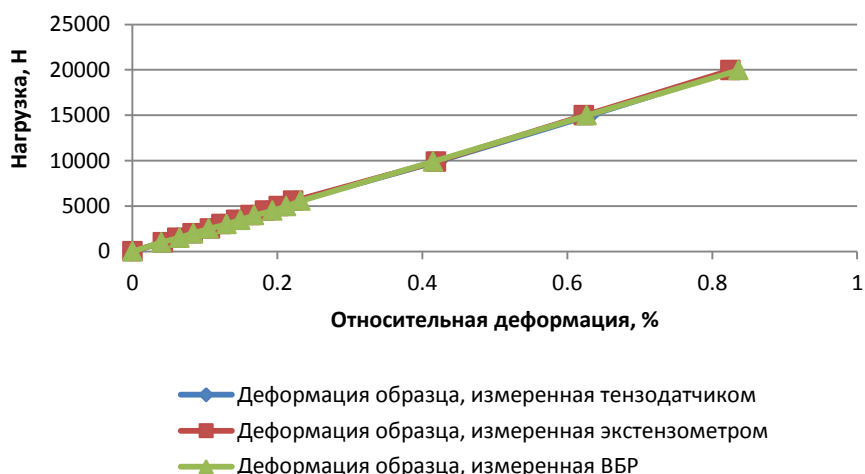


Рис. 1 – Сравнение показаний деформации образцов ПКМ, измеренных с помощью тензодатчика, экстензометра и интегрированной ВБР

Использование такого метода калибровки для оребренных панелей требует изготовления специальной оснастки под конкретный тип и размер детали, а главное – необходимость разрушения изготовленной конструкции, что не экономично. Кроме того, невозможно калибровать конструкции, имеющие труднодоступные места для приклеивания тензодатчиков. Поэтому для определения деформации ПКМ в трехстрингерной панели с использованием ВБР был опробован метод калибровки по значениям деформации, полученным в теоретическом расчете (калибровка по расчетной деформации).

На рисунке 2 в результате моделирования напряженно-деформированного состояния трехстрингерной панели при нагрузке, составляющей 90 % от разрушающей, показано распределение продольных деформаций вдоль ее продольной оси в слое с интегрированными оптоволоконными сенсорами на основе ВБР. По рассчитанным значениям продольной деформации материала, полученным для соответствующих мест расположения ВБР и измеренным с помощью интегрированных ВБР в процессе эксперимента при той же нагрузке, определяли коэффициент пропорциональности между ними. Данный коэффициент использовали при определении деформации ПКМ в процессе испытаний для других изготовленных панелей.

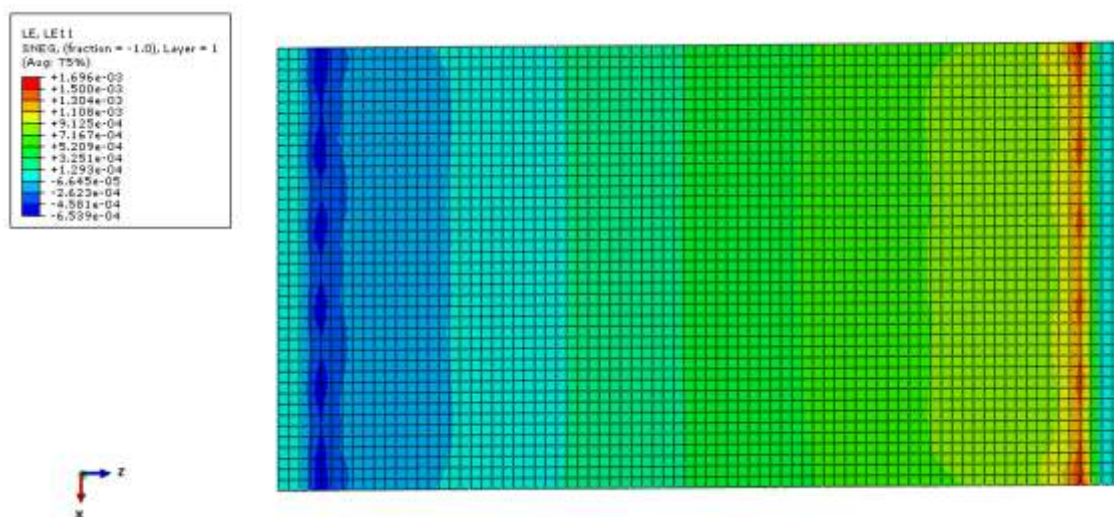


Рис. 2 – Распределение продольных деформаций вдоль продольной оси в слое обшивки с оптоволоконными сенсорами в половине панели при трехточечном изгибе

На рисунке 3 показаны экспериментальные значения продольных деформаций ПКМ, измеренных с помощью интегрированных ВБР, для другой трехстрингерной панели аналогичной конструкции в сравнении с расчетными данными. Погрешность определения деформации ПКМ с использованием ВБР по сравнению с расчетными данными составила 9 %. Более высокая погрешность по сравнению с первым методом предположительно связана с колебаниями размеров сечения и толщины монослоев для исследуемых панелей, а также погрешностями расчета.

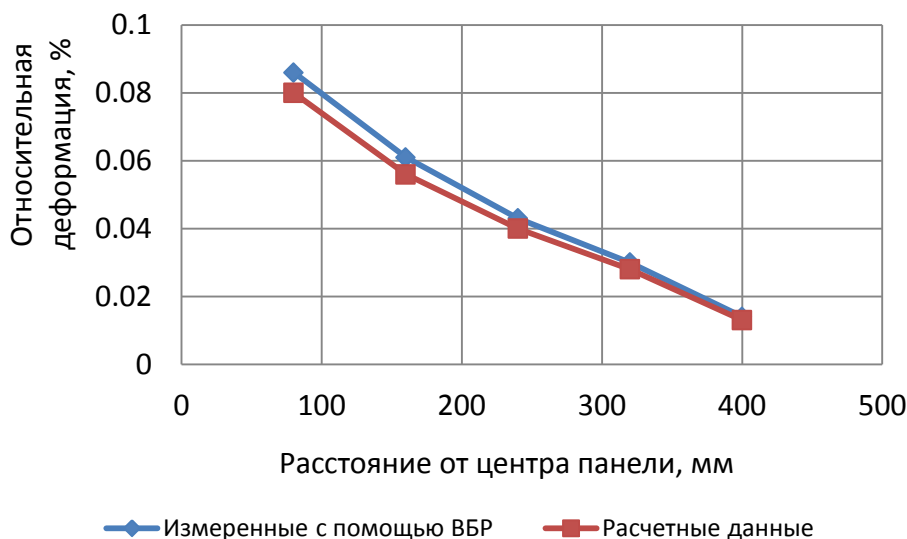


Рис. 3 – Измеренные с помощью интегрированных ВБР и расчетные значения продольных деформаций ПКМ для трехстрингерной панели из углепластика ВКУ-47И

Аналогичный результат получен и на других панелях такой же геометрии и изготовленных из того же материала той же технологией. Этот метод калибровки был опробован для приложения нагрузки к испытываемой панели в 10% от разрушающей, который также показал погрешность определения деформации ПКМ в пределах 9%.

Рассмотренный метод определения деформации ПКМ при калибровке по расчетной деформации возможно применять и для сенсоров на основе ВБР, позволяющих одновременно измерять продольную и поперечную составляющую деформации материала [22].

На основе разработанного метода определения деформации ПКМ при калибровке по расчетной деформации изготовлен демонстратор системы определения деформации материала конструкции из ПКМ с использованием интегрированных оптоволоконных сенсоров на основе ВБР на примере фрагмента верхней панели из углепластика ВКУ-47И центроплана самолета Ту-204СМ. Демонстратор состоит из трехстрингерной панели из углепластика ВКУ-47И с интегрированными в структуру материала ВБР, устройства опроса ВБР (интеррогатор) и мобильного компьютера с

установленным специальным программным обеспечением (рисунок 4). Демонстратор позволяет контролировать до 30 зон с частотой до 100 Гц.



Рис. 4 – Демонстратор системы определения деформации материала конструкции из ПКМ с использованием интегрированных ВБР (на примере фрагмента верхней панели из углепластика ВКУ-47И центроплана самолета Ту-204СМ)

С учетом полученных результатов определения деформации ПКМ методом калибровки по деформации тензодатчика в ФГУП «ВИАМ» разработана оптоволоконная система мониторинга строительных конструкций с использованием ВБР, интегрируемых на поверхность элемента конструкции из ПКМ. Данная система установлена и запущена в тестовую эксплуатацию на возведенном арочном автомобильном двухполосном мосте через ручей Соловей в пос. Языково Карсунского района Ульяновской области (рисунок 5).



а



б



в

Рис. 5. Арочный автомобильный двухполосном мост в пос. Языково Ульяновской области: а, б – общий вид; в – блок-контейнер с измерительным оборудованием

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены два метода определения деформации материала вдоль продольной оси конструкции из ПКМ с использованием оптоволоконных сенсоров на основе ВБР на примере стандартных образцов и трехстрингерной панели из углепластика ВКУ-47И. Показано, что измерение деформации ПКМ методом калибровки по деформации тензодатчика дает результат с погрешностью до 6%. Однако данный метод не реализуем для использования на готовых конструкциях, особенно крупногабаритных и имеющих труднодоступные места. Такая методика рекомендована для стандартных образцов, например, применяемых для определения свойств ПКМ.

При использовании модифицированного метода, где калибровка осуществляется по деформации, полученной от соответствующего

теоретического расчета конструкции в САПР, погрешность определения деформации ПКМ составила 9%. Более высокая погрешность по сравнению с первым методом предположительно связана с колебаниями размеров сечения и толщины монослоев для исследуемых панелей, а также погрешностями расчета. Этот метод имеет преимущество перед первым в том, что не требует разрушения изготовленной конструкции и позволяет калибровать конструкцию, имеющую труднодоступные места. В случае авиационной техники этот метод может быть реализован при прочностных испытаниях конструкции и ее элементов на этапе сертификации воздушного судна. Для определения деформаций и нагрузок в конструкциях из ПКМ в системе встроенного контроля рекомендуется использовать модифицированный метод расчета на основе калибровки по деформации, полученной от соответствующего теоретического расчета конструкции в САПР.

Литература

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
3. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
4. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шеин Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2016. №7. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.10.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12.

5. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 440–448.

6. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы // Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.

7. Ильичев А.В., Раскутин А.Е. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3. С. 62-66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-62-66.

8. Старцев В.О., Махоньков А.Ю., Котова Е.А. Механические свойства и влагостойкость ПКМ с повреждениями // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S1. С. 49-55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-49-55.

9. Molent L., Agius J. Agile Military Aircraft, Chapter 98 in “Encyclopedia of Structural Health Monitoring”, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-05822-0, 2009, pp.1–15.

10. Васильев С.А., Медведков И.О., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. Волоконные решетки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. №12. С. 1085–1103.

11. Способ измерения деформации конструкции из композиционного материала: пат. 2427795 Российская Федерация; опубл. 03.12.2009.

12. Adams C. HUMS Technology, Avionics Magazine, 2012, http://www.aviationtoday.com/av/military/HUMS-technology_76209.html#.VXbcJtLlBc (дата обращения 05.06.2015).

13. Takeda N., Tajima N., Sakurai T., Kishi T. Recent advances in composite fuselage demonstration program for damage and health monitoring in Japan // Structural control and health monitoring. 2005. V. 12. P. 245–255.

14. Проект «SARISTU» – «Smart Intelligent Aircraft Structures»: офиц. сайт. URL: www.saristu.eu (дата обращения: 30.03.2017).

15. Михайловский К.В., Базанов М.А. Измерение остаточных технологических деформаций в углепластике путем внедрения в него волоконных брэгговских решеток // Конструкции из композиционных материалов. 2016. №2. С. 54–58.

16. Дыщенко В.С., Раскутин А.Е., Зуев М.А. Дорожный детектор в системах безостановочного автоматического взвешивания // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2016. №5. Ст.12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-5-12-12.

17. Luuyckx G., Voet E., De Waele W., Degrieck J. Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: I. Parametric study //Smart Mater. Struct. 2010. V. 19. 9 p.

18. Leduc D., Lecieux Y., Morvan P.-A., Lupi C. Architecture of optical fiber sensor for the simultaneous measurement of axial and radial strains //Smart Mater. Struct. 2013. V. 22. P. 9.

19. Bertholds A., Dandliker R. Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibers //J. Lightwave Technol. 1988. V. 6. P. 17–20.

20. Махсидов В.В., Яковлев Н.О., Ильичев А.В., Шиенок А.М. «Измерение деформации углепластика с помощью интегрированных в его структуру волоконных брэгговских решеток» // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015. Т. 21. №3. С. 360–369.

21. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Гладких А.В., Гончаров А.А., Скиба О.В., Боярских А.В., Подживотов Н.Ю. Испытания крупногабаритных конструкций из полимерных композиционных материалов на силовом полу ГЦКИ "ВИАМ" им. Г.В. Акимова //Композитный мир. 2014. № 1. С. 72–78.

22. Voet E., Luuyckx G., De Waele W., Degrieck J. Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: II. Experimental validation //Smart Mater. Struct. 2010. V. 19. 9 p.

Полимерные композиционные материалы для перспективных авиационных двигателей

Мишуров К.С.¹; Мишкин С.И.¹, к.х.н.; Гуняева А.Г.¹, к.т.н.

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

Аннотация:

В условиях санкций в ФГУП «ВИАМ» не имеет возможности приобретения углеродных наполнителей фирм «Тоho Терах» (Япония) и «Porcher Ind.» (Франция), что делает невозможным выполнение обязательств по поставкам пререгов для изготовления двигателей ПД-14. В качестве альтернативных будут использоваться углеродные наполнители производства РФ и КНР.

Также при разработке двигателя ПД-35 в его конструкцию включена рабочая лопатка вентилятора (РЛВ) из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Без разработки материалов для этой лопатки невозможна реализации проекта двигателя ПД-35.

Ключевые слова:

полимерные композиционные материалы; авиационные двигатели; рабочая лопатка вентилятора.

Введение

В настоящее время ПКМ находят все более широкое распространение в конструкции узлов авиационной техники. Для самолетов и двигателей нового поколения применение ПКМ является ключевой технологией, позволяющей

кардинально снизить вес изделий, а значит повысить топливную эффективность самолетов и увеличить полезную нагрузку.

Отмечается, что применение ПКМ в конструкциях авиационных двигателей для гражданской авиации началось значительно позднее, чем в конструкциях корпусных деталей и узлов планера самолета. Это обусловлено особенностями существующих конструкций двигателей, относительно небольшими габаритами и сложной формой деталей, наличием большого количества фланцевых соединений, многообразием действующих нагрузок и другими факторами. Особым препятствием на пути широкого внедрения композитов являлся традиционный подход конструирования двигателей, опирающийся на технологические методы изготовления деталей из металлов, существенно отличающихся от технологии композиционных материалов.

В условиях санкций по отношению к Российской Федерации со стороны импортных поставщиков материалов затруднено приобретение импортных углеродных армирующих наполнителей фирм «Toho Tenax» (Япония) и «Porcher Ind.» (Франция), входящих в состав ранее разработанных и рекомендованных к применению углепластиков:

– ВКУ-25 на основе углеродного жгутового наполнителя из углеродного жгута HTS45 12К фирмы «Toho Tenax» и связующего ВСЭ-1212,

– ВКУ-29 на основе однонаправленной углеродной ткани полотняного плетения фирмы Porcher арт. 4510 из углеродного жгута HTS45 12К фирмы «Toho Tenax» и связующего ВСЭ-1212,

– ВКУ-39 на основе равнопрочной углеродной ткани саржевого плетения Porcher арт. 3692 из углеродного жгута HTA40 3К фирмы «Toho Tenax» и связующего ВСЭ-1212, используемых для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе створок капота, узлов реверсивного устройства мотогондолы двигателя ПД-14, а также для ответственных и второстепенных конструкций.

Также одной из мировых тенденций двигателестроения является разработка облегченных лопаток авиационных двигателей посредством

замены металлических сплавов на композиционные материалы при обеспечении прочности и эксплуатационной надежности. Ведущие двигателестроительные компании мира (General Electric и Pratt-Whitney (США), SNECMA (Франция), Rolls-Royce (Великобритания)) при проведении разработок в области создания вентиляторов перспективных ТРДД ориентируются на использование углепластиков, у которых: в 3 раза меньший, чем у титановых сплавов, удельный вес; большая прочность и жесткость в направлении армирования, повышенная усталостная прочность, что делает их перспективными материалами, в том числе для использования при изготовлении широкохордных лопаток.

Производство широкохордных лопаток из ПКМ реализуется, в основном, либо по технологии выкладки изделий из препрегов с последующим формованием, либо по технологии пропитки пакета наполнителя (преформы) расплавом связующего методом RTM (пропитка под давлением) или VaRTM (инфузионная технология). Препреговая технология предполагает выкладку предварительно пропитанного армирующего материала на специальную формообразующую оснастку с последующим отверждением в автоклавном комплексе при избыточном давлении. Полученный углепластик характеризуется высоким уровнем физико-механических свойств, низкой пористостью.

Метод исследования

В качестве методов испытания физико-механических характеристик углепластиков применялись стандарты ASTM

Оборудование и образцы

Для испытания углепластика на физико-механические характеристики изготавливались образцы с размерами в соответствии со стандартами ASTM на данное испытание. Образцы были вырезаны с помощью дисковой алмазной пилы из углепластиков плит размером 300×300 мм, отформованных в соответствии с технологической инструкцией в автоклаве.

Для испытаний образцов углепластика на физико-механические свойства использовались испытательные машины фирм Walter+bai и Zwick. Максимальная рабочая нагрузка у этих машин составляет 100кН (класс 0,5 от 200 Н до 100 кН). Они имеют полный набор захватов и приспособлений для испытания образцов на растяжение, сжатие и сдвиг. Температурные камеры позволяют испытывать материалы при температурах от -100 до 350°C.



Рис. 1 – Испытательная машина Walter+bai (LFM-100)



Рис. 2 – Испытательная машина Zwick (Z-100)

При изготовлении образцов из связующих расплавного типа применены дополнительные технологические приемы – для уменьшения

количества дефектов в образцах связующего от попадания пузырьков воздуха их необходимо предварительно вакуумировать (до деаэрации).

Опробованы следующие способы изготовления экспериментальных образцов связующего с использованием трех видов оснасток (рисунок 3):

– № 1 – изготовление образца путем отверждения навески связующего в открытой форме;

– № 2 – изготовление образца путем отверждения навески связующего в закрытой форме;

– № 3 – изготовление путем отверждения навески в блоковой форме, с последующей механической обработкой, заключающейся в разрезании полимерного блока на образцы требуемой толщины.

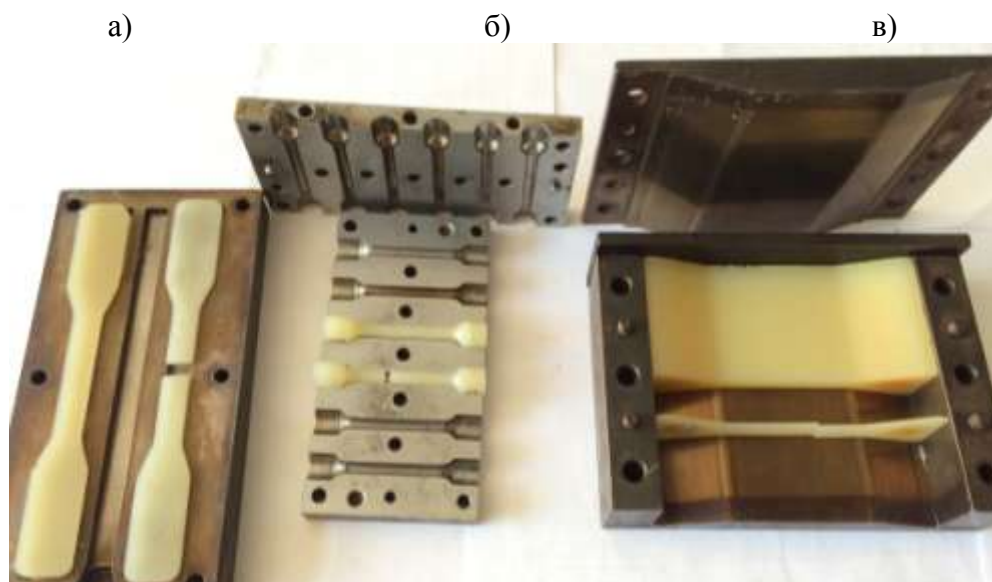


Рис. 3 – Оснастки для изготовления и образцы связующего

а) № 1 б) № 2 в) № 3

При изготовлении образцов заливкой в открытые формы образовались дефекты в виде значительной разнотолщинности, непараллельности плоскостей, трещин, менисков. При изготовлении образцов отлитых в закрытые формы – на поверхности рабочей зоны образца образовались механические дефекты в местах смыкания формы и трудноудаляемые пузырьки воздуха.

При изготовлении образцов с использованием третьей формы оснастки: заливка связующего в специальной блок и отверждение, – удалось избежать выше перечисленных дефектов. После отверждения форму разбирают, извлекают отвержденный полимерный блок ирезают его на образцы, требуемой толщины. На рисунке 4 показана схема разрезки отвержденных полимерных блоков на образцы для определения механических свойств при растяжении.

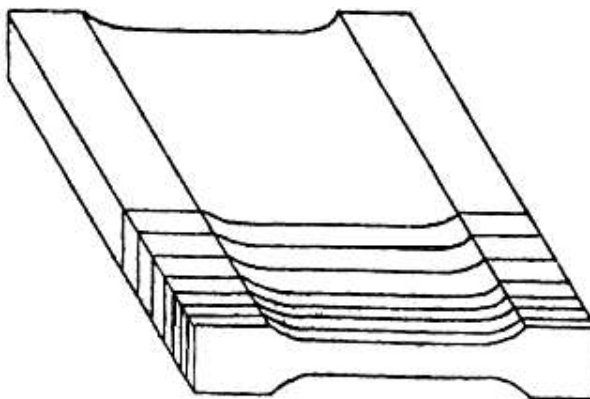


Рис. 4 – Схема разрезки полимерного блока на образцы для определения механических свойств при растяжении

Основная часть

В Российской Федерации в 2015 году введен в эксплуатацию современный завод по производству отечественного волокна, исследование свойств образцов российских волокон показали возможность разработки на их основе ПКМ, не уступающих по характеристикам материалам на основе импортных наполнителей, применяемых для изготовления деталей двигательной установки. Однако для внедрения в конструкцию указанных материалов необходимо разработать технологии изготовления препрегов стекло- и углепластиков типа ВПС-48/7781, ВКУ-25, ВКУ-29, ВКУ-39 на основе эпоксидного связующего ВСЭ-1212 и наполнителей производства ООО «Алабуга-Волокно», альтернативных наполнителям фирм Porcher и Toho Tenax и нормативную документацию для их изготовления, провести их общую и специальную квалификацию.

Из препрегов на основе российских углеродных наполнителей (производства ООО «Алабуга-Волокно») и связующего ВСЭ-1212 были изготовлены образцы углепластиков марок ВКУ-25/УМТ49, ВКУ-29/УМТ49.200, ВКУ-39/УМТ40.200, исследованы объемная доля наполнителя, плотность и физико-механические характеристики (ФМХ).

Таблица 1

ФМХ образцов углепластика ВКУ-25/УМТ49

Свойства	Условия испытаний	Углепластик марки ВКУ-25/УМТ49	Углепластик марки ВКУ-25 на основе связующего ВСЭ-1212 и углеродного жгута HTS-45 12К фирмы «Toho Tenax» (Япония)
Плотность γ , г/см ³ (ASTM D792)	RTD	<u>1,511</u> 1,508÷1,520	<u>1,570</u> 1,568-1,571
Толщина монослоя, мм (ММ 1.2.039)	RTD	<u>0,214</u> 0,214÷0,215	0,19-0,24
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее (ASTM D3039)	RTD	<u>1870</u> 1830÷1890	<u>2180</u> 2030-2270
	ETW	<u>1770</u> 1750-1790	<u>2090</u> 1970-2190
Модуль упругости при растяжении, ГПа, не менее (ASTM D3039)	RTD	<u>127</u> 126÷128	<u>135</u> 120-145
	ETW	<u>123</u> 122-125	<u>130</u> 125-135
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее (ASTM D6641)	RTD	<u>1030</u> 1000÷1050	<u>1190</u> 1120-1250
	ETW	<u>710</u> 700÷715	<u>830</u> 785-860
Предел прочности при межслоевом сдвиге, МПа, не менее (ASTM D2344)	RTD	<u>88</u> 88÷89	<u>88</u> 84-92
	ETW	<u>58</u> 56÷60	<u>59</u> 58-60
RTD – испытания материала при температуре 20°C ETW – испытания материала при повышенной температуре плюс 120°C во влагонасыщенном состоянии (выдержка при влажности 85% и температуре плюс (60±1,5)°C в течение 30 суток).			

Испытания (таблица 1) показали, что по уровню ФМХ образцы углепластика ВКУ-25/УМТ49 на основе связующего ВСЭ-1212 и жгутового наполнителя из углеродного волокна Umatex УМТ49-12К-ЕР уступают свойствам углепластика марки ВКУ-25. Однако, стоит отметить, что свойства углепластика ВКУ-25/УМТ49 после тепловлажностного старения

уменьшаются не значительно, что указывает на хорошее взаимодействие на границе фаз матрица-волокно и правильный подбор аппрета на волокне.

ФМХ испытания (таблица 2) углепластика ВКУ-29/УМТ49.200 на российской однонаправленной углеродной ткани марки УТ-1000-205-12К из углеродного волокна Umatex УМТ49-12К-ЕР также показали, что свойства материала не достигают уровня углепластика ВКУ-29.

Таблица 2

ФМХ образцов углепластика ВКУ-29/УМТ49.200

Свойства	Условия испытаний	Углепластик марки ВКУ-29/УМТ49.200	Углепластик марки ВКУ-29 на основе связующего ВСЭ-1212 и углеродной ткани фирмы Porcher арт. 4510 (Франция) из углеродного жгута HTS40 12К фирмы «Тоho Tenax» (Япония)
Плотность γ , г/см ³ (ASTM D792)	RTD	<u>1,511</u> 1,507÷1,519	<u>1,548</u> 1,544-1,550
Толщина монослоя, мм (ММ 1.2.039)	RTD	<u>0,208</u> 0,208÷0,209	0,19-0,24
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее (ASTM D3039)	RTD	<u>1820</u> 1800÷1840	<u>1910</u> 1830-1990
	ETW	<u>1510</u> 1500-1520	<u>1550</u> 1500-1600
Модуль упругости при растяжении, ГПа, не менее (ASTM D3039)	RTD	<u>110</u> 105÷115	<u>123</u> 106-145
	ETW	<u>97</u> 96-99	<u>103</u> 97-106
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее (ASTM D6641)	RTD	<u>910</u> 900÷915	<u>990</u> 920-1050
	ETW	<u>740</u> 730÷760	<u>760</u> 720-790
Предел прочности при межслоевом сдвиге, МПа, не менее (ASTM D2344)	RTD	<u>76</u> 75÷76	<u>80</u> 77-84
	ETW	<u>49</u> 47÷50	<u>47</u> 40-51
RTD – испытания материала при температуре 20°C ETW – испытания материала при повышенной температуре плюс 120°C во влагонасыщенном состоянии (выдержка при влажности 85% и температуре плюс (60±1,5)°C в течение 30 суток).			

Также по уровню ФМХ (таблица 3) образцы углепластика ВКУ-39/УМТ40.200 на основе двунаправленной углеродной ткани из

углеродного волокна Umatex UMT40-3K-EP немного уступают значениям ФМХ аналога – углепластика ВКУ-39.

Таблица 3

ФМХ образцов углепластика ВКУ-39/UMT40.200

Свойства	Условия испытаний	Углепластик марки ВКУ-39/UMT40.200	Углепластик ВКУ-39 на основе связующего ВСЭ-1212 и ткани Porcher арт. 3692 (Франция) из углеродного жгута НТА40 3К фирмы «Тоho Tenax» (Япония)
Плотность γ , г/см ³ (ASTM D792)	RTD	<u>1,530</u> 1,520÷1541	<u>1,563</u> 1,560-1,565
Толщина монослоя, мм (ММ 1.2.039)	RTD	<u>0,216</u> 0,215÷0,217	0,19-0,24
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее (ASTM D3039)	RTD	<u>770</u> 755÷780	<u>780</u> 750-800
	ETW	<u>740</u> 720-750	<u>780</u> 720-810
Модуль упругости при растяжении, ГПа, не менее (ASTM D3039)	RTD	<u>68</u> 66÷70	<u>65</u> 64-68
	ETW	<u>54</u> 51-57	<u>58</u> 54-60
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее (ASTM D6641)	RTD	<u>690</u> 680÷700	<u>720</u> 680-780
	ETW	<u>510</u> 500÷525	<u>530</u> 520-540
Предел прочности при межслоевом сдвиге, МПа, не менее (ASTM D2344)	RTD	<u>68</u> 65÷70	<u>73</u> 71-78
	ETW	<u>46</u> 42÷50	<u>44</u> 43-46
RTD – испытания материала при температуре 20 °С ETW – испытания материала при повышенной температуре плюс 120°С во влагонасыщенном состоянии (выдержка при влажности 85 % и температуре плюс (60±1,5)°С в течение 30 суток).			

В связи с тем, что углепластики на основе российского углеродного волокна по ФМХ не достигают свойств углепластиков на основе углеродных наполнителей фирм Porcher и «Тоho Tenax», встала необходимость поиска альтернативных поставщиков углеродных волокон. В качестве альтернативных поставщиков углеродных армирующих наполнителей были выбраны китайские производители. Из ассортимента выпускаемых углеродных материалов были выбраны углеродные волокна SYT45-3K,

SYT49(S)-12K фирмы «Zhongfu Shen Ying Carbon Fiber Co, Ltd» (КНР), аналогичные углеродным волокнам HTA-40, HTS-45 фирмы «Toho Tenax» (Япония).

Для налаживания полного производственного цикла по производству препрегов во ФГУП «ВИАМ» было организовано собственное производство углеродных тканей на основе китайских наполнителей фирмы «Zhongfu Shen Ying Carbon Fiber Co, Ltd». В ассортименте продукции ткацкого производства присутствуют ткани марки ВТкУ 2.200 (аналог ткани фирмы Porcher арт. 3692) и марки ВТкУ-3 (аналог ткани фирмы Porcher арт. 4510).

Из препрегов на основе китайских углеродных наполнителей, в том числе из тканей производства ФГУП «ВИАМ», и связующего ВСЭ-1212 были изготовлены образцы углепластиков марок ВКУ-25/SYT49S, ВКУ-29/ВТкУ-3, ВКУ-39/ВТкУ2.200, исследованы объемная доля наполнителя, плотность и физико-механические характеристики (ФМХ).

Таблица 4

ФМХ углепластика ВКУ-25/SYT49S

Свойства	Углепластик ВКУ-25/SYT49S	Углепластик ВКУ-25
Предел прочности при растяжении при 20°C, МПа (ASTM D3039)	<u>2190</u> 2010-2320	<u>2180</u> 2030 – 2270
Модуль упругости при растяжении при 20°C, ГПа (ASTM D3039)	<u>149</u> 141-170	<u>135</u> 120 – 145
Предел прочности при сжатии при 20°C, ГПа (ASTM D6641)	<u>1190</u> 1090-1320	<u>1190</u> 1120 – 1250
Модуль упругости при сжатии при 20°C, ГПа (ASTM D6641)	<u>110</u> 107-113	<u>105</u> 95 – 120
Предел прочности при межслоевом сдвиге при 20°C, МПа (ASTM D2344)	<u>109</u> 108-110	<u>88</u> 84 – 92

Установлено, что по пределу прочности при растяжении и пределу прочности при сжатии образцы углепластика ВКУ-25/SYT49S аналогичны углепластику ВКУ-25, а по модулю упругости при растяжении и пределу прочности при межслоевом сдвиге существенно превышает свойства аналога (таблица 4).

ФМХ углепластика марки ВКУ-29/ВТкУ-3

Свойства	Углепластик ВКУ-29/ВТкУ-3	Углепластик ВКУ-29
Предел прочности при растяжении при 20°C, МПа (ASTM D3039)	<u>1990</u> 1930÷2050	<u>1910</u> 1830÷1990
Модуль упругости при растяжении при 20°C, ГПа (ASTM D3039)	<u>119</u> 115÷121	<u>123</u> 106÷145
Предел прочности при сжатии при 20°C, ГПа (ASTM D6641)	<u>980</u> 950÷1010	<u>990</u> 920÷1050
Модуль упругости при сжатии при 20°C, ГПа (ASTM D6641)	<u>116</u> 114÷118	<u>110</u> 104÷116
Предел прочности при межслоевом сдвиге при 20°C, МПа (ASTM D2344)	<u>87</u> 81÷94	<u>80</u> 77÷84

Образцы углепластика марки ВКУ-29/ВТкУ-3 по пределу прочности при растяжении, модулю упругости при растяжении, пределу прочности при сжатии, находятся на уровне аналога – углепластика ВКУ-29, а пределу прочности при межслоевом сдвиге образцы превосходят аналог на 8% (таблица 5). Также хорошие ФМХ показал углепластик марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200. Свойства углепластика находятся на уровне с углепластиков ВКУ-39, однако по пределу прочности при растяжении превосходят аналог более чем на 20% (таблица 6).

ФМХ углепластика марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200

Свойства	Углепластик марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200	Углепластик марки ВКУ-39
Предел прочности при растяжении при 20°C, МПа (ASTM D3039)	<u>1020</u> 990÷1070	<u>780</u> 750÷800
Модуль упругости при растяжении при 20°C, ГПа (ASTM D3039)	<u>70</u> 68÷73	<u>65</u> 64÷68
Предел прочности при сжатии при 20°C, ГПа (ASTM D6641)	<u>750</u> 720÷790	<u>720</u> 680÷780
Модуль упругости при сжатии при 20°C, ГПа (ASTM D6641)	<u>60</u> 55÷63	<u>54</u> 52÷58
Предел прочности при межслоевом сдвиге при 20°C, МПа (ASTM D2344)	<u>67</u> 65÷70	<u>73</u> 67÷78

Также в ФГУП «ВИАМ» проводится работа по разработке материала, который будет применяться при изготовлении рабочей лопасти вентилятора перспективного двигателя ПД-35. В мире существует две основные технологии производства РЛВ: 1) препреговая технология; 2) пропитка 3D объемно-армированной преформы. В данной статье остановимся только на работе, проводимой в ФГУП «ВИАМ», по разработке препрега для РЛВ.

Препреговая технология позволяет за счет варьирования ориентации слоев при выкладке улучшить деформируемость материала, а в самой лопасти увеличить сопротивляемость изгибающему моменту и способность к адаптиванию при нагружении газовыми и центробежными силами. РЛВ должна быть стойкой к ударным и эрозионным воздействиям.

Чтобы удовлетворить требованиям, предъявляемым к РЛВ, основное внимание в работе уделяется вопросу разработки высокодеформативного связующего. Мировыми тенденциями развития в области создания эпоксидных связующих для получения полимерных композиционных материалов конструкционного назначения с повышенными эксплуатационными характеристиками является повышение трещиностойкости и вязкости разрушения полимерной матрицы за счет

использования в качестве модифицирующих термопластичных добавок и пластификаторов.

Были исследованы ФМХ шести вариантов экспериментальных составов отвержденного эпоксидного связующего: прочность при растяжении по ГОСТ 11262, прочность при изгибе по ГОСТ 4648, вязкость разрушения по ASTM D5045, а также плотность отвержденных образцов связующего (таблица 7).

Таблица 7

ФМХ характеристики отвержденных экспериментальных образцов эпоксидного связующего

Свойства	Комп. 1	Комп. 2	Комп. 3	Комп. 4	Комп. 5	Комп. 6	Требования ТЗ (среднее значение)
Плотность, г/см ³	<u>1,3</u> 1,30-1,31	-	-	-	<u>1,23</u> 1,23-1,24	<u>1,26</u> 1,25-1,26	1,25 – 1,45
Прочность при растяжении при 20 °С, МПа	<u>78</u> 74 - 82	-	-	-	<u>86</u> 80 - 92	<u>93</u> 88 - 98	≥ 100
Удлинение при растяжении 20 °С, %	<u>3,0</u> 2,9 - 3,3	-	-	-	<u>3,4</u> 3,1 - 3,8	<u>3,4</u> 3,1 - 3,6	3,5 – 5,0
Модуль упругости при растяжении 20 °С, ГПа,	<u>3,5</u> 3,4 - 3,5	-	-	-	<u>3,6</u> 3,5 - 3,8	<u>3,8</u> 3,6 - 3,8	≥ 4
Прочность при статическом изгибе отвержденных отливок связующего при температуре 20°С, МПа	<u>135</u> 127 -150	<u>113</u> 108 - 120	<u>101</u> 88 - 118	<u>92</u> 81 - 114	<u>140</u> 126 - 152	<u>153</u> 142-173	≥ 150
Модуль упругости при изгибе при 20 °С, ГПа	<u>3,5</u> 3,5 - 3,6	<u>3,6</u> 3,3 - 3,9	<u>4,5</u> 4,4 - 4,7	<u>2,8</u> 2,6 - 2,9	<u>3,7</u> 3,6 - 3,9	<u>3,7</u> 3,6-3,9	-
Вязкость разрушения при температуре 20°С, Дж/м ²	<u>910</u> 810 - 1020	-	-	-	<u>700</u> 580- 830	<u>1480</u> 1290- 1800	не менее 950
Коэффициент интенсивности напряжения при температуре 20°С, МПа·м ^{1/2}	<u>1,5</u> 1,5-1,6	-	-	-	<u>1,3</u> 1,2-1,3	<u>2,4</u> 2,2-2,9	-

Установлено, что механические характеристики образцов экспериментальных составов связующих № 1-5 не удовлетворяют требованиям ТЗ.

Поскольку прочность при изгибе образцов экспериментальных составов связующих № 2, 3 и 4 составила менее 80% от требования ТЗ,

прочность, модуль упругости, удлинение при растяжении и вязкость разрушения этих образцов не определялись.

Образец экспериментального состава связующего № 6 в отвержденном состоянии имеет при 20°C прочность при статическом изгибе и вязкость разрушения, удовлетворяющие требованиям ТЗ. Однако прочность, удлинение и модуль упругости при растяжении отвержденных образцов связующего также не соответствует требованиям ТЗ.

Заключение

Исследованы ФМХ углепластиков марок ВКУ-25/УМТ49, ВКУ-29/УМТ49.200, ВКУ-39/УМТ40.200 на основе связующего ВСЭ-1212 и углеродных наполнителей производства ООО «Алабуга-Волокно». Установлено, по значения ФМХ разрабатываемых углепластиков на российских наполнителях находятся ниже значений ФМХ аналогов – углепластиков марок ВКУ-25, ВКУ-29, ВКУ-39 на основе связующего ВСЭ-1212 и углеродных наполнителей фирм «Porcher Ind.» и «Toho Tenax» (Япония). Технология изготовления данных препрегов углепластиков будет отработана, что увеличит их ФМХ и уменьшит разброс свойств.

Исследования показали, что значения основных физико-механических характеристик образцов углепластиков марок ВКУ-25/СУТ49(С), ВКУ-29/ВТкУ-3 и ВКУ-39/ВТкУ-2.200 на основе углеродных наполнителей производства КНР стабильны и находятся на уровне и по некоторым характеристикам превосходят свойства аналогов – углепластиков ВКУ-25, ВКУ-29, ВКУ-39.

Работа по оптимизации состава эпоксидного связующего с повышенной ударной вязкостью и удлинением при разрыве, которое будет применяться при производстве РЛВ будет продолжена.

Литература

1. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии, 2015. №1. С. 36–39.

2. Каблов Е.Н. Материалы – основа любого дела // Деловая слава России, 2013. №2 (40). С.4–9.

3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1. С. 3-33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

4. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы - основа экономического и научно-технического развития России //Вопросы материаловедения. 2006. № 1. С. 64-67.

5. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. № 3. С. 10–15.

УДК 678.86

Применение гибридных композиционных материалов в конструкции кронштейнов

Павлов А.А.¹; Павлова С.А.¹

alex-alex.pavlov@yandex.ru, pavlova-sva@yandex.ru

¹*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»*

Аннотация:

Статья посвящена вопросам одновременного учета внутренней структуры конструкции кронштейна, анизотропии механических свойств гибридного композиционного материала и технологии изготовления на ранних стадиях проектирования.

Ключевые слова:

кронштейн, гибридные композиционные материалы, рациональное проектирование, конструктивно-технологические группы.

Введение

Поиск путей обеспечения минимальной массы элементов планера самолета является одним из приоритетных направлений развития современной авиационной техники. Минимальный вес конструкции и ее достаточная прочность могут быть достигнуты при одновременном учете материала изделия, технологии его изготовления и оптимальности конструктивно-силовой схемы на ранних стадиях проектирования.

Задачи по передаче сосредоточенных усилий на регулярную зону агрегатов и узлов конструкции выполняют кронштейны навески [1]. Этот вид

конструкций является особо трудным в проектировании. Находясь в тесном взаимодействии с элементами конструктивно-силовой схемы агрегатов и узлов, кронштейн подвергается сложному напряженно-деформированному состоянию в процессе работы. Как следствие, это вызывает сложности при поиске рациональной конструкции кронштейна минимальной массы, и прогнозировании требуемого запаса прочности.

Одним из инструментов повышения весовой эффективности конструкций кронштейнов является замена традиционных металлических сплавов на полимерные композиционные материалы. Эти материалы, как правило, образованы композицией наполнителя из высокопрочных волокон и полимерной матрицей [2].

В данной работе рассматривается опыт лаборатории композиционных материалов и конструкций Самарского университета в проектировании конструкции кронштейна из гибридного композиционного материалов. Особенность данного материала заключается в том, что в нем используются наполнители, отличающиеся по форме и типу [3]. Варьирование параметрами наполнителя позволяет изменять местную жесткость внутри детали. Это, в свою очередь, позволяет эффективно перенаправлять потоки усилий, не прибегая к организации дополнительных усилений и увеличению массы всей конструкции.

Однако, применение гибридного композиционного материала требует учета внутренней структуры и технологии производства, что существенно усложняет задачу проектирования. Разработанная методика проектирования конструкций кронштейнов предполагает комплексное решение задач концептуального и оптимального проектирования с учетом технологических особенностей производства изделий из гибридных композиционных материалов.

Методы исследования

Поиск рациональной конструкции кронштейна проводился в несколько этапов. На стадии концептуального проектирования осуществлялся выбор

конструктивно-силовой схемы кронштейна, которая должна обеспечивать наиболее эффективную силовую работу конструкции. Данный этап также включал в себя выбор структуры армирования конструкции и проработку технологических аспектов, связанных с использованием гибридного композиционного материала.

Оптимальность выбранной силовой схемы в существенной мере определяет степень весового совершенства конструкции. Сравнение возможных вариантов конструктивного исполнения кронштейна навески проводилось с учетом габаритных размеров области поиска и условий нагружения. Материал анализируемых моделей задавался изотропным. Данное допущение вводилось с целью упрощения процесса моделирования, но при этом позволило определить принципиальную схему конструкции. В качестве критерия оптимальности выбранного решения использовался безразмерный коэффициент весовой эффективности. Он определяется как отношение характерной нагрузки, действующей на конструкцию, к характерному размеру [4]. Особенность данного критерия состоит в том, что он позволяет поставить в соответствие каждой силовой схеме определенное число. Чем меньше значение этого коэффициента, тем выгоднее силовая схема. Таким образом, по результатам данного этапа были получены внешние обводы кронштейна и его конструктивно-силовая схема в первом приближении.

Уточнение выбранной схемы осуществлялось с помощью SIMP-метода (Solid Isotropic Material with Penalization). Согласно данному подходу, для конкретной континуальной модели вводится степенная зависимость матрицы жесткости от плотности материала [5]. Задание той или иной зависимости модуля упругости от плотности, означает использование соответствующей модели материала, интерполирующей его свойства для промежуточных плотностей. Применительно к поиску силовой схемы конструкции из гибридного композиционного материала, SIMP-метод позволил определить форму вырезов в конструкции будущей детали (рис. 1).

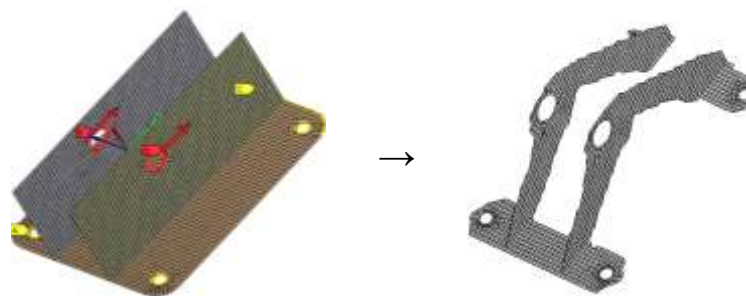


Рис. 1 – Результаты топологической оптимизации конструкции

Полученная силовая схема определяет только внешний облик кронштейна и служит основой для решения задачи оптимизации конструкции по условиям минимума массы и достаточной прочности. Кроме того, на основе полученной конструктивно-силовой схемы конструкции формируется схема конструктивно-технологического членения будущего кронштейна.

Учет технологических особенностей производства деталей из гибридного композиционного материала на стадии концептуального проектирования осуществлялся путем создания схемы конструктивно-технологического членения. Она состоит из отдельных конструктивно-технологических групп. Объединение в группы происходит по следующим признакам:

- одинаковый тип наполнителя;
- подобие или идентичность формы развертки конструктивно-технологической группы.

При этом конструктивно-технологическое членение должно обеспечивать:

- минимальное количество конструктивно-технологических групп;
- возможность пошаговой сборки преформы;
- совместность силовой работы контактирующих конструктивно-технологических групп.

Требование совместности силовой работы обуславливает формирование конструктивно-технологического членения на стадии концептуальной проработки детали.

В дальнейшем на стадии оптимального проектирования для каждой конструктивно-технологической группы выбирается оптимальная схема армирования и количество слоев с учетом требований прочности и минимума массы конечного изделия.

Построение и тестирование оптимизационной модели производилось на основе методики, изложенной в [6]. Стадия оптимального проектирования включает выбор целевой функции, минимальное значение которой требуется найти, определение проектных переменных, а также формирование параметрических и функциональных ограничений. В данной работе поиск оптимального проекта осуществлялся с использованием генетического алгоритма оптимизации [7].

На заключительном этапе разработки конструкции кронштейна формировалась конструкторская и технологическая документация, в соответствии с которой изготавливался опытный образец изделия. Верификация математической модели кронштейна и опытного образца проводилась путем проведения статических испытаний кронштейна в условиях, достоверно моделирующих рассматриваемый случай нагружения.

Экспериментальные исследования

Достоверность конечного результата проектирования во много зависит от исходных данных – механических характеристик материала. Рассматриваемый гибридный композиционный материал представляет собой комбинацию непрерывно и дискретно армированного углепластика. В качестве непрерывного наполнителя для рассматриваемого материала выступает углеродная ткань CC201. Композиция этой ткани с эпоксидной системой SR8100/SD8824 образует слоистый углепластик, изготавливаемый методом вакуумной инфузии. Механические характеристики углепластика CC201/SR8100-SD8824 были получены путем проведения комплексных испытаний образцов материала с использованием универсальной сервогидравлической машины MTS 322.2. Результаты испытаний представлены в Таблице 1.

Механические свойства углепластика CC201/SR8100-SD8824

Характеристика	Размерность	Значение	Методы испытаний
Продольный модуль упругости, E_{11}	МПа	56720	ASTM D 3039
Поперечный модуль упругости, E_{22}	МПа	56720	ASTM D 3039
Модуль упругости, при межслоевом растяжении E_{33}	МПа	8500	[8]
Модуль сдвига, G_{12}	МПа	37880	ASTM D 3518
Модуль сдвига, G_{13}	МПа	2700	ASTM D 2344
Модуль сдвига, G_{23}	МПа	2700	ASTM D 2344
Коэффициент Пуассона, ν_{12}	-	0,3	ASTM D 3039
Предельное напряжение при растяжении вдоль основы, $[\sigma_{11}]$	МПа	640	ASTM D 3039
Предельное напряжение при растяжении вдоль утка, $[\sigma_{22}]$	МПа	640	ASTM D 3039
Предельное напряжение при межслоевом растяжении, $[\sigma_{33}]$	МПа	30	ASTM D 6415
Предел прочности на смятие при нагружении в направлении 45°	МПа	110	[9]
Предельное сдвиговое напряжение, τ_{12}	МПа	120	ASTM D 3518
Предельное сдвиговое напряжение, τ_{13}	МПа	13,6	ASTM D 2344
Предельное сдвиговое напряжение, τ_{23}	МПа	13,6	ASTM D 2344
Толщина монослоя, t	мм	0,225	-
Плотность	кг/м ³	1451	-

Дискретно армированный наполнитель образован путем нарезки волокон марки T1000 с шагом 0,3 мм. Армирование эпоксидной системы SR8100/SD8824 9% этого наполнителя при постоянном перемешивании в вакуумной среде образует материал, физико-механические свойства которого представлены в Таблице 2.

Механические характеристики коротко-армированного углепластика

Характеристика	Размерность	Значение	Стандарт испытаний
Модуль упругости, E	МПа	4000	ASTM D 3039
Предел прочности, $[\sigma]$	МПа	30	ASTM D 3039
Плотность	кг/м ³	1300	-

Данные, представленные в таблицах 1 и 2, использовались для прогнозирования статической прочности и массы конструкции кронштейна на этапе оптимального проектирования.

Исходя из результатов концептуального проектирования, кронштейн навески был разделен на шесть конструктивно-технологических групп (рис. 2). Группы под номерами 1, 2, 3, 4, 6 формируют основные плоскости кронштейна с учетом вырезов – плоскость проушин и подошву. Они изготавливаются из слоистого углепластика. Конструктивно-технологическая группа номер пять представляет собой закладной элемент в зоне радиального перехода между проушинами и подошвой, которая в дальнейшем изготавливалась из коротко-армированного композиционного материала.

Проведенные ранее исследования показали, что использование «чистой» эпоксидной смолы или пенопласта, пропитанного связующим, в качестве закладного элемента приводит к хрупкому разрушению переходной зоны вследствие расслоения. В данном случае коротко-армированный композиционный материал, не смотря на низкие характеристики прочности, позволил обеспечить хорошую адгезию всех конструктивно-технологических групп и совместную работу компонентов гибридного композиционного материала.

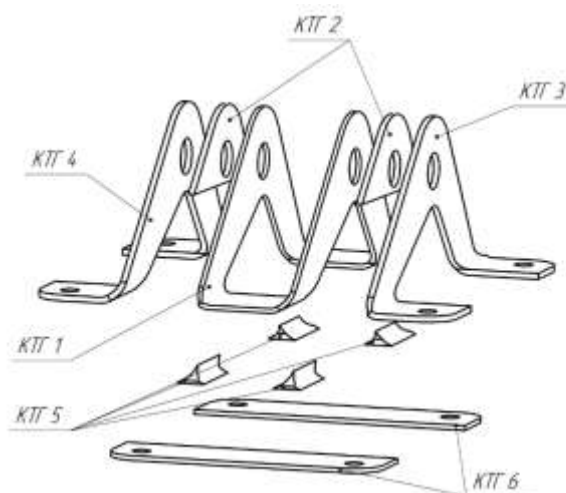


Рис. 2 – Схема конструктивно-технологического членения

Оптимизация структуры и геометрических параметров кронштейна проводилась с целью получения конструкции минимальной массы с учетом условий прочности компонентов гибридного композиционного материала. В результате, совокупность проектных переменных позволила получить модель конструкции, теоретическая масса которой составила 52,25 грамм при габаритных размерах кронштейна 120×100×65 мм.

Изготовление заготовки опытного образца кронштейна навески осуществлялась методом вакуумной инфузии с использованием специально разработанной технологической оснастки. При этом обеспечивалось одновременное отверждение полимерной матрицы непрерывного и дискретного компонентов гибридного композиционного материала. Полимеризация заготовки производилась при температуре 30°С в течение 6 часов. После изъятия заготовки из технологической оснастки проводилась механическая обработка вырезов и отверстий в кронштейне. Обработка производилась по шаблонам конструктивно-технологических групп с использованием инструментов с алмазным напылением при обильном применении охлаждающей жидкости. На заключительном этапе производилось клеивание металлических втулок в проушины для повышения их контактной прочности в процессе испытаний. Масса готового кронштейна составила 53,25 г (рис. 3).



Рис. 3 – Опытный образец кронштейна

Статические испытания кронштейна навески проводились в соответствии со схемой нагружения. Для закрепления и нагружения кронштейна использовалась специально разработанная испытательная оснастка и универсальная серво-гидравлическая испытательная машина MTS-322.2. максимально приблизить условия испытаний к расчетной схеме и математической модели кронштейна. Крепление кронштейна к испытательной оснастке осуществлялось при помощи болтовых соединений. Усилие на проушины кронштейна приводилось при помощи нагружающего элемента, закрепленного в механических захватах. Общий вид испытательного стенда показан на рис. 4.



Рис. 4 – Общий вид испытательного стенда

В процессе испытаний скорость перемещения штока гидравлического цилиндра испытательной машины составляла 2 мм/мин. На рис. 5 представлен график нагружения опытного образца кронштейна.

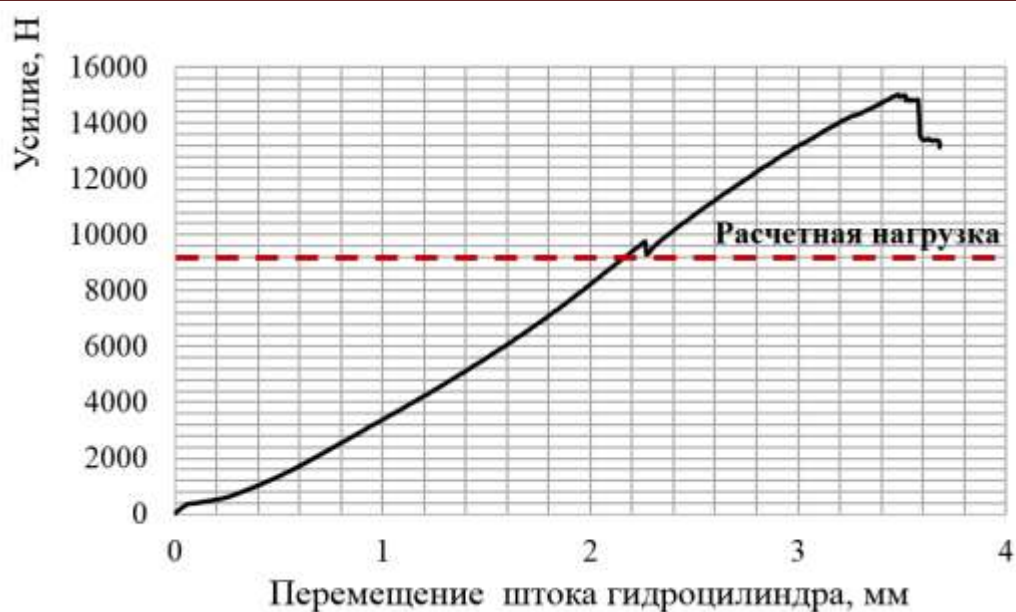


Рис. 5 – График нагружения кронштейна

В процессе испытания разрушение кронштейна произошло в области перехода между проушинами и подошвой вследствие расслоения, что привело лишь к частичной потере устойчивости. Разрушающее усилие превысило расчетную нагрузку на 2%. Полное разрушение конструкции под действием статической нагрузки произошло по расслоению и межслоевому сдвигу в области нижней части подошвы. Разница между усилиями в начальный момент разрушения и в момент полного разрушения составляет 35%. Этот показатель свидетельствует о запасе несущей способности конструкции после возникновения первых признаков разрушения, а также свидетельствует о безопасности разрушения.

Выводы

Рассмотренная методика проектирования конструкций кронштейнов из гибридных композиционных материалов показывает, что этот подход позволяет учитывать технологические особенности составного материала на нескольких уровнях. На концептуальном уровне разбиение конструкции на конструктивно-технологические группы позволяет выделить необходимые компоненты гибридного композиционного материала и определяет дальнейшую реализацию на этапе производства. Также на этапе оптимального проектирования конструктивно-технологические группы

служат основой для тщательной проработки конструкции, обеспечивающей максимальную весовую эффективность.

Литература

1. Niu, Michael C.Y. Airframe Structural Design [Text] / Michael C.Y. Niu. - Hong Kong: CONMILIT PRESS LTD., 1988. - 612 p.
2. Васильев В.В. Композиционные материалы [Текст]: справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
3. Niu, Michael C.Y. Composite Airframe Structures [Text]: Michael Chun-Yung Niu. – Conmilit Press Ltd, 1992. – 686 p.
4. Комаров, В. А. Прогнозирование и контроль массы авиационных конструкций с использованием критерия силовой фактор/ В.А. Комаров, А.В. Гуменюк // Общероссийский научно-технический журнал "Полет", 2003 (№6). – с. 24-30.
5. Bendsoe, M.P. Topology Optimization: Theory, Methods and Applications [Text]: M.P. Bendsoe, O. Sigmund.– New York: Springer, 2003.– 271 p.
6. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов [Текст]: К. Бате, Е. Вильсон. – М.: Стойиздат, 1982. – 447 с.
7. Батищев, Д.И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач [Текст]: Д.И. Батищев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 1995. – 69 с.
8. Комаров, В.А. Межслоевая прочность и жесткость слоистых композиционных материалов [Текст] / В.А. Комаров, А.А. Павлов, С.А. Павлова, Р.В. Чарквиани // сборник статей 6-й Российско-германской конференции «Электронные двигатели: их применение в космосе и перспективы развития». – Самарский университет, Самара, 2016. – 6 с.
9. Комаров, В.А. Расчетно-экспериментальный анализ прочности изделий из тканево-эпоксидного углепластика [Текст]: В.А. Комаров, Р.В. Чарквиани, Е.А. Кишов. – Вестник СГАУ, 2015. – 6 с.

Клеевые связующие для полимерных и слоистых алюмополимерных композиционных материалов

Петрова А.П., д.т.н.¹; Лукина Н.Ф., к.т.н.¹; Котова Е.В.¹

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

Аннотация:

Приведены клеящие и реологические свойства клеевых связующих, температурные диапазоны их переработки, физико-механические характеристики отвержденных клеевых связующих по показателям, принятым при испытании ПКМ.

Ключевые слова:

связующие, клеевое связующее, клеевой препрег, прочность клеевых соединений, реологические свойства, физико-механические свойства, технология переработки в ПКМ.

Введение

Связующее (полимерная матрица) является важнейшим компонентом ПКМ, определяющим его технологические и эксплуатационные характеристики. Благодаря связующему, в процессе получения ПКМ фиксируется форма конечного изделия, поэтому свойства связующего определяют способ получения препрега и в значительной степени свойства получаемого с его использованием ПКМ.

В ФГУП «ВИАМ» впервые в отечественной практике получило развитие научное направление по созданию клеевых связующих на

эпоксидной основе, сочетающих реологические свойства традиционных связующих и тепло-прочностные характеристики клеящих материалов. Клеевые связующие используются для получения препрегов, которые применяются при изготовлении деталей и агрегатов из ПКМ слоистой и сотовой конструкции [1-3]. Отличительная особенность таких связующих – длительные сроки хранения, что позволяет квалифицировать клеевые препреги, изготовленные на их основе, как долгоживущие полимерные композиционные материалы.

В настоящее время разработан значительный ассортимент клеевых связующих расплавного типа на основе эпоксидных олигомеров под общей маркой ВСК, различающихся вязко-упругими, адгезионными, деформационными и температурными характеристиками.

В работе принимали участие Дементьева Л.А., Беседнов К.Л. Мельников Д.А.

Клеевые связующие представляют собой однородную пластичную массу. Их характерной особенностью является невысокое содержание летучих продуктов, не более 2,0% масс. Температура стеклования связующих составляет от 140 до 205°С в зависимости от состава.

В данной работе рассмотрены адгезионные, тепло-прочностные и реологические свойства клеевых связующих.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 15.1: Многофункциональные клеящие системы («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).[1]

Объекты и методы исследования

Были исследованы прочностные, термомеханические и реологические характеристики клеевых связующих, отличающихся вязкостью расплава, температурой отверждения и теплопрочностными характеристиками.

Прочностные характеристики клеевых соединений при сдвиге определяли с применением образцов из алюминиевого сплава Д16-АТ,

поверхность которых была подвергнута анодированию в хромовой кислоте. Отверждение проводили при температуре, рекомендуемой для конкретной марки связующего.

Реологические характеристики определяли согласно ISO 6721-10 с помощью реометра, например, марки Physica фирмы «Anton Paar» модели MCR 302 в режиме контролируемого напряжения, равного 2 Па, при постоянной частоте 1,6 Гц в рабочем узле плита-плита диаметром 50 мм и величине зазора 0,6 мм.

Прочностные свойства клеевых соединений на основе исследуемых клеевых связующих приведены в таблице 1.

Таблица 1

Прочностные характеристики клеевых соединений на основе клеевых связующих (склеиваемый материал – алюминиевый сплав Д16-АТ Ан. Окс. хром.)

Связующее	ТУ	τ_b , МПа (не менее) при температуре испытания, °С						Температура отверждения, °С
		20	80	120	150	170	180	
ВСК-14-1	ТУ 1-595-14-1034-20008	19,6	19,6	-	-	-	-	125
ВСК-14-1с	То же	19,6	19,6	-	-	-	-	140
ВСК-14-2	То же	34,4	-	-	17,6	-	-	175
ВСК-14-2м	ТУ 1-595-14-1034-2008	19,6	-	-	19,6	-	-	175
ВСК-14-2мР	ТУ 1-595-12-1475-2014	20,0	-	20,0	-	-	-	175
ВСК-14-3	ТУ 1-595-14-1200-2011	14,7	-	-	14,7	-	-	175
ВСК-14-4	ТУ 1-595-14-1034-2008	17,6	-	-	-	17,6	-	175
ВСК-14-4м	То же	17,6	-	-	-	17,6	-	175
ВСК-14-5м		17,6	-	-	17,6	-	-	155
ВСК-14-6		24,0	17,0	-	-	-	-	130
ВСК-50	ТУ 1-595-11-1691-2017	20,0					18	175

Образцы для механических испытаний изготавливали методом заливки связующих в формы с последующим отверждением и разрезанием отвержденных блоков для получения образцов нужной толщины [4–6]. Испытания проводили с использованием образцов в форме лопаток в соответствии с ГОСТ 11262 с шириной рабочей зоны 10 мм.

Известно, что достоверность результатов механических испытаний материалов зависит, в том числе от способа наработки образцов, который, как правило, определяет их качество. К настоящему времени наработку образцов для механических испытаний материалов на основе связующих осуществляют в основном двумя способами: заливкой в открытые или закрытые ячейки форм, имеющих размеры и форму образца, а также механической обработкой из предварительно отвержденных заготовок. Определяющими свойствами для связующего при изготовлении образцов для механических испытаний являются: вязкость и температура при заливке, время нарастания вязкости до потери текучести, наличие в составе деаэраторов, температурный режим отверждения. Чем ниже вязкость связующего и чем медленнее она нарастает во времени, тем проще получить более качественные образцы для механических испытаний. Так, при изготовлении образцов для механических испытаний из низковязких связующих, обычно предназначенных для переработки методами RTM, VaRTM, полтрузией, ручным формованием и т. д., используют закрытые составные формы, в которых заливка осуществляется по методу сообщающихся сосудов. Таким образом, удается получать качественные образцы без использования дополнительных технологических приемов. Однако, современные клеевые связующие расплавно-го типа обладают достаточно высокой вязкостью расплава и ограниченным временем нарастания вязкости до потери текучести при температуре заливки, вследствие чего получение качественных образцов из клеевых связующих для механических испытаний представляет из себя нетривиальную задачу, для решения которой были взяты подходы, изложенные в работе [7].

Для уменьшения количества дефектов в образцах от попадания пузырьков воздуха, связующие предварительно выдерживали под вакуумом в условиях, когда вязкость минимальна, на протяжении необходимого для деаэрации времени. Данные режимы были подобраны с учетом химических и реологических свойств каждой композиции. Затем проводилась заливка

клеевых связующих в специальную блок-форму и отверждение по предварительно подобранным температурно-временным режимам, учитывающим масштабный фактор. Подробно способы подбора режимов были изложены в работе [8].

Реологические характеристики клеевых связующих определяли согласно ISO 6721-10 с помощью реометра марки Phisica фирмы «Anton Paar» в режиме осцилляции при напряжении сдвига 2 Па с частотой 1,6 Гц в рабочем узле плита-плита [9–11].

Образец клеевого связующего перед испытанием подвергали предварительному нагреву до заданной температуры и выдерживали 10 минут до достижения температурного равновесия [11–12.]

Определение кажущейся вязкости проводили на вискозиметре Brookfield CAP 2000+ в рабочем узле конус-плита по ГОСТ 25276-82 при скорости сдвига 5 с^{-1} .

Температуру стеклования отвержденных клеевых связующих определяли методами ДМА, ТМА и ДСК на модульном термо-аналитическом оборудовании немецкой фирмы Netzsch.

Результаты и обсуждение

Были исследованы динамическая вязкость, термомеханические характеристики и теплостойкость некоторых клеевых связующих.

Результаты измерений температуры стеклования по ASTM E1640, ASTM E1356, ASTM E1545 образцов отвержденных связующих методами ДСК, ТМА, ДМА, приведены на рисунках 1-3 и в таблице 2.

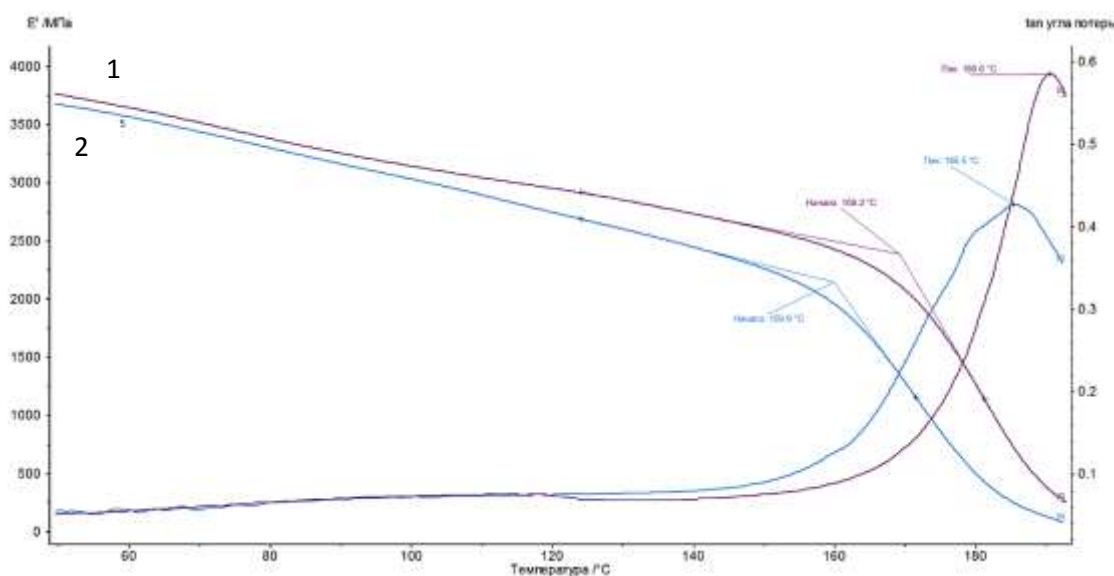


Рис. 1 – Температура стеклования отвержденного связующего, определенная методом ДМА: 1 – ВСК-14-2м, 2 – ВСК-14-2мР

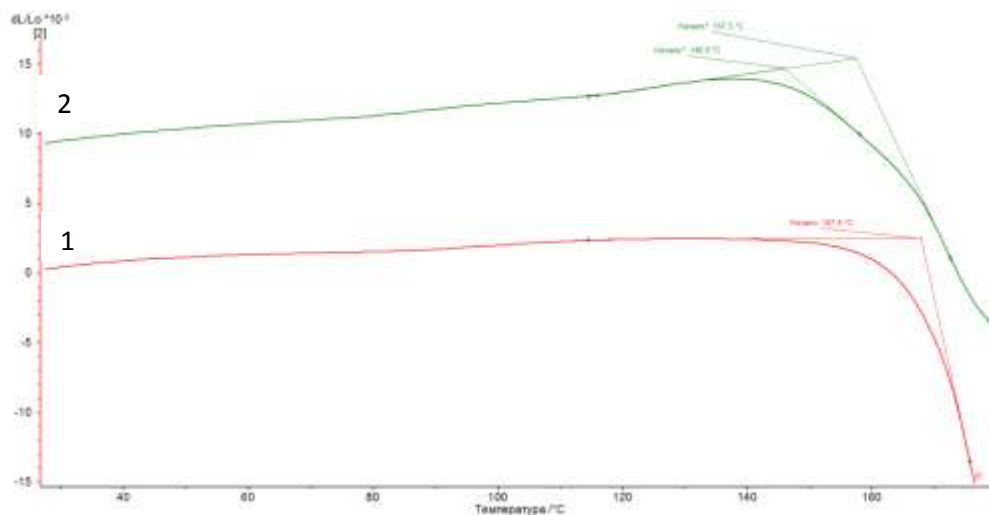


Рис. 2 – Температура стеклования отвержденного связующего, определенная методом ТМА, 1 – ВСК-14-2м, 2 – ВСК-14-2мР

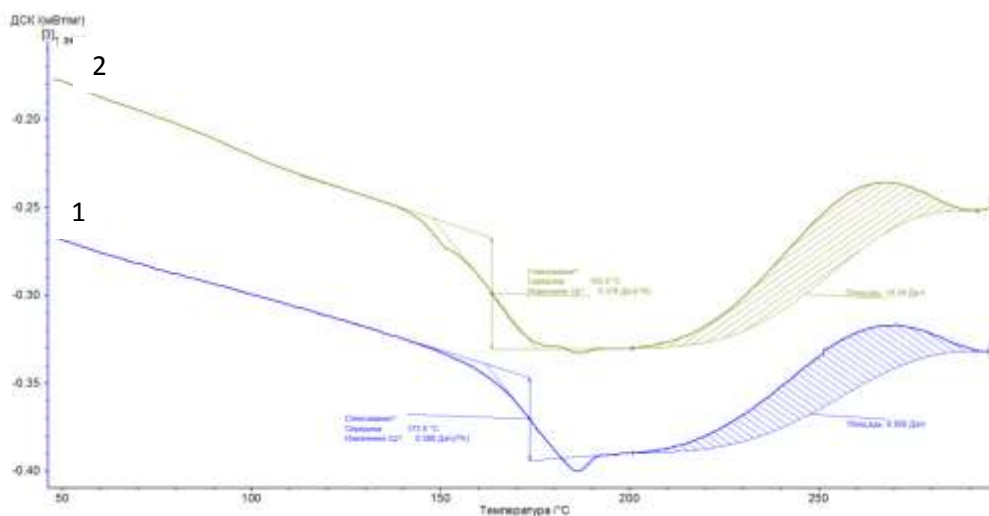


Рис. 3 – Температура стеклования отвержденного связующего, определенная методом ДСК: 1 – ВСК-14-2м, 2 – ВСК-14-2мР

Были исследованы физико-механические характеристики отвержденных клеевых связующих, которые определяют при испытаниях ПКМ. Исследования проведены для трех вариантов связующих, различающихся вязкостью расплава – ВСК-14-2м, ВСК-14-2мР, и ВСК-50. Определены следующие прочностные характеристики образцов отвержденных связующих: прочность при растяжении по ГОСТ 11262, прочность при изгибе ГОСТ 4648, Результаты определения физико-механических и термомеханических характеристик некоторых отвержденных связующих приведены в таблице 2.

Таблица 2

Физико-механические характеристики отвержденных связующих

Свойства	Связующее		
	ВСК-14-2м	ВСК-14-2мР	ВСК-50
Прочность при растяжении при 20°C, МПа	$\frac{92}{88-98}$	$\frac{86}{80-92}$	$\frac{87}{82-92}$
Удлинение при растяжении при 20°C, %	$\frac{3,3}{3,1-3,6}$	$\frac{3,4}{3,1-3,8}$	$\frac{3,0}{2,7-3,3}$
Модуль упругости при растяжении при 20°C, ГПа	$\frac{3,7}{3,6-3,8}$	$\frac{3,6}{3,5-3,8}$	$\frac{3,8}{3,6-3,9}$
Прочность при изгибе при 20°C, МПа	$\frac{165}{158-173}$	$\frac{140}{126-152}$	$\frac{155}{150-160}$
Модуль упругости при изгибе при 20°C, ГПа	$\frac{3,8}{3,7-3,8}$	$\frac{3,7}{3,6-3,9}$	$\frac{4,0}{4,0-4,0}$
Вязкость разрушения связующего, Дж/м ²	1800	650	-
Температура стеклования, °C:			
метод ДМА -	170	160	155
метод ТМА -	167	168	
метод ДСК -	174	164	
Примечание: в числителе указаны средние значения, в знаменателе – минимальные и максимальные.			

Из данных, приведенных в таблице 2, следует, что по физико-механическим характеристикам, таким как прочность при растяжении, удлинение при растяжении, модуль упругости при растяжении и изгибе связующие находятся примерно на одном уровне, однако по вязкости разрушения связующее ВСК-14-2м существенно превосходит связующее ВСК14-2мР, температура стеклования этого связующего также выше.

Проведены исследования кажущейся вязкости сразу после изготовления при температуре $(100 \pm 1)^\circ\text{C}$ и времени гелеобразования клеевых связующих ВСК-14-2м, ВСК-14-2мР и ВСК-50, результаты испытаний приведены в таблице 3. Результаты испытаний, представленные в таблице 3, показывают возможность дальнейшей переработки экспериментальных образцов связующих в препреги.

Таблица 3

Образец	Время гелеобразования при 125°C , мин	Время гелеобразования при 145°C , мин	Условная вязкость по Брукфильду при температуре 100°C , Па·с
ВСК14-2м	-	120	182,0
ВСК14-2мР	121	-	29,0
ВСК-50			53,0

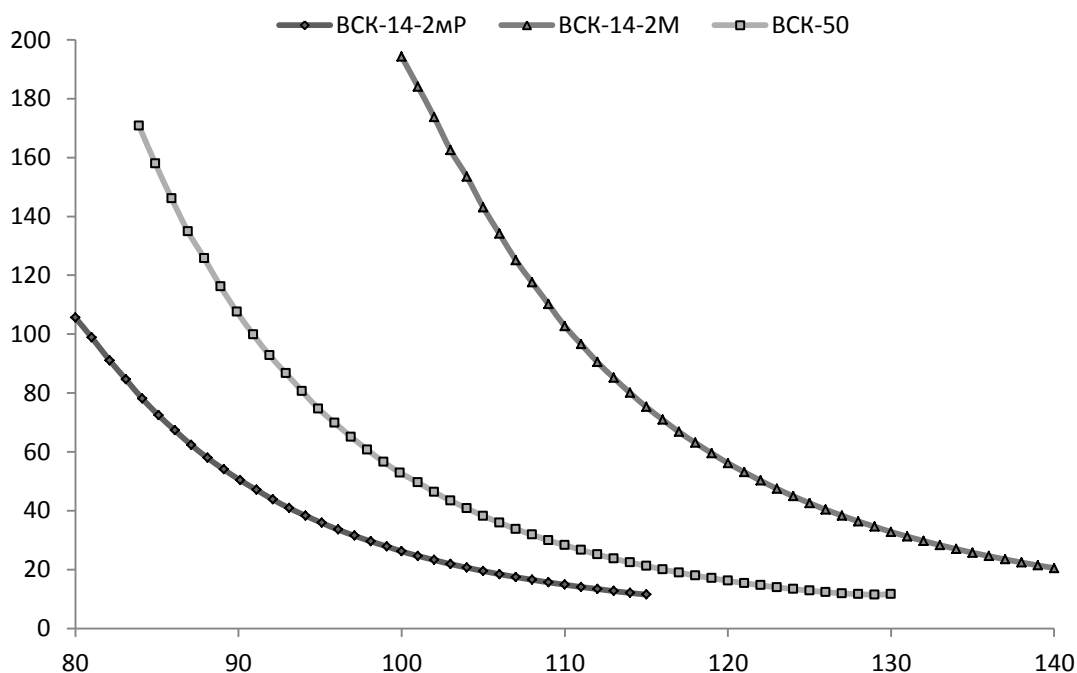


Рис. 5 – Зависимость динамической вязкости клеевых связующих ВСК-14-2м, ВСК-14-2мР и ВСК-50 от температуры

На рис. 5 представлены данные, характеризующие зависимость динамической вязкости клеевых связующих ВСК-14-2м, ВСК-14-2мР и ВСК-50 от температуры. Из этих данных следует, что связующие ВСК-14-2м и ВСК-14-2мР существенно различаются по вязкости.

Динамическая вязкость клеевого связующего ВСК-14-2м изменяется в пределах: от 194 Па·с при температуре 100°C до 21 Па·с при температуре 140°C. У клеевого связующего ВСК-14-2мР динамическая вязкость изменяется от 99 Па·с при температуре 80°C до 11,5 Па·с при температуре 120°C. Для некоторых партий связующего ВСК-14-2м (с учетом большого набора статистических данных) вязкость при температуре 120°C достигала 80–130 Па·с.

Показатель вязкости, необходимый для пропитки среднемодульного волокна, лежит в пределах от 70 до 100 Па·с. Связующее ВСК-14-2мР имеет значительно меньшую вязкость, поэтому оно будет лучше пропитывать наполнители при получении ПКМ. Учитывая высокую вязкость связующего ВСК-14-2м, оно может быть использовано для получения ПКМ способами автоклавного или прямого формования (допускается прессовое вакуумное формование), в то время как связующее ВСК-14-2мР может применяться для получения ПКМ по технологии RTM [14–17]. Благодаря отсутствию в составе связующего растворителя, давление прессования не превышает 0,6 МПа.

Благодаря положительным свойствам клеевых связующих, они нашли применение в составе целого ряда полимерных композиционных материалов. Назначение клеевых связующих приведено в табл.4.

Одним из важных применений клеевых связующих, представляющих практический интерес для авиастроения, является использование их для изготовления алюмополимерных композиционных материалов, известных под маркой СИАЛ. Они состоят из алюминиевых листов толщиной 0,3–0,5 мм и полимерного материала (стеклопластика), сформированного из двух-трех слоев препрега на стеклонаполнителе. В настоящее время разработан достаточно большой ассортимент таких материалов, различающихся типом входящих в их состав листов алюминиевого сплава, стеклопластика, количества листов и их взаимного расположения. Наиболее высокими характеристиками обладают СИАЛы на базе листов из

высокомодульного алюминиевого сплава 1441 и стеклопластика, в состав которого входят стеклоровинг марки РВМПН-10-400 и клеевое связующее ВСК-14-2мР [18]. Следует отметить, что клеевое связующее ВСК-14-2мР было разработано специально для пропитки стеклоровинга, поскольку он состоит из однонаправленных некрученых жгутов из стекла ВМП с линейной плотностью 400–1900 текс. Жгуты состоят из элементарных волокон толщиной 10 мкм, прочностью 4500-6000 МПа и модулем упругости 85 ГПа. Использование ровинга, в котором высокая плотность упаковки волокон, позволяет достичь максимальных прочностных характеристик ПКМ.

Обеспечение таких высоких характеристик стало возможным только в случае пропитки стеклоровинга клеевым связующим ВСК-14-2мР, обладающим пониженной динамической вязкостью, что позволяет осуществить качественную пропитку стеклоровинга в процессе изготовления клеевого препрега. Пониженная вязкость связующего ВСК-14-2мР позволяет наносить его на стеклоровинг с наносом, разброс которого составляет 1,5–2%, что обеспечивает стабильность показателей клеевого препрега на его основе и стеклопластика, отформованного из него [18].

Заключение

Таким образом, применение клеевых связующих позволяет получать детали из ПКМ, изготовленных с их применением, по менее трудоемкой технологии с обеспечением более высокого уровня свойств (трещиностойкости, прочности при межслоевом сдвиге, длительной прочности и др.). Связующее ВСК-50 по реологическим свойствам занимает промежуточное положение между связующими ВСК-14-2м и ВСК-14-2мР. Вязкость изменяется в пределах от 171 Па·с при температуре 84°С до 12 Па·с при температуре 130°С. Реологические свойства связующих можно регулировать путём подбора рецептурного состава. В зависимости от реологических свойств связующих при получении ПКМ с их использованием может быть применена определенная технология формования.

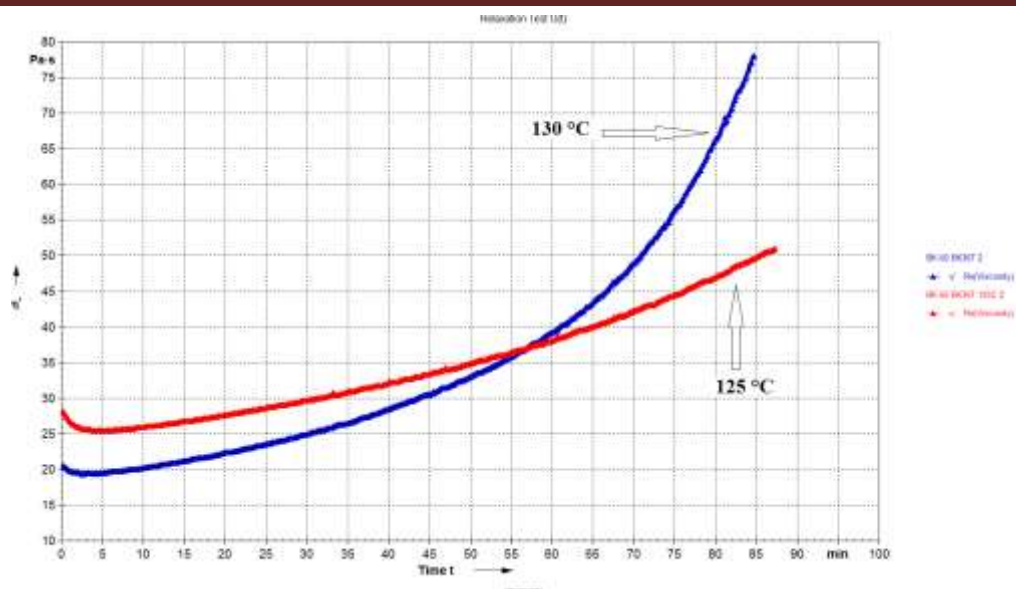


Рис. 6 – Зависимость вязкости от продолжительности выдержки при температурах 125°C и 130°C связующего ВСК-50

Приведенные на рисунке 6 данные показывают, что связующее ВСК-50 может быть использовано для пропитки наполнителей при температуре 125°C, при этом вязкость связующего изменяется незначительно в течение продолжительного времени.

Имеющийся длительный опыт эксплуатации конструкций авиационной техники, выполненных с применением ПКМ на основе клеевых препрегов, служит подтверждением высокого уровня свойств композиционных материалов на их основе.

Литература

1. Кириенко Т.А., Лукина Н. Ф., Куцевич К.Е., Петрова А.П. Исследование реологических свойств клеевых связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. №2. С. 6–8.
2. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Мельников Д.А., Беседнов К.Л., Павлюк Б. Ф. Исследование свойств отвержденных клеевых связующих // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2017. №10. С.49-55. DOI:10.18577/2307-6046-2017-0-10-6-6.

3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии, 2015. №1 (34). С. 3-33. DOI:10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

4. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии, 2001. № 1. С. 3–8. DOI:10.18577/2071-9140-2001-0-1-3-8.

5. Аниховская Л.И., Минаков В.Т. Клеи и клеевые препреги для перспективных изделий авиакосмической техники // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС - ВИАМ. 2002. С. 315–326.

6. Кириенко Т.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Петрова А. П. Исследование реологических свойств клеевых связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. №2. С. 6–8.

7. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Лукина Н.Ф., Петрова А.П. Исследование эпоксидно-полисульфоновых полимерных систем как основы высокопрочных клеев авиационного назначения // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. № 3. С. 7–12.

8. Дементьева Л.А., Куцевич К.Е., Лукина Н.Ф., Петрова А.П. Исследование клеевых связующих для получения полимерных композиционных материалов // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. №2 (20) С. 24-35. URL: [http://www. materialsnews.ru](http://www.materialsnews.ru) (дата обращения 02.08.2017).

9. Мельников Д.А., Громова А.А., Раскутин А.Е., Курносков А.О. Теоретический расчет и экспериментальное определение модуля упругости и прочности стеклопластика ВПС-53/120 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2017. №1. Ст. 8. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 08.03.2017). DOI 10.18577/2307-6046-2017-0-1-8-8.

10. Хасков М.А., Мельников Д.А., Дементьева Л.А. Оптимизация режимов отверждения эпоксидных композиций с учетом масштабного

фактора// Сборник: Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России Сборник докладов II Международной научно-технической конференции (посвящается 85-летию со дня основания ФГУП «ВИАМ» - ведущего материаловедческого центра страны). 2017. С. 30.

11. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Кириенко Т.А., Чурсова Л.В. Клеевые связующие для деталей из ПКМ сотовой конструкции // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. №5. С. 12–16.

12. Kirienko T.A., Lukina N.F., Kutsevich K.E., Petrova A.P. A study of the rheological properties of adhesive binders. Polymer Science. D. 2016. T9. №3. P. 295–297.

13. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2014. №7. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.07.2017). DOI:10.18577/2307-6046-2014-0-7-6-6.

14. Шарова И.А., Петрова А.П. Обзор по материалам международной конференции по клеям и герметикам WAC-2012 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. Журн., 2013. №8. Ст.06. URL: <http://www.viam-works.ru> (Дата обращения 19.07.2017).

15. Гращенко Д.В. Чурсова Л.В. Стратегия развития полимерных композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.

16. Петрова А.П., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Сереженков А.А. Конструкционные и теплостойкие клеи // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 328–335.

17. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Чурсова Л.В. Клеевые связующие для полимерных композиционных материалов на угле - и

Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения
стеклонаполнителях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2015.
№9. Ст.11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.07.2017).

18. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Котова Е.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В., Куцевич К.Е. Клеевые препреги и композиционные материалы на их основе // Российский +Химический Журнал, 2010. Т.LIV. №1. С. 53–56.

19. Лукина Н.Ф., Котова Е.В., Чурсова Л. В., Кириенко Т.А. Клеевые связующие для алюмополимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2016.№4. С. 15–19.

УДК 544.54

Применение ускоренных электронов для синтеза, модифицирования и анализа полимеров и композиционных материалов

Пономарев А.В.¹, д.т.н.

ponomarev@ipc.rssi.ru

¹*ФГБУН Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина
Российской академии наук*

Аннотация:

Уникальные изменения структуры и свойств полимеров и мономеров под воздействием ускоренных электронов могут быть положены в основу получения новых полимерных композиционных материалов и разработки производственных технологий нового поколения.

Ключевые слова:

ускоритель электронов; сшивка; прививочная полимеризация; сополимеризация.

Введение

Воздействие ионизирующим излучением (радиолиз) является признанным и универсальным методом инициирования химических и физико-химических превращений в полимерах и мономерах [1, 2]. Радиолиз изменяет свойства вещества посредством образования поперечных межмолекулярных связей (сшивание), разрыва связей в главной и боковых цепях (деструкция), устранения и формирования двойных углерод-углеродных связей (изменение насыщенности), появления внутримолекулярных связей (циклизация), газообразования, окисления и

других эффектов. Известные закономерности этих процессов позволяют целенаправленно получать полимерные материалы с улучшенными и/или уникальными свойствами.

Источники ускоренных электронов

Сегодня главными инструментами для проведения радиолитизации служат электрофизические аппараты – ускорители электронов [3-5]. Технологические ускорители генерируют направленный пучок ускоренных электронов с плотностью тока до 100 мкА/см² и энергией до 1.3 пДж (т.е. ниже пороговой энергии ядерных превращений). Срок службы ускорителей при непрерывной производственной нагрузке превышает 10 лет. За последние годы появились промышленные ускорители с мощностью в пучке до 450 кВт, пригодные для применения в крупнотоннажных полимерных производствах. Быстрый рост числа и мощности ускорителей ведет к неуклонному удешевлению производимой ими энергии.

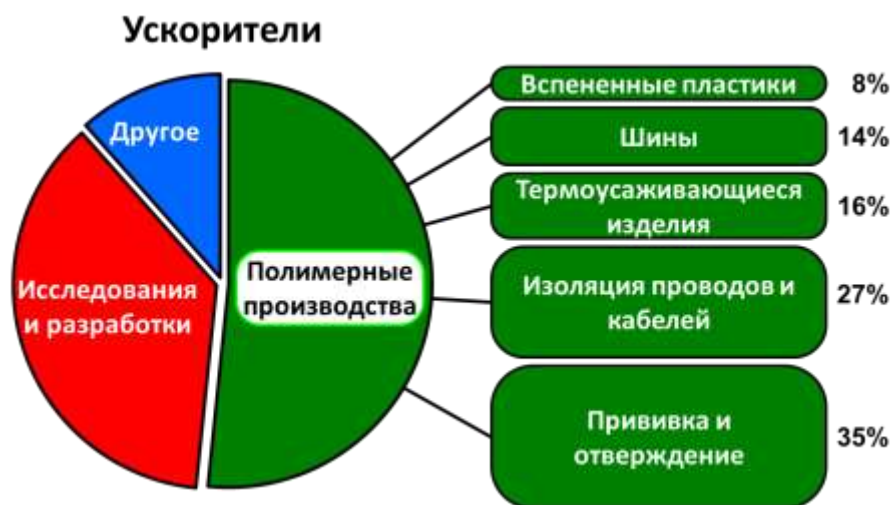


Рис. 1 – Области применения ускорителей в Японии (всего ~410 единиц)

Модифицирование и синтез полимерной продукции с помощью ускоренных электронов (далее – ЭЛО, электронно-лучевая обработка) широко применяется во всех развитых странах и, прежде всего в Японии, США, Германии, Франции, Канаде, Бельгии, Нидерландах, Республике Корея и других [2–5]. Сегодня в мире только для модифицирования полимеров используется свыше 1500 технологических ускорителей электронов.

Например, в Японии более 200 промышленных ускорителей применяется в полимерных производствах: прививочной полимеризации и отверждении полимерных покрытий, модифицировании кабельной изоляции, получении вспененных пластиков и термоусадочных изделий, сборке и вулканизации шин (рис. 1). В частности, в Японии и Канаде свыше 90% всего объема автомобильных шин производится с помощью ЭЛО. Каждый год число ускорителей, задействованных в мировом полимерном производстве, увеличивается примерно на 100 единиц.

В России технологические электронные ускорители разрабатываются и производятся в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (г. Санкт-Петербург) и в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск). Эти крупные всемирно-признанные производители выпустили около 300 технологических ускорителей, однако сегодня их продукция используется преимущественно за рубежом.

Общие сведения об электронно-лучевой обработке

При ЭЛО в веществе создаются высоко-реакционноспособные частицы – электроны, свободные радикалы, ионы (анион- и катион-радикалы, карбанионы, карбокатионы и т.п.) и возбужденные молекулы, каждая из которых способна выступать в качестве активных центров полимеризации [2]. Соответственно, радиолитическая полимеризация любых мономеров и их смесей с образованием регулярных и нерегулярных полимеров, блок-сополимеров, графт-сополимеров и латексов. Механизм полимеризации (радикальный, ионный или смешанный) определяется условиями облучения, так и природой мономера, примесями, относительным выходом радикалов и ионов. Естественно, специфические особенности ЭЛО проявляются, прежде всего, на стадии инициирования химических превращений.

ЭЛО отличается высокой энергетической эффективностью [1–5]. В-первых, образование реакционноспособных частиц под действием

ускоренных электронов происходит с наибольшим к.п.д. [2]. Во-вторых, энергию направленного пучка ускоренных электронов возможно полностью локализовать в пределах заданного реакционного объема (в отличие, например, от тепловой энергии). Так при термическом отверждении полимерных покрытий на металлах расходуется в среднем $2.7 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. При этом в отверждаемом слое поглощается только 2% тепловой энергии, а остальное тепло расходуется бесполезно (на нагрев металла, окружающей среды, оборудования и т.п.). В свою очередь, для ЭЛО необходимо в 85 раз меньше энергии, поскольку практически вся энергия электронов поглощается именно в отверждаемом слое [2].

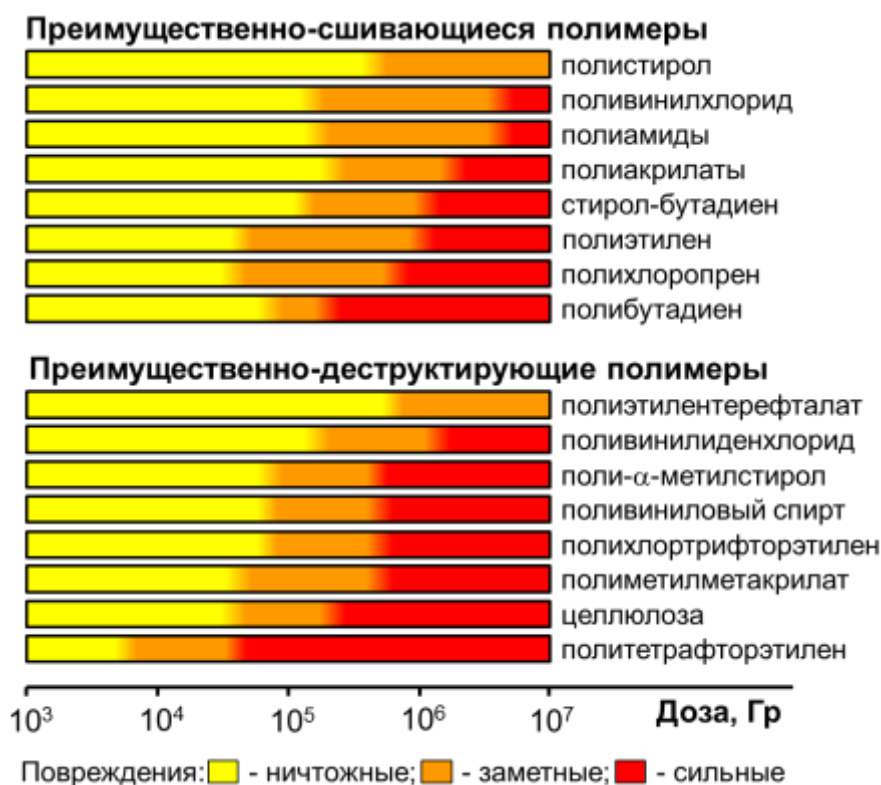


Рис. 2 – Стойкость некоторых полимеров к ионизирующему излучению [2]

В зависимости от восприимчивости к радиолузу, полимеры подразделяются на две категории – преимущественно сшивающиеся и преимущественно деструктурирующие (рис. 2). Эффективность сшивания зависит как от степени кристалличности полимера, так и от его морфологии. Сшивание преобладает в аморфных областях, где макромолекулы

переплетены друг с другом и не столь жестко зафиксированы. В кристаллических областях, чем тоньше ламели и чем плотнее они упакованы, тем выше выход сшивания.

ЭЛО вызывает разнообразные структурные изменения, а также обратимые и необратимые изменения многих физических свойств [2], что может быть использовано для создания полимерных композиционных материалов и производственных технологий нового поколения.

Электронно-лучевое получение наноматериалов

Ускоренные электроны активируют дискретные группы и связи в молекуле, позволяя управлять размерами и структурой продуктов. Благодаря этому ЭЛО служит наиболее эффективным инструментом нанохимии и нанотехнологии [6–9]. С помощью ЭЛО создаются гибридные материалы нового поколения [10–14], основанные на интегрировании органических и неорганических особенностей на молекулярном или супрамолекулярном уровне. Синтезируемые гибриды обладают необычными оптическими, электрическими, магнитными, каталитическими, биоцидными и механическими свойствами. Гибридные материалы особенно востребованы в качестве био- и химических датчиков, нелинейных оптических материалов, лазерных сред, селективных мембран, катализаторов, защитных покрытий, антистатиков и т.п. ЭЛО позволяет создавать полимерные нанокомпозиты и наногели с инкорпорированными в них наночастицами металлов (Ag, Au, Cu, Co, Ni, Pt, Pd и др.), биметаллическими частицами и окислами. Посредством ЭЛО создаются композиты на основе графена, окиси графена, сероуглерода, углеродных нанотрубок и волокон, силикатов, цеолитов, каолина, двуокиси титана и других нанообъектов. ЭЛО открывает возможности для получения металлизированных и окисированных нано-пленок, хорошо зарекомендовавших себя в катализе, микроэлектронике, при изготовлении «умных» упаковочных материалов, в микро- и суб-микро- литографии. Нанофазные ингредиенты вулканизованного акрилата, эпоксидных, винилэфирных и других матриц используются для усиления механических

свойств конструкционных материалов. С помощью ЭЛО проводится прямое модифицирование наноструктур и анализ индуцируемых изменений в наноструктурах. Сшивка и прививка методом ЭЛО применяются для получения нанонитей и нанопроводов с большим магнитным сопротивлением, формирования самоочищающихся поверхностных покрытий, каталитических комплексов, дозиметров, наноинкапсулированных препаратов, полупроводниковых устройств, газовых датчиков, термопреобразователей энергии, стойких лакокрасочных покрытий.

Электронно-лучевое модифицирование свойств полимеров

ЭЛО – лидер в мировом модифицировании полимеров. При ЭЛО даже сравнительно небольшие дозы облучения могут вызвать существенное изменение свойств полимера [1-5]. На эффекте сшивания, вызываемом ЭЛО, основаны такие всемирно известные процессы, как модифицирование полимерной изоляции кабелей и проводов; изготовление упрочненных и термоусаживающихся пленок, трубок, фасонных изделий; получение вспененных пластиков; вулканизация полисилоксановых каучуков для изготовления самослипающихся электроизоляционных материалов; производство теплостойких полиэтиленовых труб; обработка заготовок автомобильных шин; модифицирование древесных и минеральных порошков.

Например полиэтиленовая изоляция, подвергнутая ЭЛО, работоспособна при 150°C и может выдерживать кратковременный нагрев вплоть до 350°C [2]. По этой причине ЭЛО полиолефиновой изоляции широко используется в производстве кабелей и проводов по всему миру. Кроме полиэтиленовой и поливинилхлоридной изоляции, методом ЭЛО сшивают также изоляцию из хлорсульфированного полиэтилена, поливинилиденфторида, сополимеров этилена с тетрафторэтиленом или с пропиленом, и др.

ЭЛО используется для производства упрочненных и термоусаживающихся полимерных изделий (пленок, трубок, лент, мешков,

манжет, фасонных контейнеров, упаковочной тары), обладающих эффектом «памяти» [2–5, 15]. Сперва полимерное изделие облучают до дозы, несколько меньшей дозы гелеобразования; затем его нагревают до плавления кристаллических участков и растягивают; далее напряженный полимер охлаждают для повышения кристалличности. Обычно используются дозы 100–300 кГр (1 Гр=1 Дж/кг). Обработанный таким способом полимер обладает пространственной сеткой связей и после повторного нагревания стремится восстановить исходную форму. Если в это изделие перед повторным нагревом вложить какой-либо предмет, то после нагрева изделие образует на нем плотно-облегающую оболочку. Термоусаживающиеся изделия востребованы в электротехнике, электронике, пищевой промышленности, судостроении, приборостроении, самолетостроении и некоторых других областях [1-5, 15]. Также широкое применение находят пенополиэтилен, сшитый методом ЭЛО. Тепло- и коррозионностойкие полиэтиленовые трубы, металлопластиковые трубы для горячего водоснабжения, полиэтиленовая футеровка металлических труб также модифицируются с использованием ЭЛО [5, 16].

ЭЛО применяется для вулканизации пленочных покрытий на искусственных кожах, вулканизации латекса натурального каучука и, в частности, в производстве самослипающейся электроизоляционной ленты и резиностеклоткани на основе полигетеросилоксанового каучука. Вулканизат этого каучука способен к аутогезии и адгезии при комнатной температуре, а доза, используемая в процессе, составляет 100-130 кГр. Полученные ленты работоспособны вплоть при 250°C и обладают высокой водо- и морозостойкостью. Для изготовления самослипающейся резиностеклоткани достаточна еще более низкая доза – 50–70 кГр [2].

Посредством ЭЛО вулканизируют кабельную изоляцию из резин на основе полисилоксановых и карбоцепных каучуков, шприцованные трубки и уплотнительные детали для автомобилей. В шинной промышленности ЭЛО применяют для предварительного облучения протекторов, каркасов, боковин

и т.п. перед сборкой, формованием и термовулканизацией. Такая предобработка позволяет увеличивать когезионную прочность сырых смесей, заменять часть натурального каучука на синтетический, сокращать общую длительность изготовления шин на 20% и существенно уменьшать долю бракованных изделий [1–5].

ЭЛО вызывает изменения не только механических и теплофизических свойств, но и изменения электрических характеристик - электропроводности, диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, электрической прочности и т.п. [1-5]. Например, в политетрафторэтилене на воздухе диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь возрастают в процессе ЭЛО. Электропроводность поливинилхлорида увеличивается из-за радиолитического дегидрохлорирования. Напротив, сшивание полиэфирных смол приводит к резкому уменьшению электропроводности. Полиэтилен, сшитый путем ЭЛО, сохраняет высокое удельное сопротивление при больших температурах – электрическая прочность необлученного полиэтилена уменьшается с ростом температуры, тогда как у облученного полиэтилена это уменьшение тем меньше, чем выше поглощенная доза излучения.

Изменение электрических свойств при ЭЛО обусловлено образованием избыточных подвижных носителей заряда (электронов, дырок, ионов и т.п.), которые могут захватываться на какое-то время структурными или химическими ловушками. Спад стационарной индуцированной электропроводности после прекращения облучения протекает медленно. При комнатной температуре в зависимости от вида полимера она длится от нескольких минут до десятков часов. При малых дозах ионизирующего излучения изменение электропроводности обратимо, тогда как при сравнительно больших дозах – необратимо.

В ряде полимеров (полиэтилен, полипропилен и др.) ЭЛО изменяет способность полимера к рекристаллизации и снижает степень кристалличности [2]. В полиэтилене при комнатной температуре

кристаллиты устраняются при дозе 35 МГр, однако эту дозу можно существенно понизить путем нагрева: так облучение расплава полиэтилена вызывает быстрое снижение степени кристалличности, увеличение густоты пространственной сетки и температуры плавления. В ряде случаев, например, в политетрафторэтилене, облучаемом при комнатной температуре, степень кристалличности возрастает, достигая 94% при дозе 80 кГр.

Для получения композиционных полимерных материалов могут использоваться и другие радиолитические эффекты – изменение газопроницаемости, диффузионных характеристик и теплофизических свойств, газовыделение, накопление заряда, окисление и т.п. Например, ЭЛО полиэтилена приводит к уменьшению коэффициента газопроницаемости (в 3-4 раза при дозе 1 МГр), теплопроводности и теплоемкости (примерно на 15-25% при дозе 6.1 МГр).

Электронно-лучевая эмульсионная полимеризация

Радиолиз предоставляет ряд преимуществ по сравнению с термической или вещественной эмульсионной полимеризацией:

- возможность полимеризации любых мономеров;
- отсутствие вещественного инициатора, что дает более чистый продукт и исключает возможность передачи цепи на инициатор;
- возможность инициирования при пониженных температурах, что ослабляет нежелательные побочные процессы и способствует повышению молекулярной массы полимера и его структурной регулярности;
- ЭЛО генерирует радикалы с постоянной скоростью во всех фазах, что способствует ускорению полимеризации;
- применение ЭЛО в прерывистом режиме препятствует обрыву цепи из-за попадания второго радикала в полимерную частицу, уже имеющую свободный радикал. Тем самым создается возможность управлять пост-полимеризацией и получать полимеры с исключительно высокой молекулярной массой при практически полной конверсии мономера;

- ЭЛО влияет на стабильность коллоидных систем, зачастую увеличивая её. Это дает возможность проводить полимеризацию в присутствии очень малых количеств эмульгатора и, следовательно, получать более чистые латексы;

– при ЭЛО в воде образуются $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{H}$ и гидратированные электроны, чья химическая активность выше, чем у радикалов, возникающих при распаде «вещественных» инициаторов. Это предоставляет возможность расширять набор мономеров, полимеризуемых и прививаемых в латексах;

– ЭЛО обладает стерилизующим и деструктурирующим действием, поэтому и продукты и отходы характеризуются низкой заселенностью микроорганизмами и меньшим содержанием вредных веществ;

– ЭЛО предоставляет возможность легкого регулирования процесса полимеризации, например, путем изменения тока, энергии и геометрии электронного пучка.

Прививочная сополимеризация

Прививочная сополимеризация – одно из наиболее успешных применений ЭЛО, которое востребовано для модифицирования многих полимерных материалов (пленок, волокон, тканей, пресс-порошков, блок-сополимеров, латексов и т.п.) и минеральных веществ. Перечень свойств, которые можно улучшить или даже заново придать различным материалам посредством ЭЛО, весьма широк. Так, полиэтилену можно придать высокую адгезию к алюминию (при прививке акриловой кислоты), ионно-обменные свойства (при прививке акрилонитрила, акриловой кислоты и ряда других мономеров), высокую радиационную стойкость (при прививке аценафтена). На практике прививочная полимеризация методом ЭЛО используется для получения сорбентов и флокулянтов; для изготовления несминаемых, огнестойких, антистатических, гемостатических, тромборезистентных и биоцидных тканей; для повышения химической, термической, механической и световой стойкости; для улучшения маслостойкости, окрашиваемости, водоотталкивания и т.п. [1-5, 10-20]

Метод ЭЛО востребован для иммобилизации различных препаратов, в частности, ферментов, белков, антигенов, антибиотиков, гормонов, противораковых препаратов, иммуно-диагностических материалов, маркеров, бактериальных клеток и т.п. При этом применяют два метода: 1) образование химических связей между имплантируемыми частицами и подложкой и 2) захват имплантируемых частиц полимерной матрицей.

ЭЛО популярно при модифицировании пористых объектов (древесины, бетона, асбоцемента и т.п.) – материал пропитывают мономерами или олигомерами и затем полимеризуют пучком ускоренных электронов. Например, срок службы паркета после модифицирования методом ЭЛО достигает 50 лет и более. Схожим образом изготавливают долговечные упрочненные трубы, дорожные плиты, настилы, площадки и стоки из бетонов, асбоцемента, керамзитобетона, туфа и ряда других подобных материалов. ЭЛО используется также для укрепления памятников старины из древесины, камня, кости и т.п. [1–5]

Электронно-лучевое отверждение

ЭЛО низкоэнергетическими электронами используется для отверждения лакокрасочных, декоративных, магнитных, токопроводящих покрытий, печатных красок и т.п. на различных поверхностях (дерево, металле, пластмассах, бумаге, коже, гипсе, асбоцементе и др.) [1-5, 15-20]. Этому способствует ряд достоинств ЭЛО:

- использование направленного электронного пучка обеспечивает минимальный расход энергии (в десятки раз меньший по сравнению с термохимическим методом);
- установки для ЭЛО занимают существенно меньшие (в 4 и более раза) производственные площади;
- при ЭЛО отверждение протекает заметно быстрее (и, производительнее), чем термохимическое, завершаясь за секунды;

- ЭЛО осуществляется при комнатной температуре, что благоприятно для модифицировании термореактивных материалов и для улучшения условий труда (за счет снижения вредных испарений);
- применение ЭЛО позволяет снизить расход сырья и материалов, поскольку для него не нужны вещественные инициаторы и катализаторы;
- ЭЛО способствует прививке полимерных цепей к поверхности изделия, что заметно увеличивает прочность покрытия.

Заключение

ЭЛО создает важные структурные и химические изменения в молекулах посредством их сшивания, деструкции, изменения насыщенности, циклизации, отщепления и присоединения функциональных групп, окисления и других процессов. Все эти изменения позволяют целенаправленно получать новые полимерные и композиционные материалы с заданным набором свойств. Благодаря широкому спектру достоинств и уникальным особенностям взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, ЭЛО является непревзойденным инструментом нанохимии и нанотехнологии, обеспечивающим возможность получать разнообразные полимерные и гибридные наноматериалы с уникальными оптическими, электрическими, магнитными, каталитическими, биоцидными и механическими свойствами. Как следствие, электронно-лучевые методы переработки полимеров и мономеров широко распространяются по всему миру и служат основой передовых производственных технологий нового поколения для получения полимерных композиционных материалов с улучшенными и/или уникальными свойствами.

Литература

1. Chmielewski A.G., Al-Sheikhly M., Berejka A.J., et al. Recent developments in the application of electron accelerators for polymer processing. // Radiat. Phys. Chem. 2014. V. 94. P. 147–150.

2. Woods, R.J., Pikaev, A.K. Applied Radiation Chemistry: Radiation Processing, N.Y.: Wiley. 1994.
3. Chmielewski A.G., Haji-Saeid M. Radiation technologies: past, present and future. // Radiat. Phys. Chem. 2004. V. 71. P. 17–21.
4. Chmielewski A.G., Szolucha M.M. Radiation chemistry for modern nuclear energy development. // Radiat. Phys. Chem. 2016. V. 124. P. 235–240.
5. Berejka, A.J., Cleland, M.R., Walo, M. The evolution of and challenges for industrial radiation processing. // Radiat. Phys. Chem. 2014. V. 94. P. 141–146.
6. Kuila T., Bose S., Mishra A. K., et al. Chemical functionalization of graphene and its applications. // Prog. Mater. Sci. 2012. V. 57. P. 1061–1105.
7. Călinescu I., Martin D., Ighigeanu D., et al. Nanoparticles synthesis by electron beam radiolysis. // Cent. Eur. J. Chem. 2014, V. 12. P. 774–781.
8. Coqueret X., Krzeminski M., Ponsaud P., Defoort B. Recent advances in electron-beam curing of carbon fiber-reinforced composites. // Radiat. Phys. Chem. 2009. V. 78. P. 557–561.
9. Szebényi, G., Romhány, G., Vajna, B., Czvikovszky, T. EB treatment of carbon nanotube-reinforced polymer composites. // Radiat. Phys. Chem. 2012. V. 81. P. 1383–1388.
10. Albert A., Barnett A.O., Thomassen M.S., et al. Radiation-grafted polymer electrolyte membranes for water electrolysis cells: Evaluation of key membrane properties. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2015. V. 7. P. 22203–22212.
11. Sabatino M.A., Bulone D., Veres M., et al.. Structure of e-beam sculptured poly(N-vinylpyrrolidone) networks across different length-scales, from macro to nano. // Polymer. 2013 V. 54. P. 54–64.
12. Kim H.J, Park S.H., Park H.J. Hydrogen peroxide sensor based on electrically conducting nanosized Ag-polyaniline-silica complex. // Sensor Letters. 2010. V. 9. P. 59–63.

13. Kim Y. S., Seo K. S., Choi S. H. Polymeric nanocomposite proton exchange membranes prepared by radiation-induced polymerization for direct methanol fuel cell. // Radiat. Phys. Chem. 2016. V. 118. P. 35–41.
14. Sproll V., Nagy G., Gasser U., et al. Structure–property correlations of ion-containing polymers for fuel cell applications. // Radiat. Phys. Chem. 2016. V. 118. P. 120–123.
15. Herer A., Galloway R. A. Cleland M.R., et al. X-ray-cured carbon–fiber composites for vehicle use. // Radiat. Phys. Chem. 2009. V. 78. P.531–534
16. Ponomarev A.V. Spatial dose distribution in polymer pipes exposed to electron beam. // Radiat. Phys. Chem. 2016. V. 118. P. 138–142.
17. Palm A., Smith J., Driscoll M., et al. Chemical constituent influence on ionizing radiation treatment of a wood–plastic composite. // Radiat. Phys. Chem. 2016. V. 124. P. 164–168.
18. Soni K.S., Desale S.S., Bronich T.K. Nanogels: an overview of properties, biomedical applications and obstacles to clinical translation. // J. Control. Release. 2016. V. 240. P. 109–126.
19. Seko N., Ninh N.T.Y., Tamada M. Emulsion grafting of glycidyl methacrylate onto polyethylene fiber. // Radiat. Phys. Chem. 2010. V. 79. P. 22–26.
20. Auras, R., Harte, B., Selke, S. An overview of polylactides as packaging materials. // Macromol. Biosci. 2004. V. 4. P. 835–864.

УДК: 544.2

Молекулярно-динамическое моделирование нанокompозита органомодифицированный монтмориллонит – полиамид-6

Скоморохов А.С.¹, к.ф.-м.н.; Книжник А.А.^{1,2}, к.ф.-м.н.;

Потапкин Б.В.^{1,2}

antonskomorokhov@gmail.com, knizhnik@kintechlab.com,

potapkin@kintechlab.com,

¹НИЦ Курчатовский Институт

²ООО «Кинтех Лаб»

Аннотация:

В представленной работе при помощи метода молекулярной динамики изучаются структурные, динамические и механические свойства переходного слоя между матрицей и наполнителем нанокompозита полимер – слоистый силикат, который проявляет выдающиеся механические и газобарьерные свойства, а также негорючесть; произведена оценка толщины переходного слоя, которая составила 15Å, что хорошо совпадает с экспериментальными данными.

Ключевые слова:

монтмориллонит, полиамид, молекулярная динамика, полимерный нанокompозит.

Введение

Нанокompозиты (НК) полимер — слоистый силикат имеют выдающиеся механические и газобарьерные свойства, а также обладают повышенной негорючестью; впервые они были описаны в начале 1990-х гг.

японскими исследователями, и с тех пор ведется активное изучение подобных НК, при этом, одним из основных вопросов является взаимодействие органической матрицы из полиамида и неорганического глинистого наполнителя; неясным остается толщина переходного слоя между компонентами НК и характер изменения свойств в этом переходном регионе.

Полиамиды (ПА) являются широко распространенным классом термопластиков со множеством коммерческих применений: в связи со своей высокой прочностью ПА может использоваться как материал для изготовления частей механизмов, химическая и термическая стабильность и хорошие газобарьерные свойства открывают возможности применения ПА как защитного покрытия или пленки для упаковки пищевых продуктов [1]. Монтмориллонит (ММТ) представляет собой слоистый силикат из класса смектитовых глин, состоящий из двумерных пластин. Периодичность в перпендикулярном слоям глины направлении проявляется со значением приблизительно 10\AA ; размеры же частиц в плоскости могут различаться очень значительно, составляя от нескольких сотен ангстрем до микрон.

Проблема создания НК на основе ПА и ММТ заключается в том, что природный ММТ в чистом виде достаточно сложно перемешать с полимером с получением имеющей наилучшие свойства эксфолиированной структуры. Поэтому часто прибегают к химической обработке глины полярными органическими молекулами, иначе говоря, модификации, например, при помощи MT2EtOH [4]. После первых работ, в основном, совершались попытки установления взаимосвязи между свойствами НК, его морфологией и путем приготовления. Наибольшее внимание уделялось механическим характеристикам [5], барьерным свойствам [6], негорючести [7], температурной стабильности [8], реологическим [9] и диэлектрическим [10] свойствам.

Однако эксперименты не могут дать понимание некоторых важных микроскопических характеристик НК полимер – слоистый силикат, например, таких как структура полимера и его подвижность в межслоевом пространстве,

поэтому моделирование, в частности, молекулярная динамика (МД), являющаяся мощным теоретическим инструментом, используется для этой цели. Полноценного анализа переходного слоя с точки зрения структурных, динамических и механических свойств, насколько возможно судить, на настоящий момент в литературе проведено не было, поэтому работа по изучению данных свойств является новой. Актуальность обоснована высокой потребностью в понимании взаимодействий полимерной матрицы и неорганического наполнителя, что должно помочь создавать НК с лучшими свойствами. Микроструктура определяет физические свойства НК, целью представляемой работы является установление этой взаимосвязи.

Методика исследования

В данной работе для теоретического изучения свойств НК полимер – слоистый силикат использовался метод МД. Все вычисления производились при помощи программного комплекса MultiComp, который предназначен для многоуровневого моделирования структуры и физических свойств полимеров и композитов на их основе. В частности, комплекс MultiComp включает модули для молекулярно-динамического моделирования атомистической структуры нанокомпозитов и расчета их механических свойств.

Исследуемая система состояла из листа глины, модификатора и полимера. Длины полимерных цепочек варьировались от 10 до 20 мономеров. Поскольку возможны две принципиально различные структуры с точки зрения изначального взаимного расположения модификатора и полимера: (модификатор может находиться вблизи поверхности глины или быть равномерно перемешан с полимером), были созданы обе эти структуры с тем, чтобы проверить, что система достигает равновесия, приходя из разных стартовых положений к одной конечной конфигурации: исследования данного вопроса мы не обнаружили в литературе. Использовались периодические граничные условия, при этом лист глины находился на всем протяжении композитной системы, т. е. имел условно бесконечный размер.

Для расчета модуля Юнга использовалась процедура, в которой в определенном направлении прикладывалась деформация, состоящая в увеличении и последующем уменьшении длины ячейки. В остальных направлениях система могла изменять свои длины в соответствии с возникающими в ней напряжениями; по значениям последних, зная деформацию, возможно получение модуля Юнга в направлении, в котором происходит деформация.

Результаты и обсуждение

В первую очередь, была проведена верификация выбранных параметризаций путем сравнения с экспериментальными данными и первопринципными расчетами. В случае ММТ проверяемыми характеристиками были структурные параметры, такие, как межслоевое пространство, а в случае полимера – плотность и модуль Юнга.

Межслоевое пространство в чистом ММТ по результатам проведенных расчетов находится в хорошем согласии с первопринципными вычислениями: рассчитанное в представляемой работе значение составляет 9.67Å, в [17] вычисленная величина равна 9.44Å для натриевого ММТ; в [18] межслоевое пространство составляет 9.57Å, в [19] 9.62Å. Полученное в эксперименте значение для сухого ММТ составляет 9.5Å – 9.8Å [20].

Рассчитанная плотность ПА6 составила $1.03 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, что меньше, чем типичные экспериментальные значения [21], составляющие $1.11 - 1.13 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, на 8%. Это может быть связано с тем, что подобные значения приводятся для кристаллического полимера, в то время как плотность полностью аморфного ПА6 составляет $1.084 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ [22]. Следует отметить, что в теоретических расчетах плотности полимеров получение более низких значений по сравнению с экспериментом является достаточно распространенным фактом: в [23] рассчитанное значение на 7% ниже экспериментального, в [24] плотность ПА 6.6 на 9% ниже экспериментального значения. В [25] плотность смоделированного поли(метилметакрилата), содержащего графен,

на 1.3% ниже экспериментального [26] значения. В [27] смоделированное значение плотности для мембраны из ПА на 20% ниже экспериментального значения.

Важным вопросом при исследовании НК являлось выяснение того, достигла ли система положения равновесия, что в случае композитных систем часто является сложной задачей. В нашей работе достижением равновесия можно считать получение одинаковой структуры композита при использовании различных стартовых конфигураций. Для выяснения этого обстоятельства мы измеряли среднее расстояние между модификатором и глиной. По значениям данного параметра мы заключили, что в течение 8-9 нс обе структуры становятся очень похожи. Подобный результат позволяет заключить, что полученная нами структура является равновесной.

Слоистая структура полимера в межслоевом пространстве

После релаксации системы становится заметна слоистая структура полимерной части НК, выражающаяся в образовании осцилляций плотности в направлении оси, перпендикулярной поверхности глины, с периодом, равным 4-5Å. Всего наблюдается по три заметных слоя с каждой стороны от листа глины и также один слой в центре ячейки, его толщина зависит от межслоевого расстояния (т. е. от длины полимерных цепочек). При этом в центре межслоевого пространства плотность композита соответствует плотности чистого полимера. Следует отметить, что подобное разделение полимерной части НК на слои уже было представлено в литературе, например, в [29]. Ориентация связей и углов также испытывает колебания в соответствии со слоями плотности. Также были изучены значения параметра ориентации, рассчитанного как $P = \frac{3 \cdot \cos^2 \theta - 1}{2}$

где θ - это угол между осью, перпендикулярной к поверхности глины, и связью или углом, в зависимости от изучаемой характеристики. Значения параметра могут меняться от -0.5 до 1, при этом -0.5 соответствует связям или углам, ориентированным параллельно к поверхности глины, а 1 – перпендикулярно поверхности. В ближайшем к поверхности глины слое

молекулы полимера и модификатора достаточно сильно проявляют тенденцию быть параллельными поверхности ММТ. В целом, наблюдается тенденция, что параллельная ориентация связей и углов к поверхности глины соответствует максимумам плотности, а перпендикулярная – минимумам; однако наиболее сильно она выражена лишь на протяжении первого слоя полимерной части.

Расположение молекул модификатора

Из покомпонентного профиля плотности видно, что после релаксации модификатор располагается вблизи поверхности глины независимо от изначальной конфигурации системы. Анализ изображения системы позволяет заключить, что преимущественно цепочки модификатора перпендикулярны поверхности глины.

Гирационный радиус

В связи с тем, что вблизи поверхности глины цепочки ограничены жестким наполнителем, конформации полимерных цепочек вблизи и вдали от глины различаются. Поэтому компоненты гирационного эллипсоида (в трех перпендикулярных направлениях) изменяются по мере удаления от глины. По тому, что гирационные радиусы в трех направлениях становятся равны, можно сделать вывод, что свойства полимерной части композитной системы стали аналогичны свойствам чистого полимера; это происходит на расстоянии, превышающем 15Å.

Атомарная подвижность

На временах порядка 10нс, доступных нашим вычислительным возможностям применительно к данной системе, достаточно сложно получить данные, касающиеся подвижностей полимерных цепочек, поскольку смещение последних не превышало 1нм. Поэтому нами были изучены подвижности составляющих их атомов (за исключением атомов водорода), из чего можно сделать вывод о том, что атомы, расположенные вблизи поверхности глины, значительно затруднены в своем движении, в то

время как атомы из центра полимерного пространства имеют такую же подвижность, как и атомы в чистом полимере.

Модуль Юнга

Описанный нами выше алгоритм для расчета модуля Юнга был использован для того, чтобы получить механические свойства глины и полимера, а также отдельных обозначенных слоев полимера. Результаты расчетов приведены в табл. 1:

Таблица 1

Механические свойства глины и полимера

Слой	Модуль Юнга (ГПа)
1 (около поверхности глины)	3.9 ± 0.2
2	1.4 ± 0.2
3	1.6 ± 0.2
4 (центральный слой)	1.4 ± 0.2
Усредненная полимерная часть	2.0 ± 0.1
Чистый полимер	1.7 ± 0.1
ММТ	233 ± 3

Можно отметить, что ближайший к глине слой более чем в два раза жестче чистого полимера и остальных слоев, механические характеристики которых близки к таковым для чистого полимера. Средний модуль упругости межслоевого пространства превышает значение для чистого полимера, что и может являться объяснением выдающихся механических характеристик подобных НК: происходит модификация большего по объему количества полимера, который дает вклад в повышение упругости.

Заключение

Основываясь на представленных выше результатах, мы можем оценить толщину переходного слоя между матрицей и наполнителем. В первую очередь, следует отметить, что рассматриваемые разные характеристики

приводят к несколько различным значениям толщины переходного слоя, они представлены в табл. 2. Максимальная толщина переходного слоя составляет приблизительно 15Å. Изменения же модуля Юнга имеют место не на всем протяжении переходного слоя, а лишь на расстоянии 5Å от глины. Толщина переходного слоя должна определять также стабильность интеркалированных систем. На основе полученных результатов можно заключить, что интеркалированные системы могут быть стабильными при межслоевом расстоянии, не превышающем заметно $2 \cdot 15 \text{ \AA} = 30 \text{ \AA}$. Это подтверждается экспериментальными данными. В [29] наблюдалось значение для интеркалированной системы 32Å, в [30] — 31.9Å, в [31] — 52Å, в [32] — 41.4Å. Следовательно, полученная теоретическая оценка толщины переходного слоя подтверждается экспериментально.

Таблица 2.

Толщина переходного слоя

Параметр	Значение толщины переходного слоя, Å
Профиль плотности	15
Ориентация связей и векторов до второго ближайшего соседа	5
Атомарная подвижность	15
Гиационный радиус	15
Модуль Юнга	5

Благодарности

Данная работа была выполнена с использованием высокопроизводительных вычислительных ресурсов федерального центра коллективного пользования в НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.kiae.ru/>. Авторы также выражают глубокую благодарность сотрудникам Лаборатории полимерных материалов и Лаборатории электронной микроскопии Курчатовского института за ряд ценных обсуждений.

Литература

1. Kohan M. I. et al. (ed.). Nylon plastics handbook. – Munich : Hanser, 1995. – Т. 378.

2. Kojima Y. et al. Mechanical properties of nylon 6-clay hybrid //Journal of Materials Research. – 1993. – Т. 8. – №. 5. – С. 1185–1189.
3. Katti D. R. et al. Mechanical properties of the sodium montmorillonite interlayer intercalated with amino acids //Biomacromolecules. – 2005. – Т. 6. – №. 6. – С. 3276–3282.
4. Jiang J. Q., Zeng Z. Comparison of modified montmorillonite adsorbents: Part II: The effects of the type of raw clays and modification conditions on the adsorption performance //Chemosphere. – 2003. – Т. 53. – №. 1. – С. 53–62.
5. Massam J., Pinnavaia T. J. Clay nanolayer reinforcement of a glassy epoxy polymer //MRS Online Proceedings Library Archive. – 1998. – Т. 520.
6. Messersmith P. B., Giannelis E. P. Synthesis and barrier properties of poly (ϵ -caprolactone)-layered silicate nanocomposites //Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry. – 1995. – Т. 33. – №. 7. – С. 1047–1057.
7. Bourbigot S., Devaux E., Flambard X. Flammability of polyamide-6/clay hybrid nanocomposite textiles //Polymer Degradation and Stability. – 2002. – Т. 75. – №. 2. – С. 397–402.
8. Wu S. H. et al. Mechanical, thermal and morphological properties of glass fiber and carbon fiber reinforced polyamide-6 and polyamide-6/clay nanocomposites //Materials Letters. – 2001. – Т. 49. – №. 6. – С. 327–333.
9. Kim T. H. et al. Synthesis and rheology of intercalated polystyrene/Na⁺-montmorillonite nanocomposites //Macromolecular rapid communications. – 2002. – Т. 23. – №. 3. – С. 191–195.
10. Pluta M., Jeszka J. K., Boiteux G. Polylactide/montmorillonite nanocomposites: structure, dielectric, viscoelastic and thermal properties //European Polymer Journal. – 2007. – Т. 43. – №. 7. – С. 2819–2835.
11. Kelnar I. et al. Polyamide nanocomposites with improved toughness //Journal of applied polymer science. – 2005. – Т. 96. – №. 2. – С. 288-293.
12. Plimpton S. Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics //Journal of computational physics. – 1995. – Т. 117. – №. 1. – С. 1–19.
13. <http://lammps.sandia.gov>

14. Liu X. et al. Interlayer structure and dynamics of alkylammonium-intercalated smectites with and without water: A molecular dynamics study //Clays and Clay Minerals. – 2007. – Т. 55. – №. 6. – С. 554-564.
15. Hockney R. W., Eastwood J. W. Particle-Particle-Particle-Mesh (P3m) Algorithms //Computer simulation using particles. – 1988. – С. 267-304.
16. Theodorou D. N., Suter U. W. //Macromolecules. - 1985. - Т. 18. - №.7. - С. 1467–1485.
17. Li H. et al. Influence of interlayer cations on structural properties of montmorillonites: A dispersion-corrected density functional theory study //Computational Materials Science. – 2016. – Т. 117. – С. 33–39.
18. Voora V. K., Al-Saidi W. A., Jordan K. D. Density functional theory study of pyrophyllite and M-montmorillonites (M= Li, Na, K, Mg, and Ca): Role of dispersion interactions //The Journal of Physical Chemistry A. – 2011. – Т. 115. – №. 34. – С. 9695–9703.
19. Shi J. et al. An interlayer expansion model for counterion-intercalated montmorillonite from first-principles calculations //Computational Materials Science. – 2015. – Т. 96. – С. 134–139.
20. Karaborni S. et al. The swelling of clays: molecular simulations of the hydration of montmorillonite //Science. – 1996. – Т. 271. – №. EPFL-ARTICLE-200818. – С. 1102–1104.
21. Filippone G. et al. Using organoclay to promote morphology refinement and co-continuity in high-density polyethylene/polyamide 6 blends–Effect of filler content and polymer matrix composition //Polymer. – 2010. – Т. 51. – №. 17. – С. 3956–3965.
22. Roldan L. G., Kaufman H. S. Crystallization of nylon 6 //Journal of Polymer Science Part C: Polymer Letters. – 1963. – Т. 1. – №. 11. – С. 603–608.
23. Gardebien F., Brédas J. L., Lazzaroni R. Molecular dynamics simulations of nanocomposites based on poly (ϵ -caprolactone) grafted on montmorillonite clay //The Journal of Physical Chemistry B. – 2005. – Т. 109. – №. 25. – С. 12287–12296.

24. Eslami H., Müller-Plathe F. How thick is the interphase in an ultrathin polymer film? Coarse-grained molecular dynamics simulations of polyamide-6, 6 on graphene //The Journal of Physical Chemistry C. – 2013. – Т. 117. – №. 10. – С. 5249–5257.
25. Rissanou A. N., Harmandaris V. Structure and dynamics of poly (methyl methacrylate)/graphene systems through atomistic molecular dynamics simulations //Journal of nanoparticle research. – 2013. – Т. 15. – №. 5. – С. 1589.
26. Wunderlich W Polymer Handbook. - New York : Wiley, 1989. - Т. 77
27. Xiang Y. et al. Molecular dynamics simulations of polyamide membrane, calcium alginate gel, and their interactions in aqueous solution //Langmuir. – 2014. – Т. 30. – №. 30. – С. 9098–9106.
28. Anoukou K. et al. Molecular dynamics study of the polymer clay nanocomposites (PCNs): Elastic constants and basal spacing predictions //Computational Materials Science. – 2013. – Т. 77. – С. 417–423.
29. Jang B. N., Wilkie C. A. The effect of clay on the thermal degradation of polyamide 6 in polyamide 6/clay nanocomposites //Polymer. – 2005. – Т. 46. – №. 10. – С. 3264–3274.
30. Dennis H. R. et al. Effect of melt processing conditions on the extent of exfoliation in organoclay-based nanocomposites //Polymer. – 2001. – Т. 42. – №. 23. – С. 9513–9522.
31. Nigmatullin R., Gao F., Konovalova V. Polymer-layered silicate nanocomposites in the design of antimicrobial materials //Journal of Materials Science. – 2008. – Т. 43. – №. 17. – С. 5728.
32. Isik-gulsac I., Yilmazer U., Bayram G. Effects of Addition Order of the Components on Polyamide-6/Organoclay/Elastomer Ternary Nanocomposites //Advances in Polymer Technology. – 2013. – Т. 32. – №. S1.
33. Pereira S. P. et al. Multiscale modeling of polymer/clay nanocomposites //Journal of Multiscale Modelling. – 2011. – Т. 3. – №. 03. – С. 151–176.

Термопластичные композиционные материалы для авиации

Сорокин А.Е.¹, к.т.н.; Петрова Г.Н.¹, к.т.н.; Сагомонова В.А.¹;
Ларионов С.А.¹; Малышенок С.В.¹; Перфилова Д.Н.¹

sorokinae@viam.ru, petrovagn@viam.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

Аннотация:

В докладе рассмотрены перспективные разработки ФГУП «ВИАМ» в области термопластичных композиционных материалов для авиационного строительства. Предложены материаловедческие решения для конструкций внешнего и внутреннего контуров самолетов, вертолетов и беспилотных летательных аппаратов: деталей и агрегатов носовой части крыла, декоративных конструкций и материалов с вибропоглощающими свойствами, систем кондиционирования воздуха, наномодифицированных полимерных композиционных материалов и др.

Применение разработанных материалов в современных и перспективных летательных аппаратах взамен ранее используемых позволит снизить массу воздушных судов, а также повысить их надежность и комфортабельность.

Ключевые слова:

термопластичный композиционный материал, термопластичный слоистый пластик, литевая термопластичная композиция, аддитивные технологии, функциональные декоративные пластики, вибропоглощающий слой.

Разработка современных и перспективных летательных аппаратов требует применения легких и прочных материалов, в том числе обладающих различными функциональными свойствами. Применение новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) позволяет уменьшить массу и повысить надежность летательных аппаратов, а также комфортабельность пассажирских перевозок.

ФГУП «ВИАМ» является одной из ведущих организаций в Российской Федерации, осуществляющих научно-технические разработки в области создания ПКМ. Полимерные композиционные материалы находят применение при изготовлении внешнего и внутреннего контуров летательных аппаратов, в акустических конструкциях, системах кондиционирования воздуха, декоративных панелях, кронштейнах, кабель-каналах, коробах, носовой и хвостовой частях крыльев, а также элементах хвостовых оперений воздушных судов.

ПКМ конструкционного и функционального назначения широко распространены во всех отраслях народного хозяйства. Так, например, в современных воздушных судах их доля достигла высокого значения: Boeing 787 – 50 %, Airbus A350 – 52 %, МС-21 – более 40 %.

Переход от традиционных технологических и материаловедческих решений (металлических материалов и конструкций) к ПКМ позволяет снизить массу, а также повысить прочность и надежность деталей и агрегатов летательных аппаратов [1–8].

В рамках программы «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» разработаны:

– углепластики на термопластичной матрице - пожаробезопасный термопластичный углепластик марки ВКУ-43 на основе полифениленсульфида и листовой композиционный термопластичный материал марки ВКУ-44, предназначенные для применения в авиакосмической технике,

– литьевой термопластичный материал марки ВТП-7,

- термопластичные филаменты на основе полиамида и поликарбоната,
- порошковая композиции марки ВТП-9 для селективного лазерного спекания,
- декоративные ПКМ с повышенными демпфирующими характеристиками.

Слоистые термопластичные композиционные материалы

Использование термопластичных матриц при разработке и изготовлении ПКМ по сравнению с терморезактивными связующими позволяет получить ряд преимуществ: стабильность молекулярно-массовых характеристик и химической структуры связующего, неограниченный срок хранения полуфабриката, повышенная стойкость к ударным воздействиям, возможность вторичной переработки, взрывобезопасность и нетоксичность технологических процессов изготовления, ремонта и переработки [3, 7–11].

Технология изготовления углепластика марки ВКУ-43 позволяет получать материал и изделия на его основе, работоспособные в широком диапазоне температур (от -60 до 160°C) с комплексом высоких физических и прочностных характеристик - прочность при 20°C при изгибе 1320 МПа, при сдвиге 52 МПа, при сжатии 990 МПа, при растяжении 1420 МПа и плотностью 1550 кг/м³, низким водопоглощением 0,04% за 24 ч. Категория горючести в соответствии с АП-25 приложение F, часть I - самозатухающий [12, 13].

Термопластичный углепластик ВКУ-43 по основным характеристикам сопоставим с зарубежным аналогом – углепластиком на основе углеволокна AS4 фирмы Hercules и полифениленсульфидного связующего фирмы Ticona, а также превосходит отечественный углепластик марки КТМУ-1 по прочности при изгибе, растяжении, сжатии, водопоглощению и т.д. Материал прошел квалификационные испытания и по их результатам рекомендован для опробования в конструкциях малонагруженных и неотчетственных деталей, а также элементов летательных аппаратов. Сравнительные характеристики описанных материалов приведены в таблице 1.

Свойства углепластика ВКУ-43 в сравнении с аналогами

Наименование свойств	Укладка	ВКУ-43	КТМУ-1	Углепластик на основе AS4 и PPS Ticona
Плотность, кг/м ³	-	1550	1450-1480	1580
Предел прочности при изгибе при 20 °С, МПа	Однонаправленная	1380	-	1250
Предел прочности при сжатии при 20 °С, МПа		990	850	-
Предел прочности при растяжении при 20 °С, МПа		1420	1000	-
Предел прочности при растяжении при 160 °С, МПа		1230 (87 % от исходной)	850-950 (85-95 % от исходной)	-
Предел прочности при сдвиге при 20 °С, МПа		55	60	21,7
Водопоглощение за 24 часа при 20 °С, %	-	0,04	0,09	0,1
Горючесть	-	Самозатухающий		-

Для листового композиционного термопластичного материала марки ВКУ-44 использовали только отечественные компоненты. В качестве армирующего наполнителя использована углеродная однонаправленная лента ЭЛУР 0.08ПА. Связующим служит термостойкий термопластичный материал – полиарилсульфоновая пленка марки ПСФ Т-2 с температурой стеклования $T_{ст.} = 210\text{--}215^\circ\text{C}$ [7–10, 14–15].

Листовой композиционный термопластичный материал марки ВКУ-44 превосходит российский аналог КТМУ-1 – по плотности, прочности при растяжении, а зарубежный аналог – полимерный КТМ на основе угленаполнителя AS-4 и полисульфона марки Udel P-1700 – по прочности при растяжении, линейной усадке. Сравнительные характеристики материалов приведены в таблице 2.

Свойства композиционного термопластичного материала
 ВКУ-44 в сравнении с аналогами

Показатели свойств	ВКУ-44	КТМУ-1	КТМ на основе AS-4 и Udel P-1700
Плотность, кг/м ³	1370	1450-1480	1320-1450
Прочность при растяжении (σ_B) (исходная) при 20°C, МПа	1114	1000	1200
Прочность при растяжении при 150°C, МПа	1064 (95% от исходной)	850-950 (85-95% от исходной)	-
Прочность при изгибе ($\sigma_{и}$) при 20°C, МПа	1095	-	1300
Линейная усадка при прессовании, %	0,28	-	2-3

Методами склеивания и сварки с последующей сборкой из листового композиционного термопластичного материала марки ВКУ-44 могут быть изготовлены элементы системы кондиционирования воздуха (СКВ, рис. 1).

а)



б)



Рис. 1 – Изделия, изготовленные из ВКУ-44 методами:
 а - сварки; б - склеивания

Листовые углепластики марок ВКУ-43 и ВКУ-44 должны значительно увеличить номенклатуру изделий, изготавливаемых из ПКМ. Их применение позволит снизить массу агрегатов и деталей до 2 раз по сравнению с изделиями из алюминиевых сплавов, снизить нагрузку на экологическую систему за счет использования безрастворных технологий при изготовлении КТМ.

Литьевой композиционный термопластичный материал марки ВТП-7

Разработанный во ФГУП «ВИАМ» литьевой термопластичный композиционный материал марки ВТП-7 с повышенными антистатическими характеристиками полностью отвечает современным требованиям, предъявляемым к авиакосмическим материалам. Его можно отнести к конструкционным термопластам нового поколения с температурой эксплуатации превышающей 180°C. Материал обладает комплексом высоких прочностных свойств, отвечает требованиям норм АП-25 по пожаробезопасности.

Высокий уровень технологических и эксплуатационных характеристик разработанного литьевого композиционного термопластичного материала марки ВТП-7 обусловлен составом исходных компонентов и технологией их совмещения. Наличие в главной цепи матричного полимера ароматических колец способствует не только повышению его температуры стеклования и жесткости, но и увеличению физико-механических характеристик.

При разработке рецептуры композиционного термопластичного материала в качестве матричного полимера был использован порошковый полиарилсульфон марки ПСФФ-30 со значением приведенной вязкости 37–45 мл/г и температурой стеклования 210°C, так как он обладает наиболее оптимальным соотношением теплостойкости и вязкости, что имеет большое значение при переработке методом литья под давлением. Выбор порошковой формы обусловлен возможностью получения более равномерного распределения наполнителей в композиции.

Для снятия статического электричества, которое возникает в процессе эксплуатации изделий из полимерных материалов на их поверхности из-за низкой электропроводности и может быть источником пожаров, что, в свою очередь, может привести к выведению отдельных узлов или всей конструкции из строя, полиарилсульфон, который является диэлектриком, модифицировали с целью изменения его электропроводности.

Для придания полимеру функциональных (антистатических) свойств в качестве наполнителей выбраны коаксиальные многослойные углеродные нанотрубки марки «Таунит-М» и технический углерод марки П 803. Углеродные нанотрубки имели наружный диаметр 8–15 нм и длину более 2 мкм. Число нанослоев одной трубки 6-10. Удельная геометрическая поверхность 300–320 м²/г.

Введение углеродных нанотрубок осуществляли способом физической модификации, которая позволяет получить полимеры матричной структуры, основные свойства которых определяет матрица, в данном случае – полиарилсульфон.

Микроструктурные исследования сколов образцов матричного полимера и ВТП-7 показали, что углеродные нанотрубки оказывают влияние на процесс структурообразования и характер разрушения ПСФФ-30: образуется один очаг разрушения, вокруг которого хорошо видны зеркальная и шероховатая зоны, причем в этих зонах четко проявляется волновой характер разрушения.

Введение нанотрубок в полимер привело к увеличению на порядок (с 0,1 до 1,0 мкм) размеров частиц микродисперсной фазы и уменьшению плотности их упаковки.

Модификацию осуществляли путем совмещения компонентов в расплаве на лабораторном двухшнековом экструдере.

Переработку проводили способом литья под давлением на стандартном оборудовании – термопластавтомате со шнековой пластикацией.

Разработанный композиционный термопластичный материал марки ВТП-7 обладает комплексом уникальных свойств:

- плотность составляет 1265 кг/м³;
- прочность при растяжении равна 86,4 МПа;
- температура стеклования равна $T_{ст.} = 202 - 218^{\circ}\text{C}$;
- характеризуется стабильностью размеров (колебания усадки – 0,05 %);

– ТКЛР в диапазоне температур от -60 до 180°C равен от $47,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ до $51,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;

– категория горючести – самозатухающий.

Важной функциональной характеристикой ВТП-7 являются повышенные антистатические свойства. По сравнению с другими термопластами, которые являются диэлектриками (удельное объемное сопротивление составляет $\sim 10^{14} - 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{см}$), материал имеет трансверсальную проводимость, что способствует снятию статического электричества, которое возникает в процессе эксплуатации изделий из полимерных материалов на их поверхности из-за низкой электропроводности (удельное объемное сопротивление равно $2,2 \cdot 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

Введение в рецептуру материала модифицирующих добавок позволило повысить жесткость полимера, снизить усадку при литье изделий и обеспечить стабильность размеров при их эксплуатации.

Разработанный материал превосходит:

– российский аналог – полисульфон ПСФ-150 – по температуре стеклования, прочности при растяжении, рабочей температуре, ТКЛР в диапазоне температур от минус 60 до плюс 180°C ;

– зарубежный аналог полисульфон марки Udel P-1700 фирмы «Solvay Advanced Polymers», США, – по температуре стеклования, прочности при растяжении, ТКЛР и рабочей температуре.

Применение литьевого самозатухающего термопластичного композиционного материала на основе полиарилсульфона марки ВТП-7 позволит:

– заменить на отечественном рынке ПКМ импортный аналог полисульфона марки UdelP-1700 фирмы «Solvay Advanced Polymers»,

– снизить вес элементов и деталей в 2,1 раза по сравнению с элементами из алюминиевых сплавов.

Материал рекомендован для применения в различных отраслях народного хозяйства: авиационной и автомобильной промышленности, судостроении, железнодорожном транспорте и т.д.

Материалы для аддитивных технологий

Высокий уровень технологических и эксплуатационных характеристик широкого ряда термопластичных материалов и возможность получения функциональных деталей методами FDM и SLS-технологий, явились предпосылками для проведения во ФГУП «ВИАМ» научно-исследовательских работ в области аддитивных технологий.

Перспективным направлением, где с каждым годом увеличивается объем потребления термопластов, являются аддитивные технологии или технологии послойного синтеза - одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства. Технологические процессы послойного синтеза позволяют за единый цикл построить прототип или физическую модель изделия сложной формы в соответствии с компьютерной 3D-моделью.

Технология FDM (Fused Deposition Modeling)

Наиболее распространенной технологией 3D печати, особенно среди персональных и настольных 3D принтеров, является технология Fused Deposition Modeling или FDM – моделирование методом экструзии – послойной укладки полимерной нити. На сегодняшний день, FDM технология используется для создания дизайнерских прототипов, физических моделей изделий сложной формы в единичных экземплярах, с успехом заменяя традиционную технологию переработки термопластичных материалов литьем под давлением, которая отличается высокой производительностью и качеством изготавливаемых изделий и является особенно эффективной в серийном производстве.

FDM процесс предусматривает протягивание обжимными роликами через экструдер нити диаметром менее 0,178 мм из термопластичного полимера или эластомера. Нить при этом нагревается, переходит в вязко-

текущее состояние и наносится на матрицу формируемого 3-мерного объекта в ходе построчного сканирования экструдером. Компонировочное вещество, осаждаясь на матрице объекта, при температуре окружающей среды быстро затвердевает.

Преимущества данной технологии заключаются в высокой производительности процесса, скорости и простоте изготовления моделей; доступности; безопасности, экологической чистоте и нетоксичности большинства материалов; точности построения; простоте использования и обслуживания; прочности деталей; простоте утилизации.

Во ФГУП «ВИАМ» впервые были сформулированы основные требования к материалам для FDM аддитивной технологии печати по уровню технологических и эксплуатационных свойств. Материалы, проверяющиеся на пригодность в этой области, должны обладать термостабильностью, иметь температуру переработки ниже, чем температура начала деструкции; обладать способностью образования нити при экструдировании полимера. Кроме того, они должны отличаться точностью изготовления, прочностью и термостабильностью, не впитывать влагу, не деформироваться и не давать усадку.

С учетом сформулированных требований к материалам для использования в 3D – печати, и требований, предъявляемых к современным авиационным материалам, в институте были разработаны составы термопластичных композиций с пониженной пожарной опасностью – модифицированный поликарбонат (мПК) и модифицированный полиамид 12 (мПА 12).

Композиции являются самозатухающими, среднедымящими, имеют кислородный индекс >27 , что соответствует требованиям АП-25. Разработанные композиция на основе ПК и ПА 12 имеют высокие прочностные и деформационные характеристики, а также необходимую технологичность.

При изучении влияния технологии переработки на физико-механические свойства разработанных композиций и используемых в настоящее время термопластичных материалов в 3D печати, установлено, что:

– прочность при растяжении для образцов, изготовленных по FDM технологии, сохраняется на уровне 59% по сравнению с образцами, изготовленными традиционным методом литья под давлением,

– модуль упругости при растяжении на уровне 67 %, что находится на уровне зарубежных аналогов.

Результаты исследований позволили установить закономерности влияния технологических параметров процесса 3D печати методом послойного синтеза (FDM технология) на механические свойства и размеростабильность напечатанных объектов. Эти знания были применены при разработке и 3D печати методом послойного синтеза модельной оснастки для изготовления тонкостенных фасонных отливок из алюминиевых и магниевых сплавов.

Разработанные материалы могут также найти применение при создании функциональных изделий для интерьера авиационной техники методами 3D печати, отвечающих требованиям АП-25 по характеристикам пожарной опасности.

Так, например, из композиции на основе ПА 12 была получена полимерная нить диаметром $1,7 \pm 0,1$ мм и опробована при изготовлении сотовой конструкции на FDM 3 Д принтере Magnum Creative 2 PRO (рисунок 2).

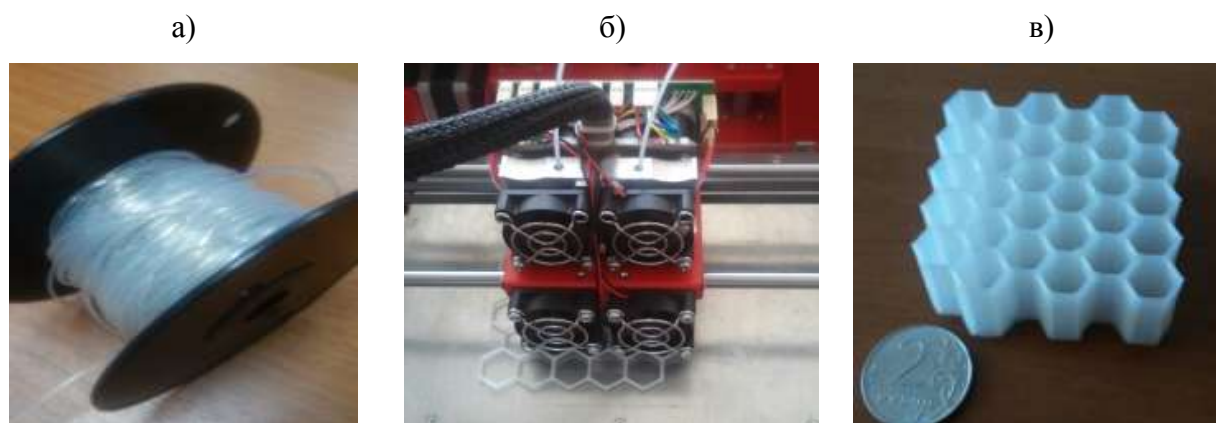


Рис. 2 – Печать сотовой конструкции: а) Полимерная нить из композиции ПА-12 $d=1,7\pm 0,1$ мм; б) Печать сотовой конструкции из композиции ПА-12+3% ДБДФО; в) Сотовая конструкция в масштабе

Полученная сотовая конструкция, имеет однородную, характерную для объектов, синтезированных по FDM технологии, слоистую структуру. Усадочные деформации сотовой конструкции минимальны и сопоставимы с деформациями аналогичных изделий, полученных с использованием базовых материалов для FDM типа Nylon 618 и ABS.

Технология SLS (Selective Laser Sintering)

В технологии SLS наиболее широко применяемыми материалами являются порошковые композиции на основе полиамида. Поэтому при разработке отечественного материала в качестве аналога была выбрана порошковая полиамидная композиция фирмы EOS марки PA2200, рекомендованная для создания макетов, масштабных копий и функциональных моделей методом SLS.

Изготовление порошковых композиций марки ВТП-9 на основе полиамида-12 (ПА12) осуществляли методом, основанным на растворении гранулированного ПА12 в растворителе в присутствии центров кристаллообразования с последующим осаждением порошкового материала в равновесных условиях. В процессе исследования было установлено, что только при низких концентрациях мелкодисперсного минерального наполнителя возможно получение порошковой композиции с оптимальным количеством частиц диаметром необходимого размера.

На микрофотографиях и диаграммах распределения частиц по размеру можно видеть (рис. 3-6), что частицы порошка на основе полиамида-12 отечественного производства с содержанием аэросила в малых концентрациях близки по форме и распределению размеров частиц к импортному аналогу фирмы EOS марки PA2200. Введение более крупнодисперсных добавок, а также изменение их концентраций приводило к росту размеров частиц полимера вплоть до 500 мкм.

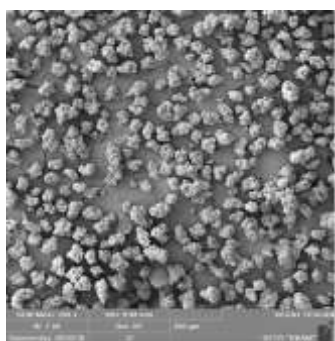


Рис. 3 – Структура порошка ПА12Л с 0,1% аэросила

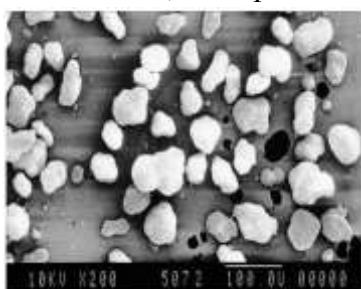


Рис. 5 – Структура порошка PA2200 фирмы EOS

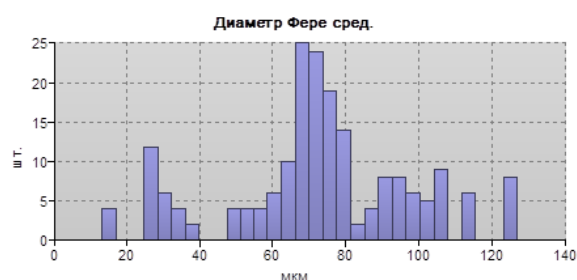


Рис. 4 – Распределение по диаметру частиц порошка ПА12Л с 0,1% аэросила

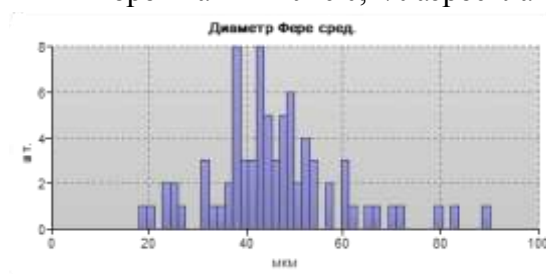


Рис. 6 – Распределение по диаметру частиц порошка PA2200 фирмы EOS

Для оценки влияния гранулометрического состава и теплофизических показателей на возможность переработки полимерной порошковой композиции в изделия методом селективного лазерного спекания использовали две партии материала с разными свойствами (таблица 3), из которых были синтезированы полимерные образцы (рисунок 7). Установлено, что метод селективного лазерного спекания позволяет перерабатывать партии материала марки ВТП-9 в образцы с отличающимися до двух раз геометрическими размерами частиц.

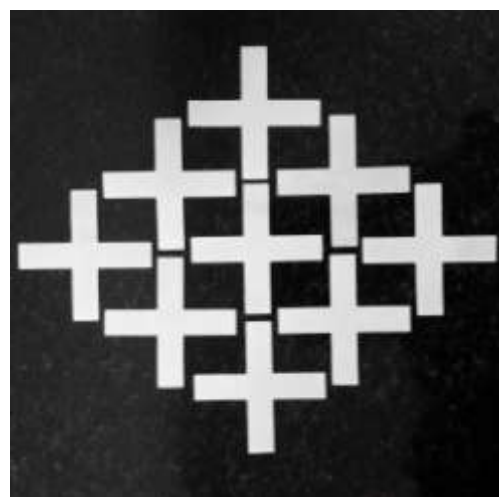
Свойства партий порошковой композиции марки ВТП-9

Характеристика, ед.	Композиции на основе полиамида 12	
	Партия 1	Партия 2
Тпл., °С	183	184
Ткр., °С	160	161
Тпл. - Ткр., °С	23	23
Средний диаметр частиц, мкм	53,4	143,8
Фракционный состав частиц порошка, мкм	9,3-163,1 (содержание частиц от 20 до 100 мкм – 90%)	11,3 – 236,4 мкм
Насыпная плотность, кг/м ³	0,41	0,38

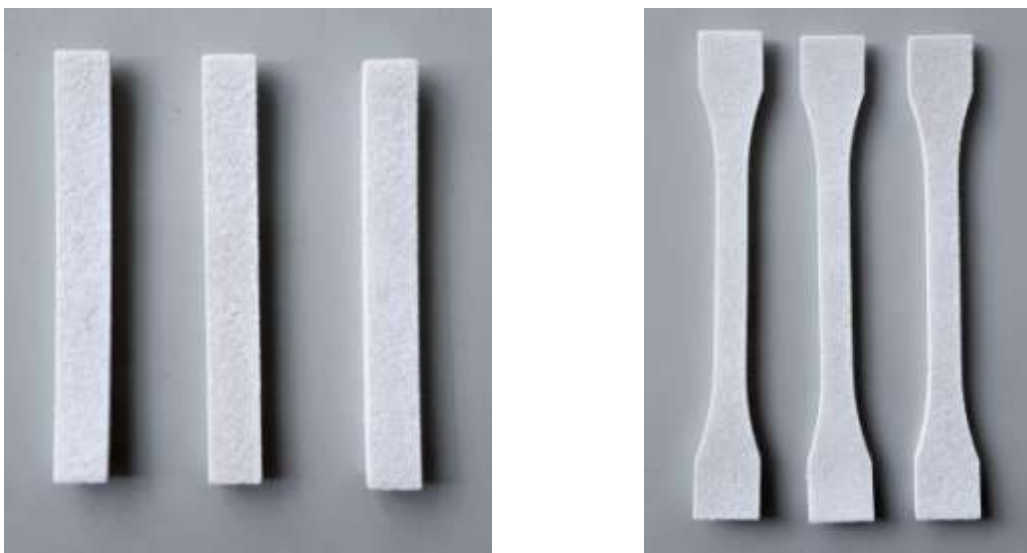
При сравнении образцов, полученных методом SLS из двух партий материала марки ВТП-9, можно видеть, что партия с преобладанием фракции порошка до 100 мкм (90%) перерабатывается в однородные монолитные образцы, в отличие от образцов на основе партии с широким фракционным составом (11,3 – 236,4 мкм), характеризующихся неоднородной рыхлой структурой. Это подтверждается результатами измерения плотности образцов: партия 1 – 1,00 г/см³, партия 2 – 0,94 г/см³.



А1-тестовые образцы 50×50×1мм



А2-тестовые образцы 50×50×1мм



Б1 - Бруски по ГОСТ 4648 (80×10×4 мм)

Б2 - Лопатки тип 2 по ГОСТ 11262

Рис. 7 – Образцы на основе партий 1 (А1,А2) и 2 (Б1,Б2) полиамидной порошковой композиции

Воздействие лазера на порошковую композицию приводит к ее разогреву и переходу в расплав. Однако недостаточное или избыточное воздействие лазерного излучения приводит к ухудшению ее реологических показателей. В результате материал утрачивает свою технологичность. Широкий разброс размеров частиц порошка и низкая насыпная плотность композиции, вероятно, приводят к неравномерному прогреву материала и образованию неоднородного по вязкости расплава. Синтез образцов из такого расплава, как показано выше, приводит к образованию пористых немонолитных структур.

Таким образом, показано, что для получения монолитных однородных образцов методом SLS необходимо использовать порошковые композиции с узким распределением частиц по размерам от 20 до 100 мкм и насыпной плотностью не менее $0,4 \text{ г/см}^3$.

Разработки в области FDM и SLS технологий создают перспективы изготовления авиационных деталей и конструкций сложной геометрии за единый технологический цикл с минимальными трудозатратами и количеством технологических отходов.

ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами

Как показывает практика, ПКМ имеют низкие, на уровне металлов, вибропоглощающие свойства [16-23]. Например, коэффициент механических потерь ($tg\delta$) углепластика ВКУ-39, стеклопластиков ВПС-47, ВПС-48 производства ФГУП «ВИАМ» при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте 100-1000 Гц составляет 0,001-0,01. Кроме того, существует мнение, что акустически неблагоприятные свойства фюзеляжа летательных аппаратов из волокнистых композитных материалов по сравнению с монолитными металлическими материалами требуют более совершенной виброакустической изоляции [24].

Применение вибропоглощающего покрытия на поверхности ПКМ позволяет существенно повысить коэффициент механических потерь конструкции из ПКМ, однако это приводит к увеличению ее веса, в особенности в случае использования армированных вибропоглощающих материалов.

Например, благодаря применению вибропоглощающего материала марки ВТП-1В-А (с армирующим слоем на основе стеклоткани Т-10-80 и полимерного связующего) на поверхности упомянутых выше стекло- и углепластиков удалось повысить их коэффициент механических потерь до значений $tg\delta=0,08-0,13$ при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и частотах 100-1000 Гц. При этом поверхностная плотность ПКМ увеличилась почти на 50 %.

Альтернативным решением данной проблемы является создание ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами посредством интегрирования вибропоглощающих слоев в структуру ПКМ. Под действием изгибающих нагрузок вибропоглощающий слой будет испытывать сдвиговые деформации относительно слоев ПКМ и за счет происходящих в нем процессов внутреннего трения при деформировании рассеивать вибрационную энергию. При этом отпадает необходимость использования дополнительного армирующего слоя, так как в его качестве будут выступать слои ПКМ.

Специалистами ФГУП «ВИАМ» отработаны технологические режимы получения экспериментальных образцов ПКМ с повышенными

вибропоглощающими свойствами способом автоклавного формования и прессования. Внешний вид экспериментальных образцов на основе стеклоткани, эпоксидно-каучукового связующего и термопластичного вибропоглощающего слоя приведен на рисунке 8.

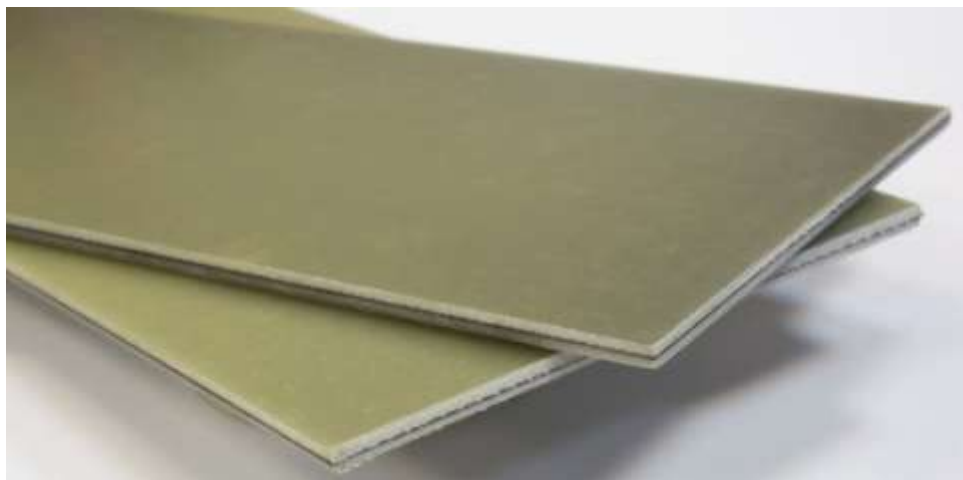


Рис. 8 – Экспериментальные образцы ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами

Полученные экспериментальные образцы имеют следующий комплекс свойств:

Таблица 4

Свойства экспериментальных образцов ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами в сравнении с ПКМ

Образцы для испытаний	Коэффициент механических потерь при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте 100 Гц	Прочность при изгибе при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, МПа	Поверхностная плотность, $\text{кг}/\text{м}^2$	Прочность связи между конструктивными и вибропоглощающим слоями, Н/мм
ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами	0,050	440	4,70	6,2
ПКМ на основе КМКС 3.150Т60-37	0,001	870	4,10	-

Из приведенных данных видно, что ПКМ, не содержащие вибропоглощающие слои, уступают полученным экспериментальным образцам по величине коэффициента механических потерь в 50 раз, но превосходят их по механическим свойствам почти вдвое.

В результате проведенных исследований также установлено, что на величину коэффициента механических потерь ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами оказывает влияние конфигурация расположения конструктивных слоев ПКМ (причем симметричное их размещение относительно центрального вибропоглощающего слоя – эффективнее), толщина вибропоглощающего слоя (с ее увеличением демпфирующие свойства понижаются), количество вибропоглощающих слоев (в зависимости от их толщины и конфигурации расположения).

Показано, что увеличение толщины внутреннего вибропоглощающего слоя и количества вибропоглощающих слоев негативно сказывается на прочностных характеристиках ПКМ, а конфигурация расположения конструктивных слоев оказывает на них незначительное влияние.

В литературных источниках имеются сведения, подтверждающие полученные результаты, однако приводятся данные, свидетельствующие о понижении как демпфирующих, так и механических свойств полученных ПКМ при повышении температуры испытаний, например до 50 °С [25]. Следовательно, требуется проведение соответствующих испытаний в диапазоне температур и частот.

За рубежом исследования, посвященные данной области, успешно проводятся с начала 2000-х годов [26, 27], поэтому можно предположить, что данное направление является перспективным не только с точки зрения исследовательского интереса, но и получения готового продукта для обеспечения акустической комфортности внутри транспортных средств.

Заключение

1. Разработанные термопластичные материалы, обладая комплексом прочностных и/или функциональных свойств, позволят расширить номенклатуру изготавливаемых изделий, а также решить целый ряд проблем авиастроения.

2. Внедрение в авиационную и ракетную технику разработанных углепластиков марок ВКУ-43 и ВКУ-44 уменьшит до 2 раз массу деталей, агрегатов и/или их элементов по сравнению с металлическими изделиями, а также снизит негативное воздействие на экологическую систему за счет использования безрастворных технологий при их изготовлении.

3. Применение в авиационной технике литьевого самозатухающего термопластичного композиционного материала марки ВТП-7 повысит производительность процесса изготовления деталей и агрегатов за счет использования современных технологий переработки материала (литье под давлением, экструзия и др.), а также снизит на 20-30 % их вес по сравнению с алюминиевыми изделиями аналогичного назначения.

4. Разработки в области FDM и SLS технологий позволят изготавливать детали и конструкции сложной геометрии, применяемые в авиационной технике, за единый технологический цикл с минимальными трудозатратами и количеством отходов.

5. Разработка вибропоглощающих ПКМ создает перспективы для улучшения акустической комфортности пассажирских перевозок и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Литература

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // «Авиационные материалы и технологии». 2012, № 5. С.7-17.

2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий

их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33.

3. Комаров Г.А. Состояние, перспективы и проблемы применения ПКМ в технике // *Полимерные материалы*. 2009. № 2. С. 5-9.

4. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия. 2011. С. 32–33.

5. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Конструкционные материалы на основе армированных термопластов // *Российский химический журнал*. 2010. т. LIV. № 1. С. 30–40.

6. Нефедов Н.И., Кондрашов Э.К., Семенова Л.В., Лебедева Т.А. Эрозионностойкие покрытия для защиты изделий из полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S3. С. 25-27.

7. Краев И.Д., Шульдешов Е.М., Платонов М.М., Юрков Г.Ю. Обзор композиционных материалов, сочетающих звукозащитные и радиозащитные свойства // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №4(45). С. 60–67.

8. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 277–286.

9. Э.Я. Бейдер, Г.Н. Петрова, Т.Ф. Изотова, Е.В. Гуреева. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды // *Труды ВИАМ*. № 11. 2013 г. С. 1.

10. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н. Термопластичные связующие для полимерных композиционных материалов // *Труды ВИАМ*. 2015. №11. С.5

11. Г.С. Головкин. Регулирование механических свойств ПКМ методами целенаправленного формирования межфазной зоны // *Полимерные материалы*. 2009. № 11. С. 26–28.

12. Сорокин А.Е., Бейдер Э. Я., Перфилова Д.Н. Влияние климатических факторов на свойства углепластика на полифениленсульфидном связующем // Труды ВИАМ. 2015. №1. Тр-01-10.

13. Сорокин А.Е., Бейдер Э. Я., Изотова Т.Ф., Николаев Е.В., Шведкова А.К. Исследование свойств углепластика на полифениленсульфидном связующем после ускоренных и натуральных климатических испытаний // Авиационные материалы и технологии. № 3(42). С. 66–72

14. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе. Спб.: Профессия, 2006. 33-346 с.

15. Сорокин А.Е., Афоничева О.В., Краснов А.П., Баженова В.Б., Клабукова Л.Ф., Зюзина Г.Ф. Влияние молекулярной массы и методов переработки на свойства полиарилата ДВ // IX СИМПОЗИУМ. Современная химическая физика. Сборник тезисов. Туапсе, 2011. С. 156–157.

16. Multilayer and composition gradient structures with improved damping properties: pat. 8796164 US; publ. 28.06.2012.

17. Structural composite material with improved acoustic and vibrational damping properties: pat. 8450225 US; 28.05.2013.

18. Polymer composites possessing improved vibration damping: appl. 2012/0313307 US; publ. 13.12.2012.

19. Composite components and heat-curing resins and elastomers: appl. 2012/0034833 US; publ. 09.02.2012.

20. Carbon-fiber reinforced plastic composite having improved vibration damping ability: appl. 20120023948 KR; 14.03.2012.

21. Nagasankar S., Balasivanandha P., Velmurugan R. Influence of the Different Fiber lay-ups on the Damping Characteristics of the Polymer Matrix //Journal of Applied Sciences. 2012. V. 12(10). P. 1071–1074.

22. Rao M.D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes //Journal of Sound and Vibration. 2003. Vol. 262. P. 457–473.

23. Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А., Долгополов С.С. Влияние армирующего слоя на коэффициент механических потерь вибропоглощающих материалов //Пластические массы. 2015. №3-4. С. 13–16.

24. Изоляционная структура для тепловой и акустической изоляции летательного аппарата: RU 2435704, 10.12.2011.

25. Chung D.D.L. Review Materials for vibration damping //Journal of materials science. 2001. №36. P. 5733–5737

26. Systems and methods for reducing noise in aircraft fuselages and other structures: pat. 8,042,768 US; 25.10.2011.

27. Improved composite materials: appl. 2011/0268945 US; publ. 03.11.2011.

УДК 004.94

Определение кинематических параметров раскладчика намоточного станка

Князев Д.Н.¹, к.т.н.; Субботина Е.А.¹

Katy504@yandex.ru

¹*Южно-Российский Государственный Политехнический Университет (НПИ) имени М.И. Платова*

Аннотация:

Метод намотки успешно применяется при изготовлении конструкций различной геометрической формы. При намотке изделий появляются различные ограничения, связанные с их геометрическими параметрами, характеристиками станка и их соотношением. Поэтому целью данной работы является выделение основных кинематических параметров раскладчика, влияющих на возможность изготовления изделий с определенными геометрическими характеристиками. В результате, были выделены основные зависимости между параметрами раскладчика намоточного станка и изделия типа баллон.

Ключевые слова:

намотка, программирование намоточных станков, станки с ЧПУ, размеры раскладчика.

Введение

В настоящее время большое распространение (применение) получили баллоны, изготовленные с использованием композиционных материалов. При их изготовлении хорошо зарекомендовал себя метод непрерывной

намотки. Рассматриваемые изделия могут отличаться геометрической формой и размерами, поэтому различные изделия могут быть допустимы для намотки на одном станке и недопустимы на другом (или эффективность (производительность) данной намотки существенно снижена). Поэтому для того чтобы намотка определенных изделий была допустима на станке и при этом производительность была как можно выше, необходимо для конкретного класса изделий и диапазонов их геометрических размеров иметь возможность выбора кинематических и динамических параметров станка.

В данной статье рассматривается влияние геометрических параметров изделия типа баллон на оптимальные размеры раскладчика намоточного станка.

Описание задачи

Модель рассматриваемого типа станка изображена на рисунке 1.

Исходными данными для определения кинематических параметров станка являются:

- максимальный радиус изделия;
- максимальное расстояние безопасности.

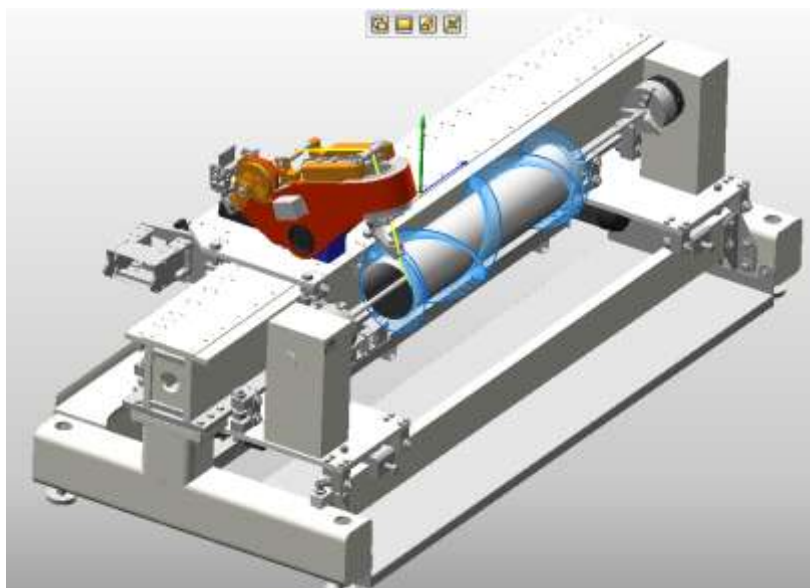


Рис. 1 – Модель рассматриваемого типа станка

Параметры, которые нужно найти:

- длина выходного звена раскладчика (ВЗР);
- длина плеча раскладчика;
- угол наклона оси вращения ВЗР по отношению к плечу раскладчика.

На рисунке 2 изображена кинематическая схема станка, вид сбоку, приняты следующие основные обозначения:

r – максимальный радиус оправки;

s – максимальное расстояние безопасности;

$b = GB = G'B'$ – длина ВЗР;

$a = GA = G'A$ – длина плеча раскладчика;

$\beta = \angle BGA = \angle B'G'A$ – угол наклона оси вращения ВЗР по отношению к

плечу раскладчика.

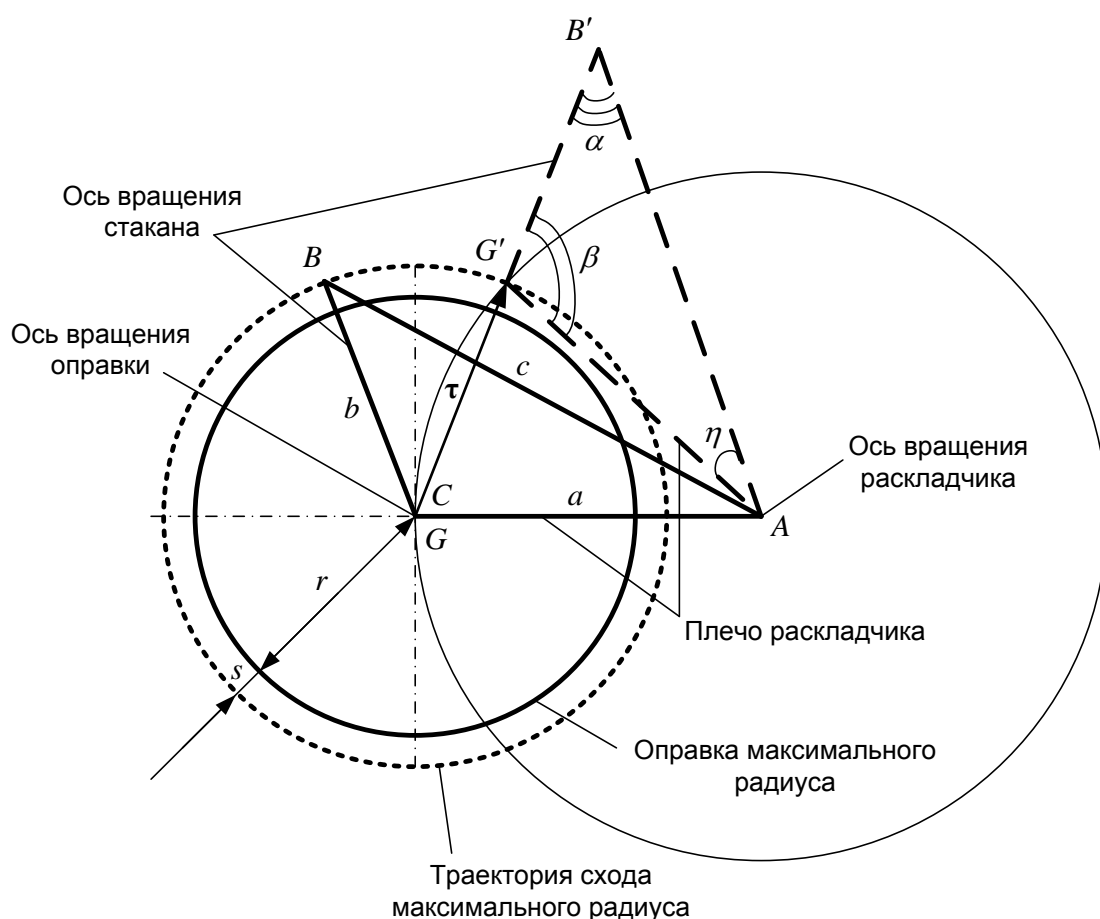


Рис. 2 – Кинематическая схема станка (вид справа)

Решение задачи определения кинематических параметров раскладчика

Длина выходного звена раскладчика должна быть такой, чтобы выходная точка раскладчика касалась оси вращения оправки даже в том случае, когда оправка имеет максимальный радиус и очень крутые днища (рис. 3).

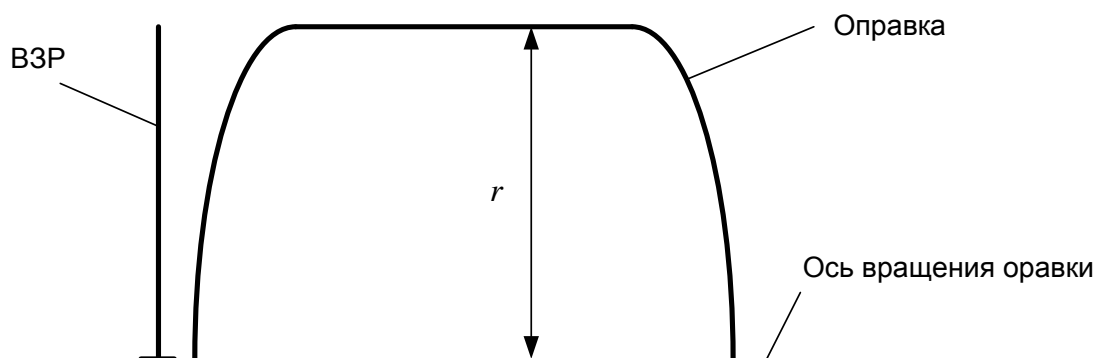


Рис. 3 – К выбору длины ВЗР

Таким образом, длина ВЗР не должна быть меньше радиуса максимального изделия, т.е. должно выполняться условие:

$$b = GB = G'B' \geq r \quad (1)$$

Например, на рисунке 2 принято $b = r + s$.

Длина плеча раскладчика должна быть такой, чтобы выходная точка раскладчика касалась оси вращения оправки. В этом случае намотка будет производиться на минимальном расстоянии от оправки, что позволит уменьшить или исключить провисания на участке между точкой схода и точкой касания и улучшит управляемость лентой в точке касания, в том числе, управляемость ее шириной.

Следовательно, при выборе длины плеча раскладчика необходимо пользоваться условием:

$$a = GA = G'A \geq r + s \quad (2)$$

Угол наклона оси вращения ВЗР по отношению к плечу раскладчика, как показали результаты моделирования, имеет важное значение для формирования работоспособной кинематической схемы станка.

Во-первых, от этого угла зависит наличие/отсутствие отрыва ленты от выходного валка в процессе намотки (рис. 4).

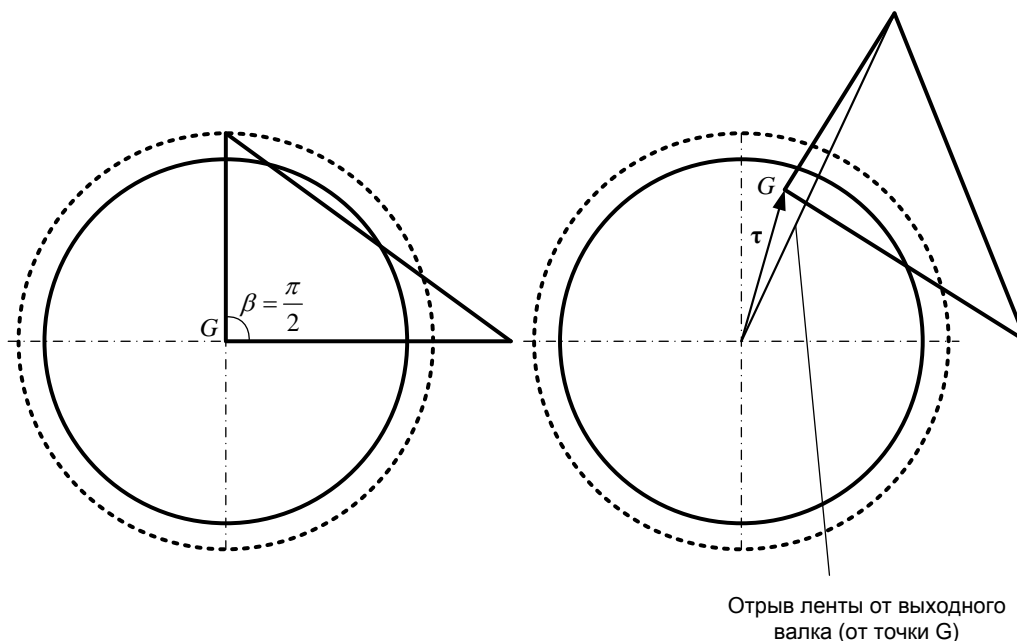


Рис. 4 – К демонстрации отрыва ленты от выходного валка при неудачном выборе угла наклона оси вращения ВЗР по отношению к плечу раскладчика

На рисунке 4 показано, что при необходимости намотки изделия с большим диаметром цилиндрической части и малым полюсным отверстием может возникать отрыв материала от выходного валка при подъеме раскладчика. На рисунке 4 угол $\beta = \frac{\pi}{2}$.

Обратим внимание, что на рисунке 2 штриховой линией показано предельное верхнее положение раскладчика и отрыва не наблюдается.

Отметим, что данная проблема (отрыв материала от выходного валка) может быть решена добавлением в конструкцию ВЗР промежуточного валка.

Во-вторых, угол наклона оси вращения ВЗР по отношению к плечу раскладчика влияет на корректность решения обратной кинематической задачи, а точнее, на правильность ориентации выходного валка в пространстве. Эта зависимость не вполне очевидна и была установлена в результате моделирования и анализа процесса намотки.

Для ориентирования выходного валка в пространстве используется следующее уравнение:

$$\mathbf{T}(C)\Phi\mathbf{p}(Z, A, B) = 0 \quad (3)$$

где Z, A, B, C – обобщенные координаты станка: смещение каретки, наклон раскладчика, поворот выходного звена, поворот оправки соответственно; Φ – вектор касательной к линии укладки, отложенный в системе координат оправки; $\mathbf{p}(Z, A, B)$ – вектор, направленный вдоль выходного валка станка, отложенный в системе координат станка; $\mathbf{T}(C)$ – матрица приведения системы координат оправки к системе координат станка.

Уравнение (3) обосновывается тем, что в процессе намотки необходимо исключить перемещение ленты по выходному валку в его продольном направлении.

При решении уравнения (3) потенциально можно столкнуться со следующими трудностями:

- 1) уравнение (3) имеет множество решений, если вектор Φ оказался сонаправлен оси вращения ВЗР (рис. 5);
- 2) во всех прочих случаях уравнение (3) имеет два решения (рис. 6): $[Z, A, B, C]$ и $[Z, A, B + \pi, C]$.

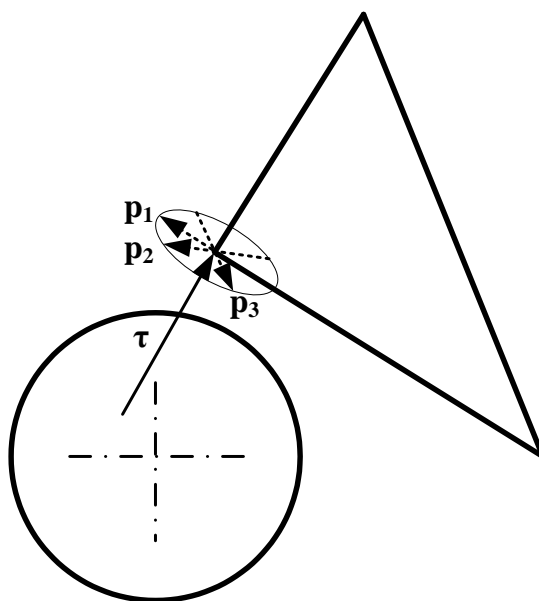


Рис. 5 – Множество допустимых положений векторов \mathbf{p} и Φ

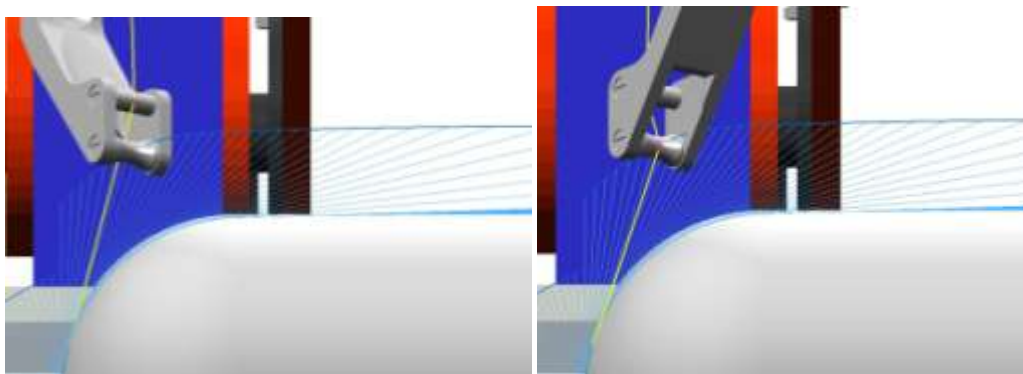


Рис. 6 – Два различных решения уравнения(3)

Результаты моделирования показали, что при некоторых значениях угла β (рис. 2), ни одно из двух решений уравнения (3) не является допустимым. В одном случае ВЗР разворачивается обратной стороной, в другом случае вблизи полюсных отверстий возникает перекручивание ленты.

Поэтому предлагается следующая процедура определения угла β .

Считаем, что значения b и a выбраны в соответствии с условиями (1) и (2).

Тогда

$$\cos \beta = \frac{b^2 + a^2 - c^2}{2ab}, \quad (4)$$

$$\text{где } c = \sqrt{(r+s+b)^2 + a^2 - 2(r+s+b)a \cos \angle B'CA}, \quad \cos \angle B'CA = \frac{r+s}{2a}.$$

Предполагается, что данная процедура позволит получить такую кинематическую схему станка, при которой из двух найденных решений уравнения (3) одно обязательно будет допустимым.

Выполнив подстановку, получим:

$$\begin{aligned} c &= \sqrt{(r+s+b)^2 + a^2 - 2(r+s+b)a \frac{r+s}{2a}} = \\ &= \sqrt{r^2 + s^2 + b^2 + 2rs + 2rb + 2sb + a^2 - r^2 - 2rs - s^2 - rb - sb} = \sqrt{b^2 + rb + sb + a^2} \\ \cos \beta &= \frac{b^2 + a^2 - b^2 - rb - sb - a^2}{2ab} = -\frac{r+s}{2a} \end{aligned}$$

Введем коэффициент k , показывающий отношение длины раскладчика a к радиусу максимальной траектории схода, т.е. $k = \frac{a}{r+s}$, учитывая (2),

получим что при $k \geq 1$:

$$\cos \beta = -\frac{1}{2k}$$

На рисунке 7 изображен график зависимости угла β от выбора коэффициента k на отрезке $k \in [1;3]$.

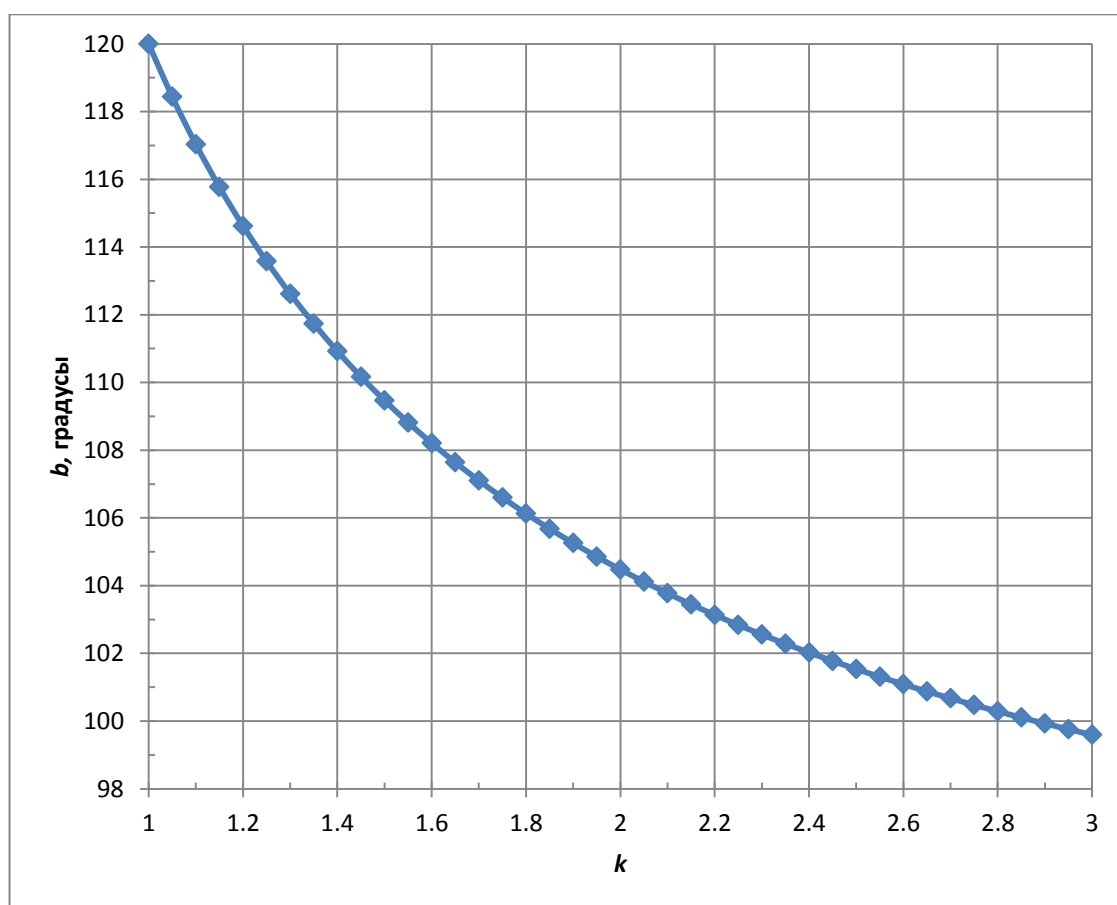


Рис. 7 – График $\beta(k)$

Рассмотрим пример расчета траекторий рабочих органов на конкретном изделии и с конкретной кинематикой станка.

График расстояния от точек траектории схода нити (ТСН) до оси вращения оправки представлен на рисунке 8.



Рис. 8 – График зависимости расстояния точек ТТСН до оси вращения оправки от номера точки

Произведем расчеты для данного случая, т.е. $r + s = 128,4$ мм.

Рассмотрим три варианта кинематики с разной длиной раскладчика, при этом расчет траекторий движения рабочих органов будем производить для ТТСН приведенной выше.

Последовательность действий для каждой длины раскладчика:

1. Вычисляем коэффициент k и минимальный угол β , при котором обратная задача кинематики должна решаться корректно
2. Рассматриваем решение обратной задачи кинематики, а именно, график координаты вращения ВЗР для изначального угла β_1 , для углов немного меньше и больше минимально достаточного угла, но близких к нему ($\beta_2 > \beta$ и $\beta_3 < \beta$)

1. Длина раскладчика $a = 309,43$ мм

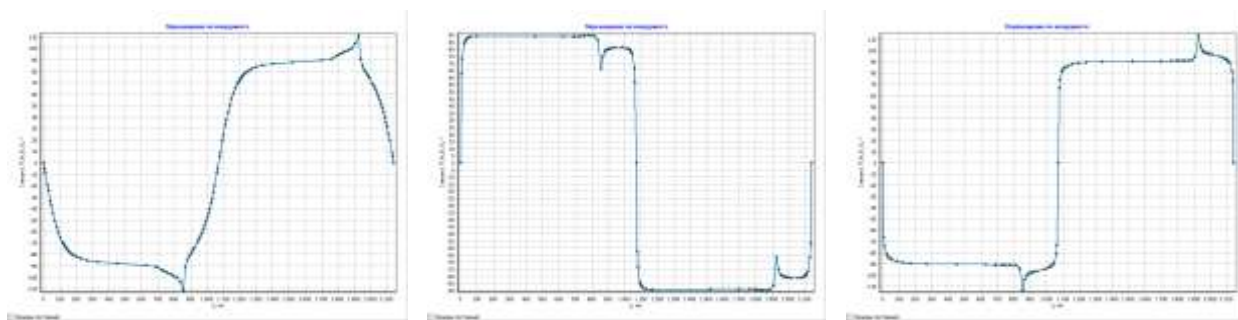
$$k = \frac{309,43}{128,4} = 2,4$$

$$\text{Следовательно, } \beta = \arccos\left(-\frac{1}{2 \cdot 2,4}\right) = 102(^{\circ})$$

Изначально угол $\beta = 71,24^{\circ}$.

При этом график изменения координаты вращения ВЗР приведен на рисунке 9а.

При наклоне $\beta = 102,74^\circ$ график координаты вращения ВЗР приведен на рисунке 9б, при $\beta = 100,24^\circ$ - на рисунке 9в.



а) $\beta = 71,24^\circ$

б) $\beta = 102,74^\circ$

в) $\beta = 100,24^\circ$

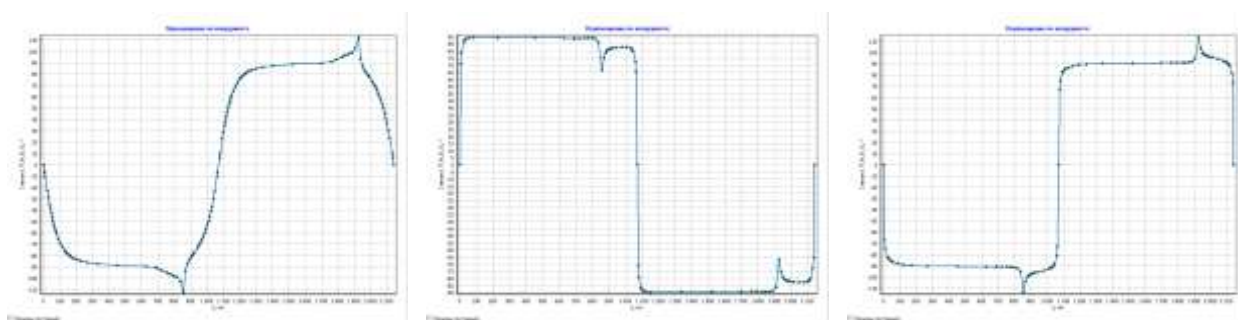
Рис. 9 – Графики изменения координаты вращения ВЗР при различных углах β

2. Изменим длину раскладчика до $a = 373,5$ мм

$$k = \frac{373,5}{128,4} = 2,9$$

$$\text{Следовательно } \beta = \arccos\left(-\frac{1}{2 \cdot 2,9}\right) = 99,9^\circ$$

При угле $\beta = 74,5^\circ$ график изменения координаты вращения ВЗР приведен на рисунке 10а, при $\beta = 100^\circ$ – на рисунке 10б, при $\beta = 98^\circ$ – на рисунке 10в.



а) $\beta = 74,5^\circ$

б) $\beta = 100^\circ$

в) $\beta = 98^\circ$

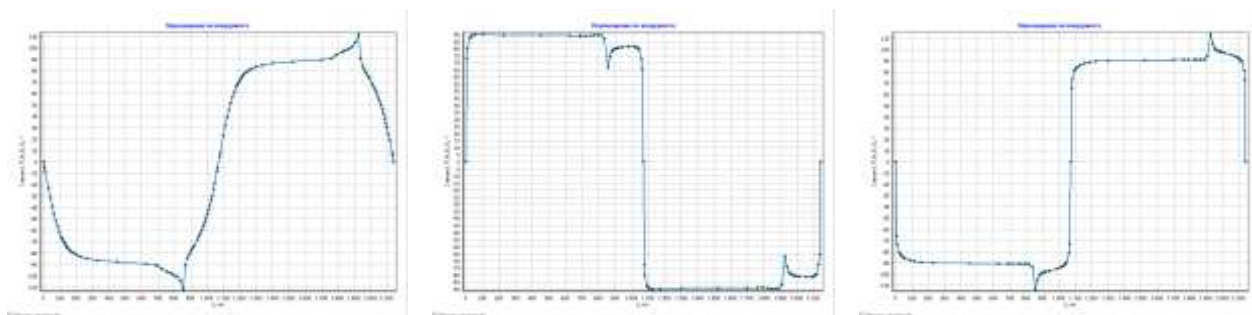
Рис. 10 – Графики изменения координаты вращения ВЗР при различных углах β

3. Изменим длину раскладчика до $a = 287,75$ мм

$$k = \frac{287,75}{128,4} = 2,24$$

$$\text{Следовательно } \beta = \arccos\left(-\frac{1}{2 \cdot 2,24}\right) = 102,9(^{\circ})$$

При угле $\beta = 69,77^{\circ}$ график изменения координаты вращения ВЗР приведен на рисунке 11а, при $\beta = 103^{\circ}$ – на рисунке 11б, при $\beta = 101^{\circ}$ – на рисунке 11в.



а) $\beta = 69,77^{\circ}$

б) $\beta = 103^{\circ}$

в) $\beta = 101^{\circ}$

Рис. 11 – Графики изменения координаты вращения ВЗР при различных углах β

Таким образом, после выбора трех различных значений длины раскладчика, можно сделать вывод о том, что данный способ применим для расчета угла (однако, его следует округлять в большую сторону) наклона оси вращения ВЗР по отношению к плечу раскладчика для корректного решения обратной задачи кинематики.

Моделирование формообразования T-образных фитингов методом автоматизированной намотки

Устинова Е.С.¹

la_scrella@mail.ru

¹НИИ ВИУС Южно-Российский Государственный Политехнический Университет (НПИ) имени М.И. Платова

Аннотация:

В настоящее время элементы бортовых систем космических аппаратов (КА) производят из ПКМ, но соединительные элементы сложной геометрической формы (тройники, крестовины и уголки) производятся из металла, что увеличивает вес конструкции. Разнородность материалов может ухудшать эксплуатационные характеристики КА, например, негативно влиять на радиотехнические характеристики антенн при температурной деформации. Метод автоматизированной намотки позволяет получать изделия из волокнистых ПКМ, не уступающие по прочностным характеристикам металлическим, но в разы легче. В настоящей работе рассматривается проблема применения метода намотки для изготовления двухосевой поверхности T-образного фитинга.

Ключевые слова:

метод намотки, намоточный станок, схема армирования, тройник, T-образный фитинг, выходное звено.

Производство изделий методом намотки осуществляется на специализированных намоточных станках (НС) с числовым программным управлением. Этапы подготовки управляющих программ (УП) намотки включают в себя: конструирование модели технологической оправки, конструирование схемы армирования, расчет траектории движения выходного звена НС, расчет перемещений рабочих органов НС и формирование текста УП намотки.

Применительно к моделированию формообразования Т-образных фитингов подробно рассмотрим два ключевых этапа подготовки УП намотки: моделирование технологической оснастки и конструирование схемы армирования.

Традиционно модель оболочки наматывания представляется в параметрическом виде одним уравнением $\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v)$. Однако к поверхности Т-образного фитинга такая простая модель неприменима. Тройник в предлагаемой модели является составной поверхностью. В результате сравнения нескольких моделей Т-образного фитинга выбор был сделан в пользу составной поверхности из следующих фрагментов: цилиндра, тора и плоскости (рис. 1).

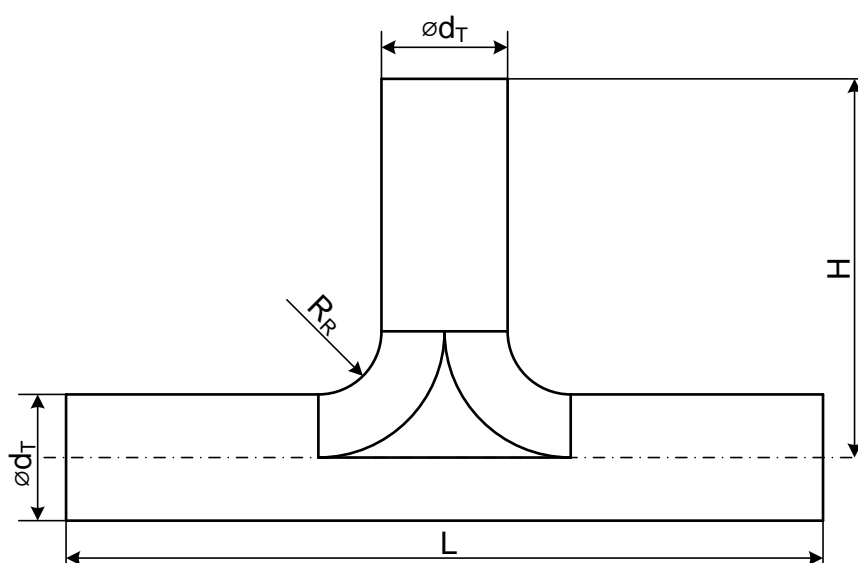


Рис. 1 – Модель Т-образного фитинга

При конструировании модели доступны для изменения следующие параметры:

R_R – радиус скругления,

d_T – диаметр цилиндра,

R_T – радиус цилиндра,

H – высота,

L – длина.

Для описания поверхностей, входящих в состав Т-образного фитинга используются следующие уравнения:

1. Горизонтальный цилиндр

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \begin{bmatrix} R_T \cos(v) \\ R_T \sin(v) \\ u - \frac{L}{2} \end{bmatrix},$$

где $u \in [0; L]$, $v \in [0; 2\pi]$;

2. Вертикальный цилиндр

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \begin{bmatrix} u \\ R_T \cos(v) \\ R_T \sin(v) \end{bmatrix},$$

где $u \in [R_T + R_R; H]$, $v \in [0; 2\pi]$;

3. Сегмент тора слева со смещенным центром

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \begin{bmatrix} (R_R + R_T - R_T \cos(v)) \sin(u) + R_R + R_T \\ R_T \sin(v) \\ (R_R + R_T - R_T \cos(v)) \cos(u) - R_R - R_T \end{bmatrix},$$

где $u \in \left[\frac{3\pi}{2}; 2\pi \right]$, $v \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right]$;

4. Сегмент тора справа со смещенным центром

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \begin{bmatrix} (R_R + R_T - R_T \cos(v)) \sin(u) + R_R + R_T \\ R_T \sin(v) \\ (R_R + R_T - R_T \cos(v)) \cos(u) + R_R + R_T \end{bmatrix},$$

$$\text{где } u \in \left[\pi; \frac{3\pi}{2} \right], v \in \left[-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2} \right];$$

5. Передняя плоскость

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \begin{bmatrix} v \\ R_T \\ -u + R_R + R_T \end{bmatrix},$$

$$\text{где } u \in [0; 2(R_R + R_T)], v \in [0; R_R + R_T];$$

6. Задняя плоскость

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \begin{bmatrix} v \\ -R_T \\ u - R_R - R_T \end{bmatrix},$$

$$\text{где } u \in [0; 2(R_R + R_T)], v \in [0; R_R + R_T];$$

Преимущество предложенной модели состоит в том, что она допускает сравнительно простой способ таких значений параметров поверхности Т-образного фитинга, при которых обеспечивается высокая технологичность метода намотки.

На сегодняшний день не существует строго определенного порядка построения схемы армирования для Т-образного фитинга. Очевидно, схема армирования должна обеспечивать устойчивость к определенным внешним нагрузкам. Однако, разработка модели НДС для изделия из ПКМ столь сложной геометрической формой затруднительна. Поставим задачу конструирования множества технологически реализуемых схем армирования, чтобы из полученной совокупности схем выбрать оптимальную схему в смысле НДС. К схеме армирования предъявляются следующие технологические требования: 1) линии схемы должны строиться с учетом технологической устойчивости материала на поверхности изделия; 2) линии схемы должны быть выпуклыми; 3) схема должна быть непрерывной. Автором предлагается построение схемы, состоящей из нескольких семейств линий укладки, описанных ниже.

Семейство линий укладки для подъёма на вертикальный цилиндр (рис. 2а). Линии укладки этого семейства берут своё начало на горизонтальном цилиндре с углом намотки 90° , после чего начинается

постепенный разворот линии до 50° . С этим углом линии заходят на плоскость между торами, а затем на поверхность тора. После тора линии переходят на вертикальный цилиндр, а затем в направлении верхней части цилиндра происходит постепенный разворот линии к 90° .

Семейство линий укладки для спуска на горизонтальный цилиндр (рис 2б). Линии укладки этого семейства берут своё начало на вертикальном цилиндре с углом намотки 90° , после чего начинается постепенный разворот линии в направлении нижней части цилиндра до 45° . С этим углом линии заходят на тор, либо на тор, а затем на плоскость между торами. После чего на вертикальный цилиндр, где некоторое время сохраняется угол намотки 50° в направлении одного из концов цилиндра, а затем происходит постепенный разворот линии к 90° .

Семейство линий для огибания вертикального цилиндра (рис.2в). Линии укладки выходят с углом намотки 90° с горизонтального цилиндра и разворачиваются до пересечения с плоскостью между участками тора. С плоскости линии переходят на тор, где разворачиваются до угла в 90° на оси симметрии тройника. Далее в обратном порядке: переход с тора на плоскость, с плоскости на горизонтальный цилиндр, по направлению к началу линий происходит разворот до 90° .

Семейство линий для перехода с одной стороны горизонтального цилиндра на другую (рис. 2г). На одном конце цилиндра линии укладки выходят с углом намотки 90° и медленно разворачиваются до достижения угла намотки 52° . В центральной нижней части цилиндра данный угол намотки сохраняется. После прохождения центральной части начинается разворот линий до 90° .

Для перехода от линий одних семейств к линиям других семейств используются соединительные линии (рис. 2д), которые задают переход из точки линии укладки с углом намотки 90° на некотором сечении цилиндра в точку линии укладки с углом намотки в 90° на другом сечении этого цилиндра.

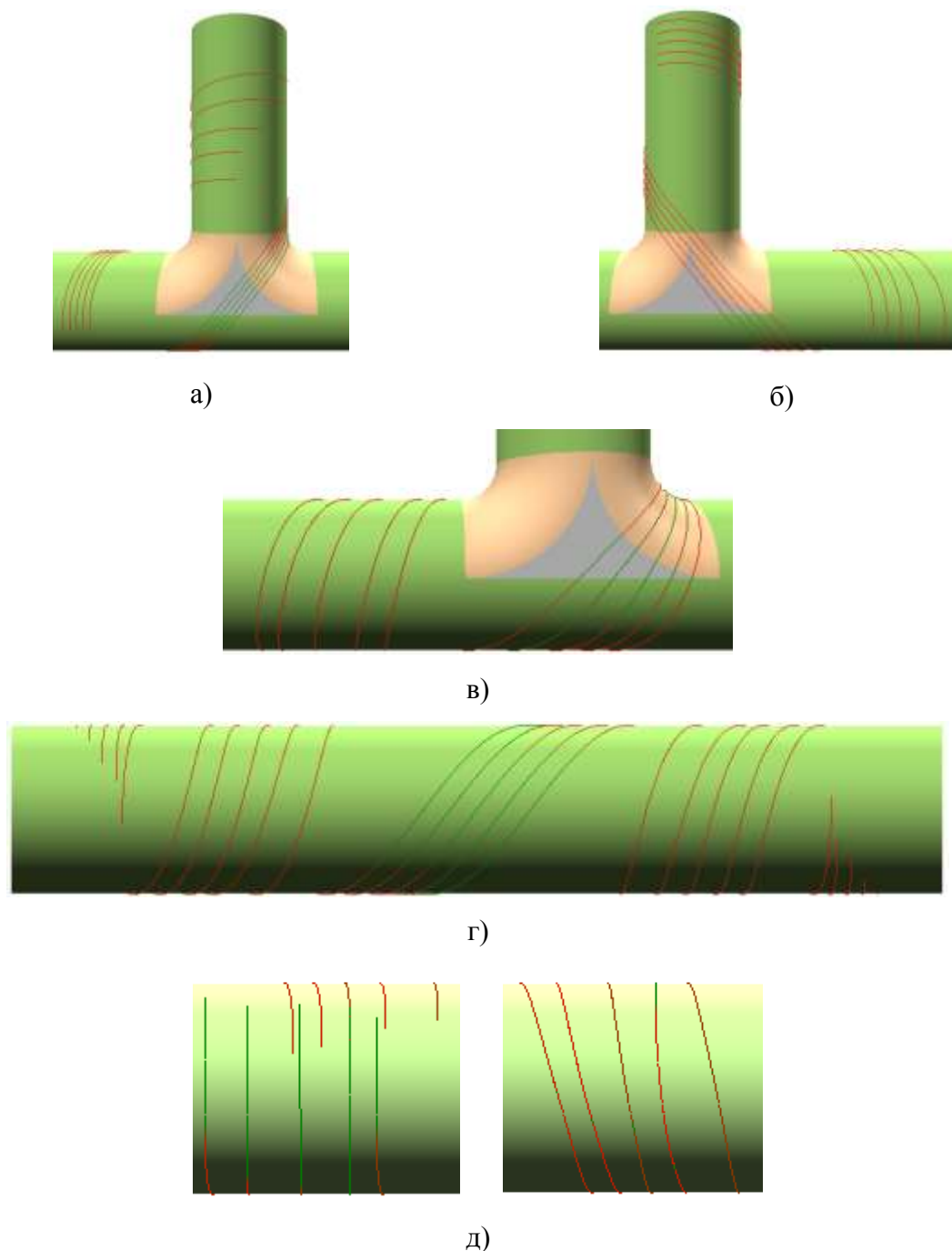


Рис. 2 – Виды семейств линий укладки

Для составления схемы армирования тройника строятся несколько экземпляров семейств линий укладки, что позволяет достичь условия симметричности схемы. На рисунке 3 представлены соответственно: четыре экземпляра семейства линий укладки для подъёма, четыре для спуска, два для огибания и два для перехода.

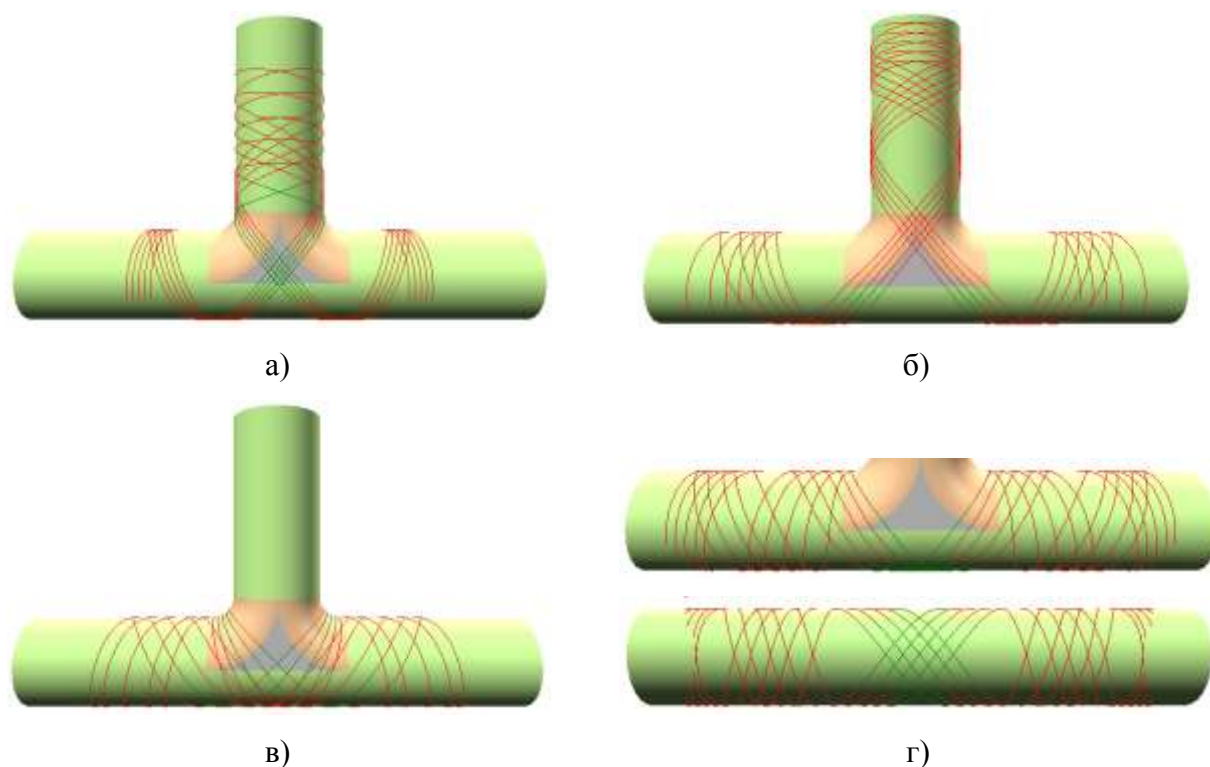
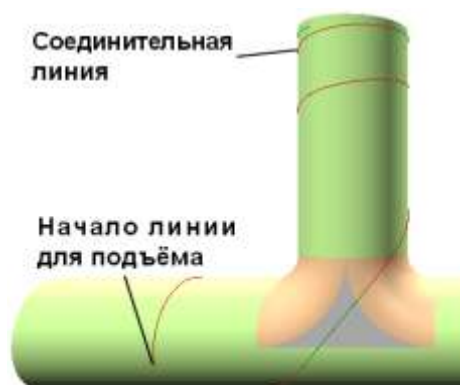
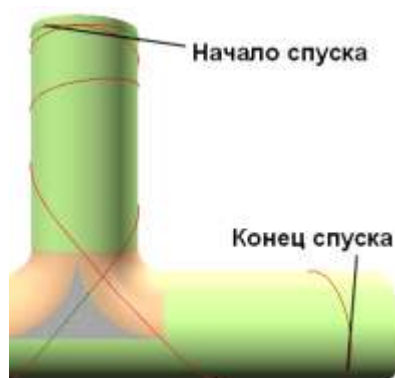


Рис. 3 – Экземпляры семейств схемы армирования

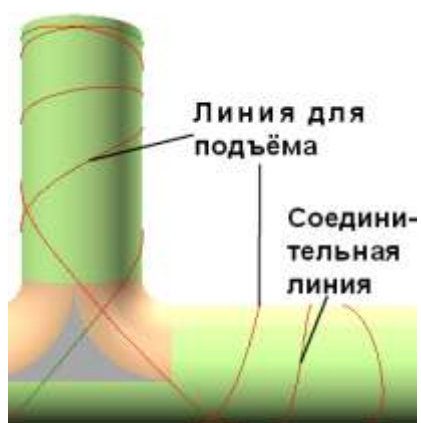
После построения всех необходимых семейств линий укладки, необходимо соединить линии укладки из различных семейств согласно технологической последовательности намотки тройника. Количество линий укладки в каждом экземпляре семейства совпадает и является числом проходов технологической последовательности. Проиллюстрируем этапы формирования последовательности на рисунке 4.



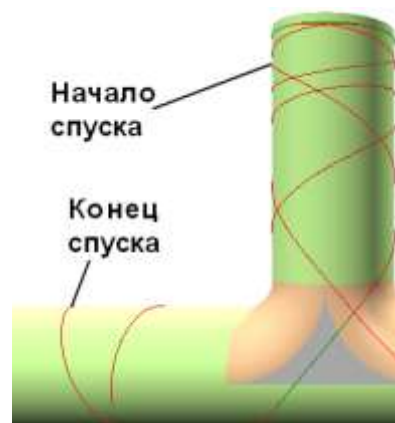
а) Линия укладки для подъёма



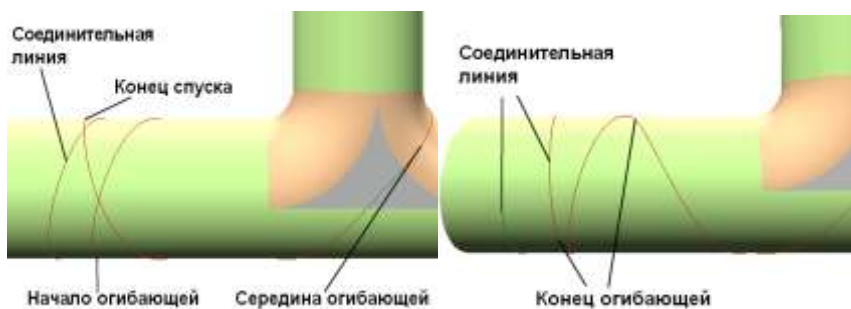
б) Линия укладки для спуска



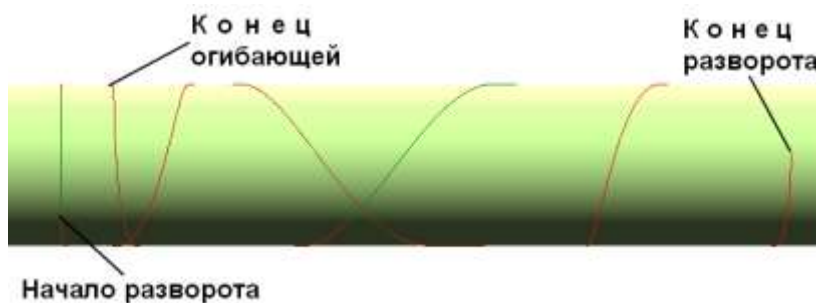
в) Линия укладки для подъёма



г) Линия укладки для спуска



д) Огибающая линия укладки



е) Линия укладки для разворота

Рис. 4 – Последовательность линий укладки

Последовательность линий укладки для намотки тройника:

1. Линия укладки для подъёма с левой стороны горизонтального цилиндра на вертикальный через переднюю плоскость (рис. 4а).
2. Линия укладки для спуска с вертикального цилиндра на правую сторону горизонтального через переднюю часть тройника (рис. 4б).
3. Линия укладки для подъёма с правой стороны горизонтального цилиндра на вертикальный через заднюю плоскость (рис. 4в).
4. Линия укладки для спуска с вертикального цилиндра на левую сторону горизонтального через заднюю часть тройника (рис. 4г).
5. Линия укладки, огибающая вертикальный цилиндр справа (рис. 4д).
6. Линия укладки для перехода с левой стороны горизонтального цилиндра на правую (рис. 4е).

Затем последовательность повторяется зеркально, начиная с правой стороны.

Между всеми линиями, указанными в последовательности намотки, присутствуют соединительные линии, которые в последовательности не указываются.

Полная схема армирования Т-образного фитинга приведена на рисунке 5.

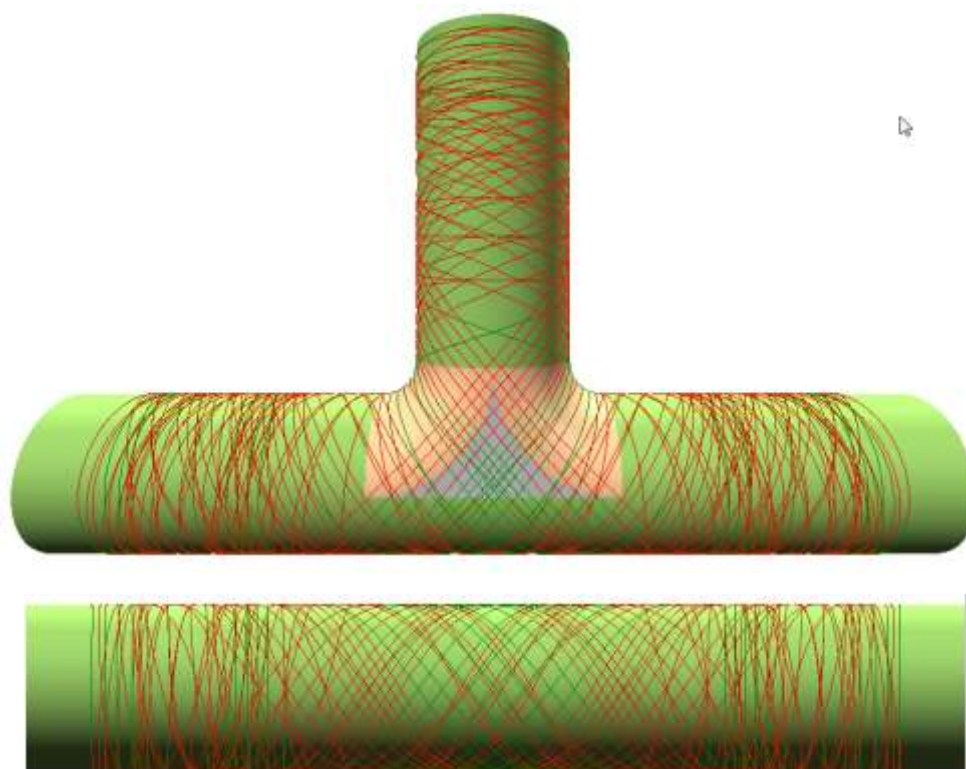


Рис. 5 – Схема армирования Т-образного фитинга

На этапе конструирования схемы армирования нет возможности обнаружить и учесть все ограничения метода непрерывной намотки. Одна из трудностей проявляется при попытке построить траекторию движения выходного звена НС. Состоит она в том, что линейчатая поверхность касательных к линиям схемы армирования потенциально может пересечь поверхность фитинга (рис. 6). Для исключения такого пересечения необходимо скорректировать схему армирования и повторить расчет линейчатой поверхности для визуального контроля коллизии.

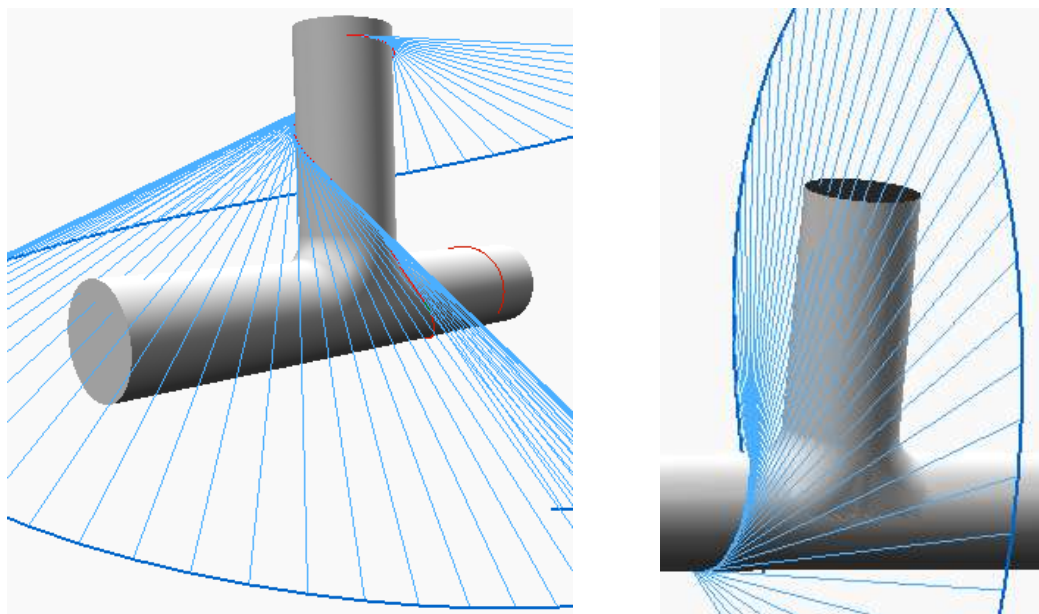


Рис. 6 – Пересечение линейчатой поверхности с поверхностью оправки

Чтобы избежать пересечения можно уменьшить расстояние от точки линии укладки до выходного звена, если его конфигурация позволяет приблизиться к оправке без столкновений. В ином случае лучше отказаться от линии укладки, которая порождает подобное пересечение, и получить более удачную. Проведенные исследования показали, что на участках линии укладки, порождающих пересечение, лучше придерживаться угла намотки близкого к 90° .

Ещё одна задача заключается в конструировании подходящей кинематической схемы намоточного станка для формообразования Т-образного фитинга. Эта задача ещё не решена. Использование традиционных схем, которые применяются, например, в современных намоточных станках фирмы «НПП ВИУС», приводит к необходимости прерывания намотки для перестановки оправки, либо к скручиванию ленточного материала. Поиск технологичной кинематической схемы продолжается.



Рис. 7 – Фрагмент намотки горизонтальной части фитинга

На рисунке 7 представлен фрагмент намотки горизонтальной части фитинга на универсальном четырехкоординатном намоточном станке, ориентированном на оболочки вращения.

УДК 667

Интенсификация процессов получения композиционных материалов в аппаратах вихревого слоя

Феоктистова Е.П.¹; Захарычев Е.А.¹, к.х.н.;

Войтович В.А.¹, к.т.н.; Шварев Р.Р.¹

petr0430@mail.ru; zakharychev@list.ru; voit32@mail.ru; rus.shwarev@yandex.ru

¹ *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (НИИ химии Нижегородского университета), г. Нижний Новгород,*

Аннотация:

Проведены исследования по интенсификации процессов получения композиционных полимерных материалов в аппаратах вихревого слоя на примере модельных лакокрасочных систем с различными порошковыми пигментами и наполнителями.

Ключевые слова:

композиционный материал, аппарат вихревого слоя

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших технологических задач, относящихся к процессам получения полимерных композиционных материалов, является качественное диспергирование частиц пигментов и наполнителей в вязком связующем. В зависимости от требований, предъявляемых к конечному продукту, в настоящее время в промышленности для реализации данного процесса используются различные аппараты. При этом выбор такого оборудования

может существенным образом влиять как на качество получаемых материалов, так и на их себестоимость.

В данное время в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» в лаборатории полимерных материалов НИИ химии ННГУ им. Н.И. Лобачевского ведутся работы по применению так называемых аппаратов вихревого слоя для процессов диспергирования пигментов и наполнителей в вязких полимерных связующих.

Не смотря на то, что данное оборудование пока еще не получило широкого распространения, в последние годы в научной среде наблюдается оживление интереса к таким аппаратам. Например, работы [1–4] посвящены использованию аппаратов вихревого слоя (АВС) для улучшения свойств цементов и бетонов, [5] – для получения ангидритовых вяжущих, [6–9] с целью – интенсификации процессов получения биодизельного топлива, [10] – для повышения прочности резин при механоактивации углеродных наполнителей.

Результаты исследований, приведенные в докладе показывают перспективность применения рассматриваемых аппаратов для получения лакокрасочных материалов, клеев, компаундов и других полимерных материалов, а так же для тонкого помола входящих в их состав пигментов и наполнителей.

Внешний вид установки АВС, используемой в данной работе, представлен на рис.1, где (1) – блок управления, (2) – система охлаждения, (3) – корпус, внутри которого располагается индуктор, создающий вращающееся магнитное поле, (4) – вставка труба, внутренний объем которой является рабочей камерой аппарата, (5) – ферромагнитные рабочие тела. Основным узлом рассматриваемой установки является корпус (3), устройство которого более подробно отражено на рис. 2.

Подачу обрабатываемого материала в активную зону аппарата возможно осуществлять следующими способами: 1) с помощью насоса, перекачивая материал непосредственно через рабочую камеру (проточный режим); 2) с помощью специального рабочего стакана (использовался в данной работе), в который помещается навеска обрабатываемого материала с ферромагнитными телами, после чего сам стакан вставляется в рабочую камеру (периодический режим).

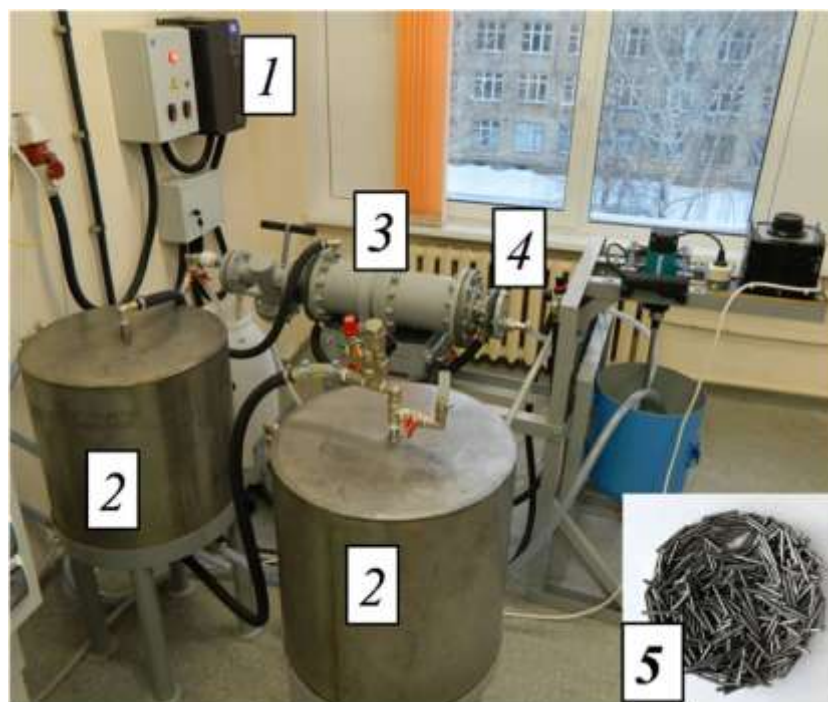


Рис. 1 – Внешний вид АВС: 1 – блок управления; 2 – система охлаждения; 3 – корпус (внутри которого располагается обмотка, создающая вращающееся электромагнитное поле); 4 – вставка-труба (внутренний объем которой является рабочей камерой аппарата), 5 – ферромагнитные рабочие тела

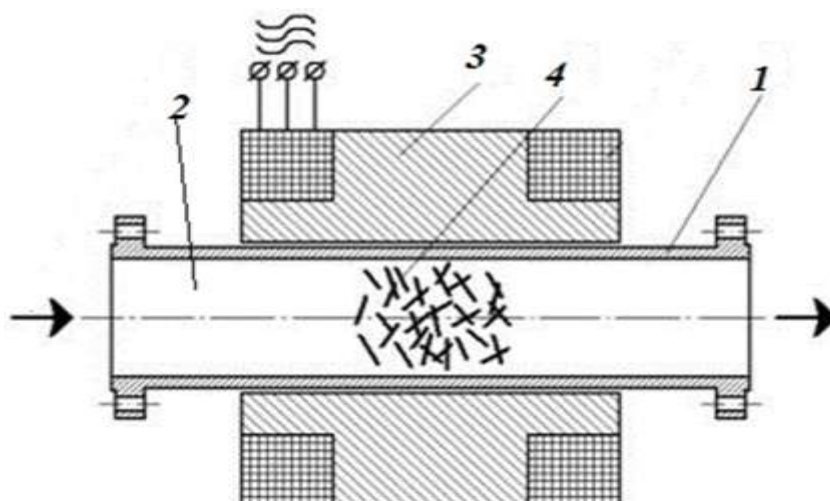


Рис. 2 – Принципиальная схема аппарата с вихревым слоем: 1 – корпус (цилиндр из немагнитного материала), 2 – рабочая камера, 3 – индуктор, создающий вращающееся магнитное поле, 4 – рабочие ферромагнитные тела

Принцип работы АВС заключается в том, что совокупность рабочих тел, вращающихся и соударяющихся в магнитном поле, образует вихревой слой, в котором с достаточно высокой степенью эффективности возможно осуществлять различные процессы.

АВС обладает рядом преимуществ, среди которых в первую очередь необходимо отметить следующие: 1) отсутствуют узлы трения, требующие постоянного ухода; 2) практически исключается возможность раскола рабочих тел при их соударении в процессе обработки различных материалов; 3) используется небольшое количество рабочих тел, на отмывку которых требуется не так много (по сравнению с другими аппаратами) сил и средств, и в результате чего в несколько раз уменьшается количество загрязненных стоков. Таким образом, неоспоримые достоинства АВС делают данное оборудование выгодным как с экономической, так и с экологической точки зрения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Методы исследования

1.1. Методика обработки материалов в АВС

В рабочую емкость (стакан) из нержавеющей стали помещали рассчитанное количество цилиндрических ферромагнитных тел из закаленной стали ШХ-15 (диаметр 2 мм, длина 20 мм) и необходимое количество исследуемого материала (сыпучего или жидкого). После чего закрывали стакан крышкой, встряхивали его для равномерного распределения рабочих тел и рассматриваемой системы, помещали в рабочую камеру АВС, где осуществлялась обработка.

1.2. Методика обработки материалов в бисерной мельнице

В качестве бисерной мельницы использовали лабораторную диспергирующую установку ЛДУ – 3 МПР с тройной роторной мешалкой; в качестве рабочих тел использовали стеклянный бисер диаметром около 4 мм. Все эксперименты проводили в периодическом режиме. После загрузки рабочей емкости бисером и исследуемым материалом ее закрепляли на установке, включали питание, начиналась обработка материала.

1.3. Методика определения гранулометрического состава

Для определения гранулометрического состава исследуемых материалов использовали лазерный дифракционный анализатор размеров частиц Shimadzu SALD-2300. Измерения проводили следующим образом: небольшое количество сыпучего или жидкого материала диспергировали в воде в присутствии неионогенного ПАВа с помощью высокоскоростной мешалки и ультразвука. Полученная суспензия прокачивалась через измерительную ячейку прибора, где анализировалась по рассеиванию излучения красного лазера. Результатом измерений являлись данные по массовому распределению частиц по размерам.

1.4. Методика проведения микроскопических исследований

Микроснимки исследуемых сыпучих материалов получали с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-IT300LV. Образцы для микроскопии готовили путем нанесения исследуемых порошков на углеродный скотч, закрепленной на алюминиевой подложке.

1.5. Методика определения степени перетира

Испытания проводили на гриндометрах «Клин-15», «Клин-50», «Клин-150» согласно ГОСТу 31973-2013: образец исследуемого материала помещали в глубокий конец паза в количестве, достаточном для полного его заполнения. Скребок устанавливали перпендикулярно к поверхности плиты за помещенным в пазе материалом. С небольшим нажимом скребок перемещали под углом 90° по измерительной поверхности с равномерной скоростью в течение 1-3 с от максимального значения шкалы за нуль, при этом паз полностью заполнялся испытуемой системой. Поверхностный слой

сразу же осматривали на свету. Степень перетира определяли по верхней границе полосы шириной 3 мм в поперечном направлении к пазу, на которой были видны от 5 до 10 частиц, или по месту появления третьего непрерывного штриха, достигающего по глубине до металла.

2. Результаты и обсуждения

При исследовании возможностей рассматриваемого нами аппарата, представляло интерес в первую очередь испытать его в процессах сухого помола различных порошковых наполнителей, т.е. в процессах, осуществляемых в воздушной среде, которая имеет минимальную вязкость, и где скорость движения и сила соударения рабочих тел максимальна. Для данных исследований были подобраны минеральные материалы с разной твердостью по шкале Мооса: диатомит (6-7), портландцемент (5,5-6,5), доломит (4), микромрамор (КМ-60, КМ-100)(3), мел ММС-2 (1).

Все материалы обрабатывали на АВС в течение определенных интервалов времени, затем исходные и измельченные образцы исследовали на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц. На основании

полученных данных по гранулометрическому составу (таблица 1, таблица 2) были сделаны выводы о достаточно быстром уменьшении, как среднего, так и максимального размеров частиц исследуемых материалов со временем обработки. Причем скорость измельчения оказалась тем выше, чем больше исходный размер частиц.

Таблица 1

Значение гранулометрического параметра D_{50} (мкм)
для разных времен обработки исследуемых материалов

Материал	Время обработки в АВС, с			
	0	20	60	180
Мел ММС-2	2,907	2,718	2,424	1,686
Микрорамор КМ-60	21,898	14,428	7,766	6,578
Микрорамор КМ-100	29,239	21,056	11,058	6,787
Доломит	27,245	17,66	7,656	4,539
Портландцемент	23,646	18,970	13,174	8,811
Диатомит	11,748	12,157	10,793	8,421

Прим.: D_{50} – диаметр частиц, по отношению к которому 50% всех частиц пробы по массе будут мельче, мкм;

Таблица 2

Значение гранулометрического параметра D_{98} (мкм) для разных времен обработки исследуемых материалов

Материал	Время обработки в АВС, с			
	0	20	60	180
Мел ММС-2	12,456	12,926	11,611	7,13
Микрорамор КМ-60	80,993	53,42	39,99	38,776
Микрорамор КМ-100	132,548	113,936	97,777	70,595
Доломит	98,009	66,722	40,52	30,382
Портландцемент	120,257	92,540	66,113	31,034
Диатомит	89,946	75,469	64,244	39,307

Прим.: D_{98} – диаметр частиц, по отношению к которому 98% всех частиц пробы по массе будут мельче, мкм.

Возможности АВС для сухого измельчения также наглядно продемонстрированы на примере кварцевого песка. На рис. 3. представлены микроснимки образцов до обработки в АВС и после трех минут измельчения. Было установлено, что за это время медианный диаметр частиц песка уменьшился с 235 до 7,5 мкм, а максимальный – с 550 до 113 мкм. За 15 минут обработки можно достичь среднего размера частиц около 1 мкм.

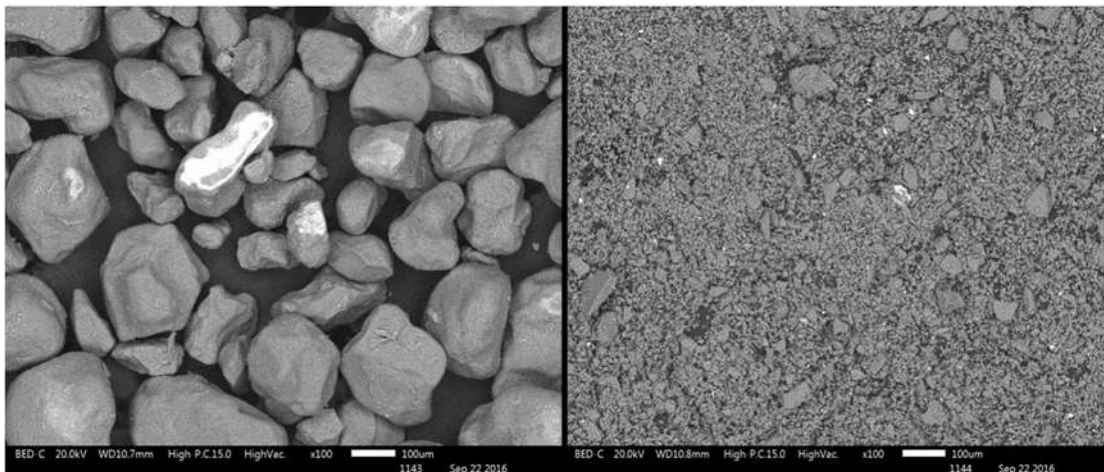


Рис. 3 – Микроснимки образцов кварцевого песка в исходном состоянии (слева) и после измельчения в АВС в течение 3 мин (справа)

Для исследования эффективности процессов диспергирования различных пигментов и наполнителей в полимерном связующем, было получено несколько модельных лакокрасочных систем, для приготовления каждой из которых использовали один из следующих наполнителей или пигментов: диоксид титана пигментный TiO_x -220, каолин МИКАО-02-98, микротальк фракционированный 03-96, микромрамор КМ-2. Вязкость таких систем составляла 5000–10000 мПа·с.

В процессе обработки вышеуказанных систем в АВС через некоторые интервалы времени осуществлялся отбор проб для исследования в них гранулометрического состава пигментов и наполнителей. Полученные экспериментальные данные позволили сделать вывод, что со временем обработки в АВС размер первичных частиц диспергируемых материалов практически не изменяется. Так, например гранулометрический состав

модельной лакокрасочной системы с диоксидом титана, обработанной на АВС в течение трех минут, следующий: медианный диаметр частиц – $0,6\pm 0,1$ мкм, максимальный диаметр частиц – $1,9\pm 0,3$ мкм. Представленные значения практически совпадают с данными по гранулометрическому составу сухого исходного пигмента: медианный диаметр частиц – $0,6\pm 0,1$ мкм, максимальный диаметр частиц – $1,4\pm 0,2$ мкм.

Но измельчение первичных кристаллов и кристаллических сростков частиц порошковых компонентов не является целью обработки рассматриваемых систем в АВС. Для получения качественного материала требуется обеспечить лишь равномерное диспергирование агломератов первичных частиц в объеме вязкой системы. Поэтому нами были проведены эксперименты по определению степени перетирания пигментов и наполнителей в модельных лакокрасочных системах, т.к. данный параметр отражает максимальный размер агломератов частиц.

Представляло интерес осуществлять обработку исследуемых материалов параллельно в АВС и бисерной мельнице (БМ). Бисерная мельница была выбрана как аппарат, близкий по областям применения к рассматриваемой нами установке, с целью сравнения их возможностей в процессах измельчения и диспергирования.

На основе экспериментальных значений были построены графические зависимости, иллюстрирующие скорость разрушения агломерат первичных частиц пигментов и наполнителей в вязкой системе, при их параллельной обработке в АВС и в БМ. (рис. 4).

Представленные графические зависимости демонстрируют большую производительность АВС, т.к. для модельных систем с каолином, микроамором и микротальком максимальная степень дисперсности, которую возможно достичь на бисерной мельнице, достигается до 2–2,5 раз быстрее на рассматриваемом нами аппарате. Для системы с диоксидом титана временное преимущество АВС выражено не столь ярко, как в случае с другими красками. Это может быть связано с природой

данного пигмента и очень сильной агломерацией его первичных частиц на стадии приготовления модельной системы.

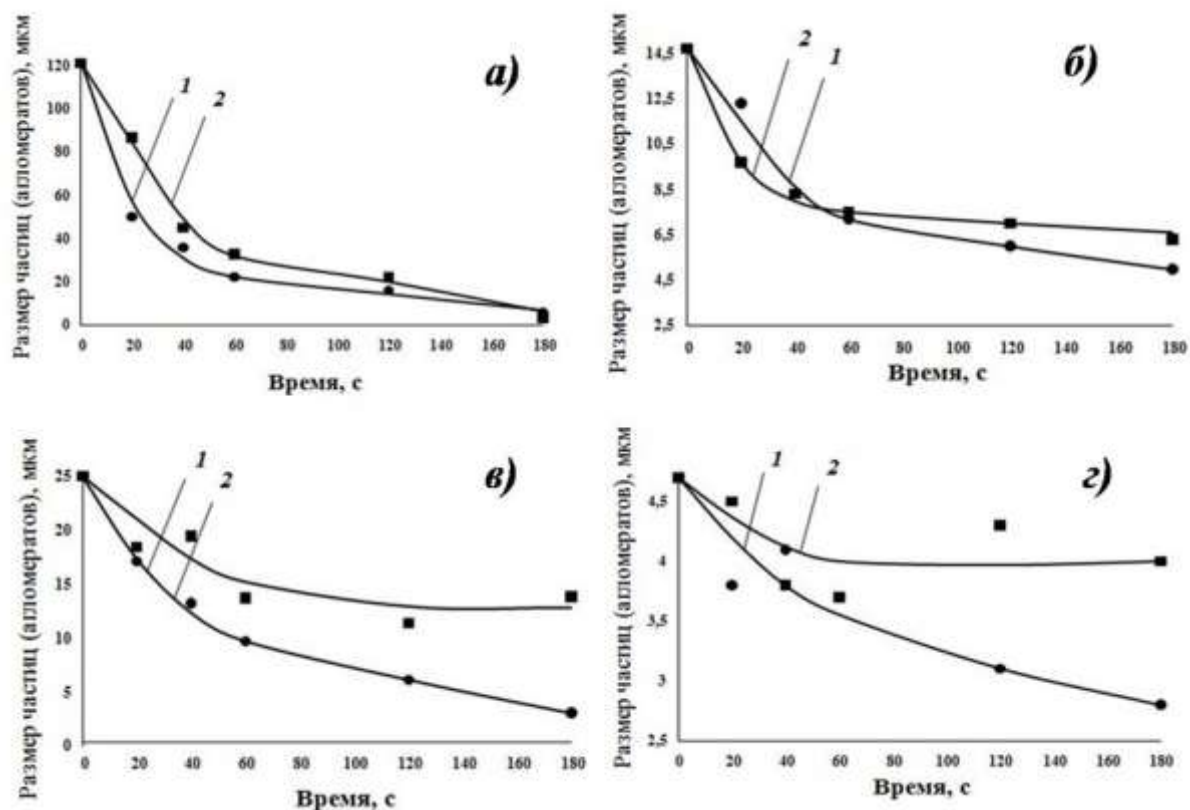


Рис. 4 – Зависимость максимального размера агломератов частиц диоксида титана TiO₂-220 (а), микроталька 03-96 (б), каолина МИКАО-02-98 (в) и микрорамора КМ-2 (з) в модельной лакокрасочной системе, обработанной параллельно в АВС (1) и в БМ (2), от времени обработки в этих аппаратах

Т.к. при обработке в АВС различных систем, рабочие тела вращаются, соударяются друг с другом и со стенками камеры, то может происходить износ рабочих поверхностей аппарата и образование в системе металлического намола.

Для определения величины образующегося в обрабатываемых системах намола в качестве исследуемых материалов были выбраны стирол-акриловая дисперсия и две модельные лакокрасочные системы: с твердым минеральным наполнителем – диоксидом титана (твердость по шкале Мооса 6,5) и с мягким – тальком (твердость по шкале Мооса 1). На атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой был исследован элементный состав изучаемых образцов до их обработки в АВС и после

разных времен обработки. Наибольший интерес из всех определенных в пробах элементов, представляло железо, по количественному содержанию которого судили об износе стальных поверхностей.

Результаты проведенных экспериментов следующие. Для системы с тальком количество железа в образцах с разным временем обработки практически не изменялось и составляло 0,024 – 0,025%, что можно объяснить присутствием данного элемента в исходном наполнителе. При обработке системы с диоксидом титана и чистой стирол-акриловой дисперсии в аппарате в течение 180 с наблюдалось постепенное увеличение количества намола, и к концу третьей минуты содержание железа в образцах составило 0,003% и 0,06% соответственно. Такой результат можно объяснить следующим образом: стирол-акриловая дисперсия имеет достаточно низкую вязкость, практически отсутствует сопротивление среды движению рабочих тел, которые свободно соударяются друг с другом и со стенками рабочей камеры; вязкость системы с диоксидом титана выше, поэтому сопротивление среды больше, что уменьшает скорость вращения и энергию удара рабочих тел, соответственно уменьшается и содержание железа. В случае обработки еще более вязких сред металлический намол будет образовываться в таких минимальных количествах, которые не существенны для эксплуатационных свойств материала.

Т.о. было экспериментально доказано, что количественное содержание намола в обрабатываемых средах равно сотым и тысячным долям %, что очень мало. Чтобы определить, какие именно поверхности (рабочих тел или рабочей камеры) дают больший намол, мы сравнили элементный состав используемых сталей ШХ-15 (ферромагнитные тела) и 12Х18Н10Т (камера), а именно, содержание в них железа, хрома и никеля, с результатами элементного анализа обработанной в АВС стирол-акриловой дисперсии (таблица 3). В итоге был сделан вывод, что незначительному износу подвергаются все рассматриваемые поверхности (соотношение указанных элементов в образцах дисперсии занимает промежуточное положение между

аналогичными соотношениями для рассматриваемых сплавов), но наиболее крупные частицы намолла образуются за счет износа материала рабочей камеры АВС.

Таблица 3

Соотношение содержания никеля и хрома к содержанию железа в различных системах

	ШХ-15	12Х18Н10Т	Стирол-акриловая дисперсия
$\omega(\text{Fe})/\omega(\text{Ni})$	320,00	6,09-7,44	20,71
$\omega(\text{Fe})/\omega(\text{Cr})$	58,18-73, 85	3,52-3,94	15,13

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали эффективность АВС для процессов диспергирования различных пигментов и наполнителей в полимерных связующих на примере модельных систем водно-дисперсионных лакокрасочных материалов. На основе полученных данных можно сделать вывод о возможности использования АВС для диспергирования порошковых компонентов и в других вязких полимерных связующих, что может быть внедрено в различные процессы получения широкого спектра композиционных материалов, таких, как краски, клеи, компаунды и др.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы”, проект № RFMEFI57815X0135

Литература

[1] Явруян Х.С. Гомогенизация наномодифицированных цементных систем и подбор параметров их обработки в установках с вихревым слоем / Х.С. Явруян, И.А. // Вестник МГСУ. - 2013. - № 2. - С. 130.

[2] Торлина Е.А. Электромагнитная активация цементного теста и пенобетонной смеси / Е.А. Торлина, А.И. Шуйский, Г.А. Ткаченко // Вестник МГСУ. - 2012. - № 12. - С. 149.

[3] Филонов И.А. Механическая активация портландцемента в аппарате вихревого слоя / И.А. Филонов, Х.С. Явруян // Инженерный вестник Дона. 2012. - № 3 (21). - С. 678.

[4] Шаяхмедов Р.И. Серобетон и аппарат вихревого слоя / Р.И. Шаяхмедов, А.П. Журавлев // Перспективы развития строительного комплекса Т.1. - 2012. - С. 19.

[5] Мирская М.В. Аппараты вихревого слоя в производстве безобжиговых ангидритовых вяжущих / М.В.Мирская // Инженерный вестник Дона Т.4. -. 2008 - № 2. - С. 66.

[6] Нагорнов С.А. Исследование процесса получения биодизельного топлива в проточном аппарате с магнито–вихревым слоем ферромагнитных частиц / С.А. Нагорнов, С.И. Дворецкий, С.В. Романцова // Вестник ТГТУ Т. 19. - 2013. – № 2. - С. 316.

[7] Нагорнов С.А. Моделирование гидродинамики в реакторе с вихревым слоем ферромагнитных частиц при синтезе биотоплива /С.А. Нагорнов, Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий// Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. - 2010. - №10-12 (31). - С. 359.

[8] Нагорнов С.А. Моделирование процесса метанолиза растительных масел в аппарате вихревого слоя ферромагнитных частиц/ С.А. Нагорнов, Д.С. Дворецкий, С.И. Дворецкий // Вестник ТГТУ Т. 16. - 2010. - № 4. - С. 944.

[9] Мамедова Т.А. Особенности получения биодизеля первого поколения в аппарате с вихревым слоем / Т.А. Мамедова, А.Г. Талыбов, Н.К. Андриюшенко // Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова Т. 6. – 2011. - № 6. - С. 65.

[10] Ершов Д.В. Механохимическая активация углеродных материалов в аппарате с вихревым слоем / Д.В. Ершов // Химия и химическая технология Т. 51. - 2008. - С. 81.

Использование методов термического анализа при изучении структурообразования в термореактивных матрицах

Хасков М.А.¹, к.х.н.

khaskovma@viam.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»)*

Аннотация:

Рассматривается использование методов термического анализа, таких как дифференциальная сканирующая калориметрия с температурной модуляцией, диэлектрический анализ, динамический механический анализ при исследовании структурообразования в термореактивных матрицах. Рассматриваются такие процессы как гелеобразование, витрификация и микрофазовое разделение. Показана необходимость дополнительного математического моделирования процессов отверждения при интерпретации данных, полученных при определенных условиях эксперимента.

Ключевые слова:

термореактивные связующие, полимерные композиционные материалы, структурообразование, витрификация, гелеобразование, микрофазовое разделение, термический анализ.

Введение

Современное развитие как добывающей, так и обрабатывающей отраслей промышленности достаточно сложно представить без использования конструкционных полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1], причем основным используемым видом ПКМ являются композиты на основе термореактивных матриц. В основе их изготовления лежит реакция отверждения термореактивных композиций, причем структура и морфология полимерной матрицы, образуемая при этом, определяет свойства конечного материала. В процессе отверждения термореактивных композиций полимерная матрица претерпевает различные структурные преобразования, в частности, витрификацию, гелеобразование, микрофазовое разделение и др. [2].

Гелеобразование является важнейшим технологическим параметром при изготовлении полимерных композиционных материалов на основе термореактивных матриц, незадолго до которого, обычно прикладывается давления для удаления пузырьков воздуха, предотвращения плохой межслоевой адгезии и высокой пористости в ПКМ [3]. При витрификации, т.е. при достижении полимерной матрицей температуры стеклования равной температуре синтеза связующего, скорость реакции отверждения существенно замедляется и начинает определяться релаксационными характеристиками полимерной матрицы [4]. Определение областей микрофазового разделения позволяет скорректировать режимы отверждения термореактивной-термопластичной композиции с получением отвержденной матрицы с заданными физико-химическими и физико-механическими свойствами, например, повысить трещиностойкость матрицы [5].

Таким образом, физико-химические методы позволяющие зафиксировать структурные превращения, такие как гелеобразование, витрификацию и микрофазовое разделение являются необходимыми для выбора оптимального температурно-временного режима отверждения (ТВРО) и, соответственно, последовательности структурных превращений,

которые являются ключевым фактором получения ПКМ с заданными свойствами.

Материалы и методы

В качестве исходных связующих использовали экспериментальные связующие на основе эпоксидных смол и многофункциональных первичных аминов.

Дифференциальную сканирующую калориметрию с температурной модуляцией проводили на приборе DSC 204 F1 Phoenix (Netzsch) в динамической атмосфере гелия (80 мл/мин) в изотермическом режиме с амплитудой равной 1 К и периодом 60 секунд. Время гелеобразования определяли с использованием термомеханического анализатора TMA 402 F1 в динамическо-механическом режиме и с использованием гель-таймера GelNorm при различных температурах. Диэлектрический анализа проводили на приборе DEA 288/2 Epsilon (Netzsch) с использованием датчика с гребенчатым электродом IDEX 115 (расстояние между электродами 115 мкм) и плоским гибким кабелем, который помещали в лабораторную печь DEA Furnace (Netzsch). Исследуемый образец тонким слоем (>115мкм) наносился на датчик, и проводились измерения в атмосфере сухого азота. Обработку полученных данных проводили с помощью программного обеспечения Netzsch Proteus 7.0.1. Для кинетических расчетов, исследуемые образцы отверждали при пяти различных скоростях нагревания: 1 К/мин, 2.5 К/мин, 5 К/мин, 10 К/мин и 20 К/мин в динамической атмосфере азота (180 мл/мин) на приборе ДСК. Кинетические расчеты проводили с использованием программного обеспечения “Netzsch Thermokinetics 3.1”. Моделирование процессов отверждения с учетом явление теплопереноса осуществляли с использованием программного обеспечения Netzsch Thermal Simulation 2.1 и средними теплофизическими свойствами термореактивного связующего на основе эпоксидных смол с аминными отвердителями [6].

Результаты

На рис. 1 представлена типичная кривая определения процессов гелеобразования с использованием метода ДМА, который основан на возрастании модуля упругости при образовании трехмерной сетки [2].

Процесс гелеобразования характеризует переход полимерной матрицы из вязко-текучего в вязко-эластичное состояние, что сопровождается образованием “бесконечной” трехмерной сетки гель-фракции с “островками” золь-фракции терморективной композиции [3].

Результаты по определению времени гелеобразования при одной температуре (в изотермическом режиме) могут быть использованы для определения времени гелеобразования при других температурах. Для этого используют либо экспериментально определенное значение степени превращения при гелеобразовании, либо рассчитывают его с использованием различных теоретических моделей, например, теории образования трехмерных полимерных структур Флори [7]. В дальнейшем считается, что гелеобразование протекает при одинаковой степени превращения [2] и искомое время гелеобразования при других температурах рассчитывают с использованием кинетических моделей реакции отверждения [7].

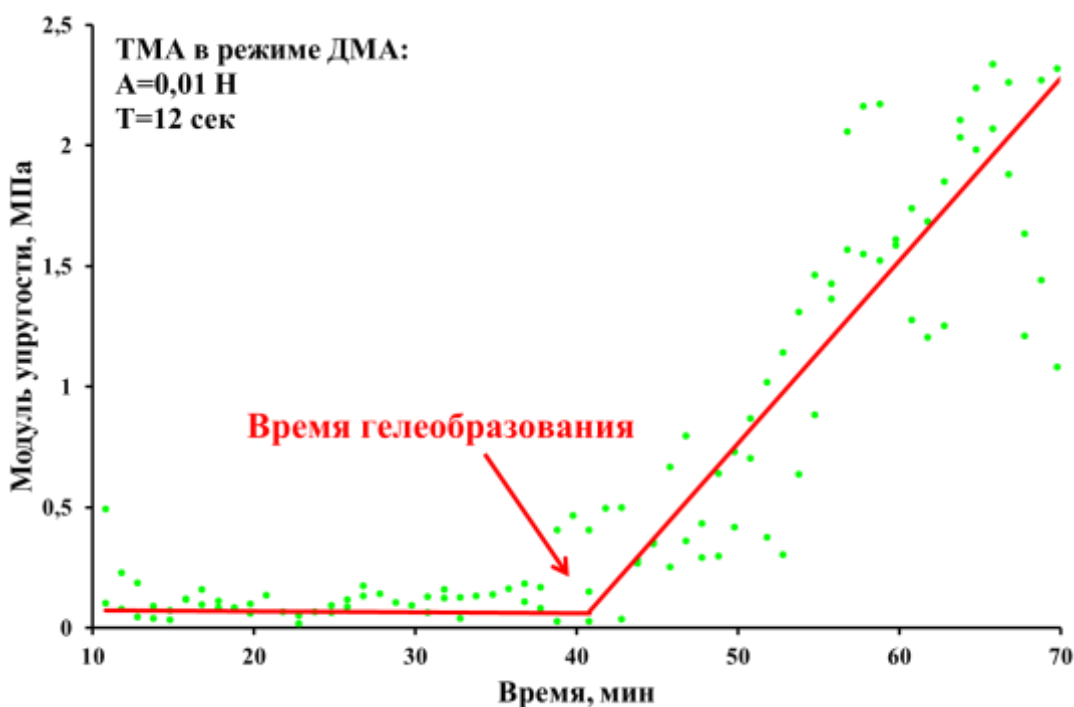


Рис.1 – Типичная кривая ДМА для определения процесса гелеобразования

Витрификация происходит при достижении полимерной матрицей температуры стеклования равной температуре отверждения, при этом кинетика отверждения переходит в, так называемый, диффузионно-контролируемый режим и начинает в существенной степени определяться релаксационными свойствами полимерной матрицы. Процесс витрификации оказывает влияние на кинетику отверждения, поскольку после витрификации скорость отверждения существенно замедляется

Для экспериментального определения времени, при котором происходит витрификация, используют частотно-зависимые методы термического анализа, которые чувствительны к изменению времени релаксации полимерной матрицы в процессе отверждения. К таким методам относятся дифференциальная сканирующая калориметрия с температурной модуляцией, где в качестве частотно-зависимым параметром выступает температура, или диэлектрический анализ, где в качестве частотно-зависимого параметра выступает прикладываемый к образцу электрический потенциал. Типичные кривые определения процесса витрификации при различных температурах с использованием метода дифференциальной сканирующей калориметрии с температурной модуляцией представлены на рисунке 2. Метод основан на измерении удельной теплоемкости связующего, которая при переходе в стеклообразное состояние при витрификации уменьшается.

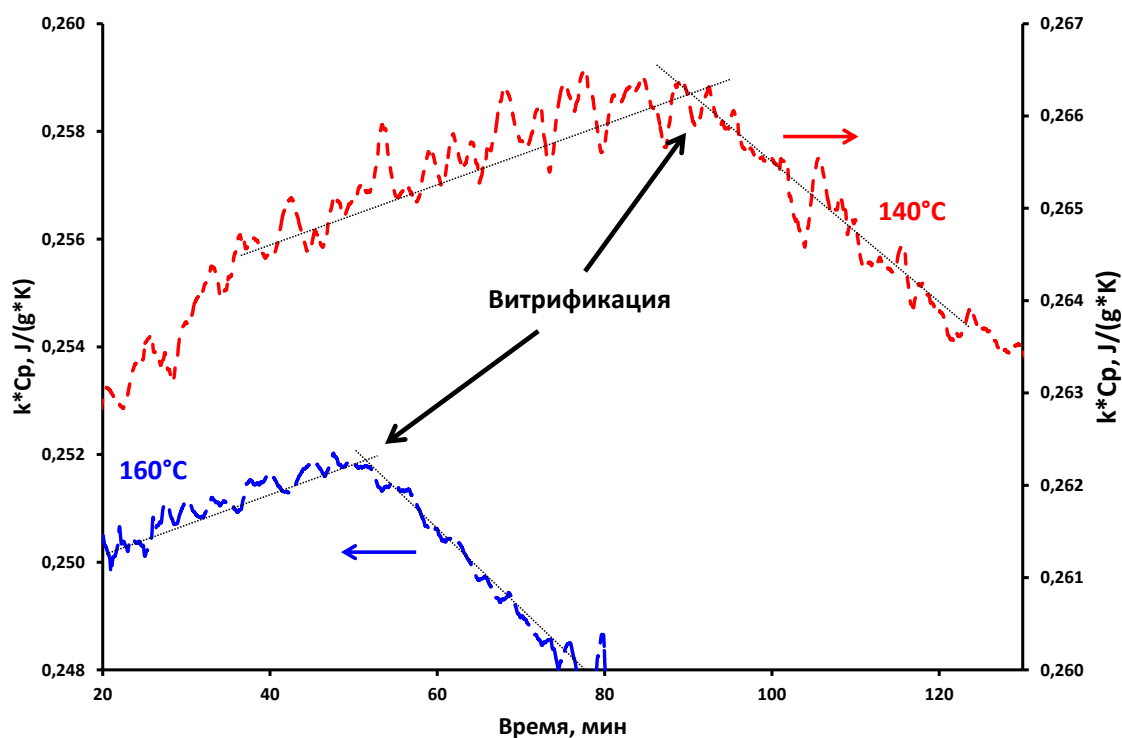


Рис. 2 – Типичные кривые ТМ-ДСК для определения процесса гелеобразования

Определение процессов витрификации при других температурах можно выполнить либо экспериментально, либо с использованием данных изменения температуры стеклования от степени превращения (Рисунок 3) и расчетов с использованием кинетических моделей реакции отверждения [6].

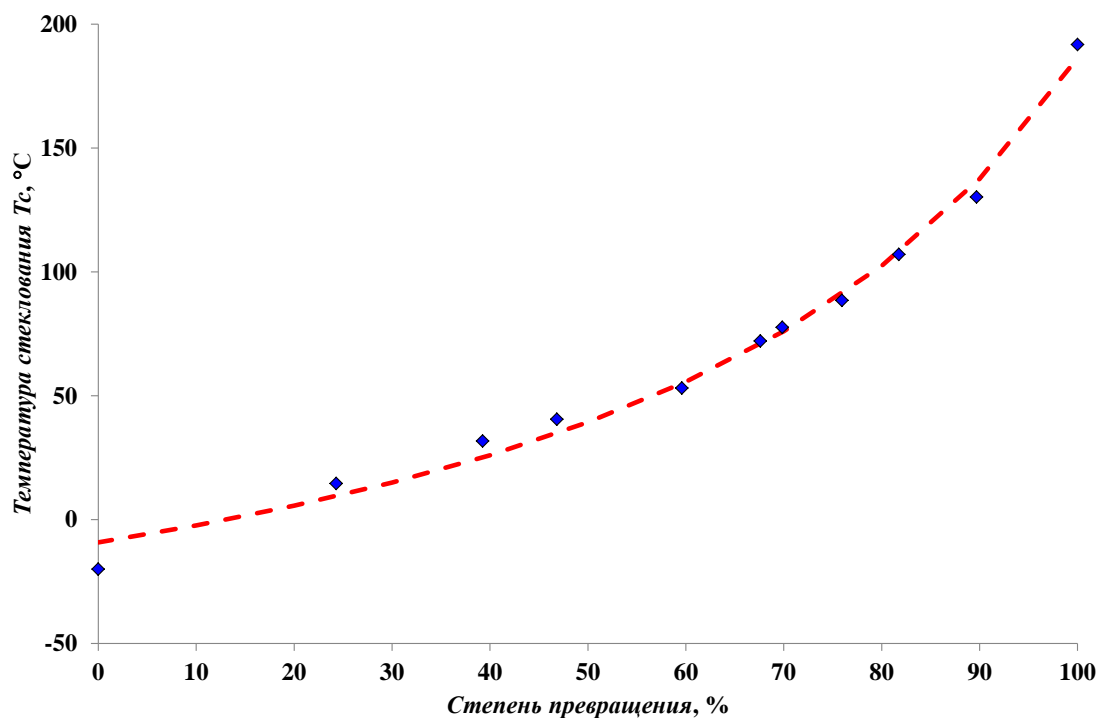


Рис. 3 – Типичная кривая зависимости температуры стеклования от степени превращения

Стоит отметить, процесс витрификации может быть ошибочно принят за процесс гелеобразования при измерении вязко-эластичных свойств, поскольку при витрификации также наблюдается существенное повышение модуля упругости, увеличение которого при гелеобразовании связан с переходом из вязко-текучего в вязко-эластическое состояние [3].

Еще одним процессом, который является важнейшим структурным преобразованием в процессе отверждения системы терморезистивный-термопластичный полимер, определяющим структурные и механические свойства конечной отвержденной композиции, является микрофазовое разделение. Учет микрофазового разделения позволяет оптимизировать температурно-временные режимы отверждения ПКМ для получения (или исключения) областей насыщенных одним из типов полимеров (терморезистивным или термопластичным), что может способствовать получению матрицы с улучшенными физико-механическими характеристиками. Использование методов дифференциальной сканирующей калориметрии с температурной модуляцией и диэлектрического анализа при определении границ микрофазового разделения основаны на изменении теплоемкости и времени релаксации полимерной системы при ее расслоении. Типичная кривая ТМ-ДСК для определения начала микрофазового разделения, определяемое как локальное понижение теплоемкости вследствие витрификации выпадающей фазы, обогащенной полисульфоном, представлена на рисунке 4.

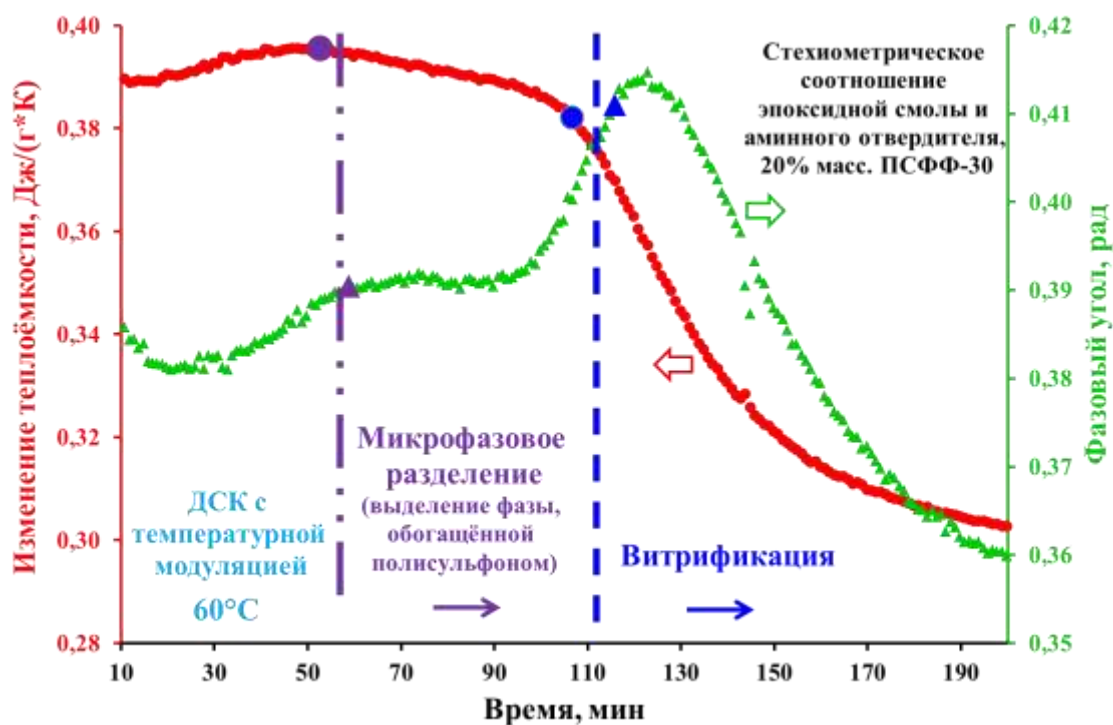


Рис. 4 – Данные ТМ-ДСК для определения микрофазового разделения с последующей витрификацией

При использовании достаточно большого количества образца, вследствие достаточно низких значений теплопроводности и теплоемкости большинства термореактивных связующих вкупе с экзотермическим эффектом отверждения [8], может наблюдаться саморазогрев исследуемого образца, ускорение реакции отверждения и искажение получаемых экспериментальных значений структурных превращений. Например, данное явление может способствовать понижению экспериментального времени гелеобразования по сравнению с расчетным.

Для коррекции получаемых результатов необходимо учитывать явления теплопереноса, протекающие при измерении, например, в простейшем случае с использованием одновременного численного решения химической и тепловой задач.

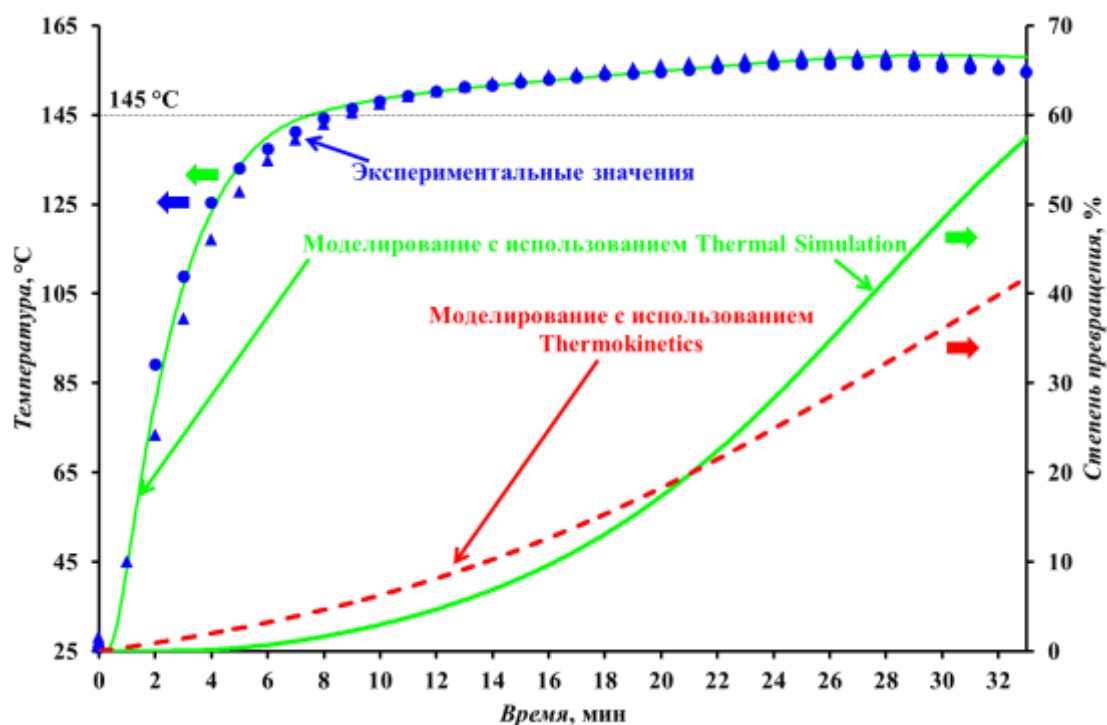


Рис. 5 – Данные ТМ-ДСК для определения микрофазового разделения с последующей витрификацией

Так на рис. 5 приведен профиль подъема температуры в центре тестовой пробирки гель-таймера (диаметр 14 мм, масса исследуемого вещества ~12 грамм) экстраполированный расчетами с использованием программного обеспечения Netzsch Thermal Simulation и теплофизическими свойствами эпоксидного связующего [6]. Как видно из рис. 5 расчетное время без учета теплофизических свойств компонентов приводит к степени превращения при гелеобразовании $X_{\text{ГЕЛЬ}} \sim 41\%$, тогда при учете теплофизических свойств $X_{\text{ГЕЛЬ}} \sim 58\%$, что совпадает с теоретическими значениями по теории трехмерных полимерных структур Флори.

Стоит отметить, что наблюдаемые различия между значениями с учетом теплопереноса зависят как от кинетики отверждения, так и от температуры изотермической выдержки (Таблица 1).

Расчетные значения времени гелеобразования различных эпоксидных связующих с учетом и без учета теплопереноса при определении на гель-таймере GelNorm

Связующее	Температура изотермической выдержки	Расчеты без учета теплопереноса ¹	Расчеты с учетом теплопереноса ²	Занижение времени гелеобразования, %
№1	25	830	677	18
	30	571	457	20
	50	144	106	26
	70	42	22	49
	90	12	3	75
№2	120	440	414	6
	125	265	245	8
	130	170	143	16
	140	68	41 ³	-
№3	140	54	47	13
	145	42	36	14
	150	34	28	18
	160	22	16	28

¹Расчетное значение с использованием только кинетической модели (Netzsch ThermoKinetics),

²The Расчетное значение с использованием кинетической модели (Netzsch ThermoKinetics) и теплопереноса в системе (Netzsch Thermal Simulation),

³Существенный саморазогрев образца превышает 250°C.

Таким образом, методы термического анализа могут быть использованы для изучения таких структурных превращений как гелеобразование, витрификация и микрофазовое разделение. Полученные результаты удобно представлять в виде диаграмм «Температура-Время-Превращения» [3] (рисунок 6).

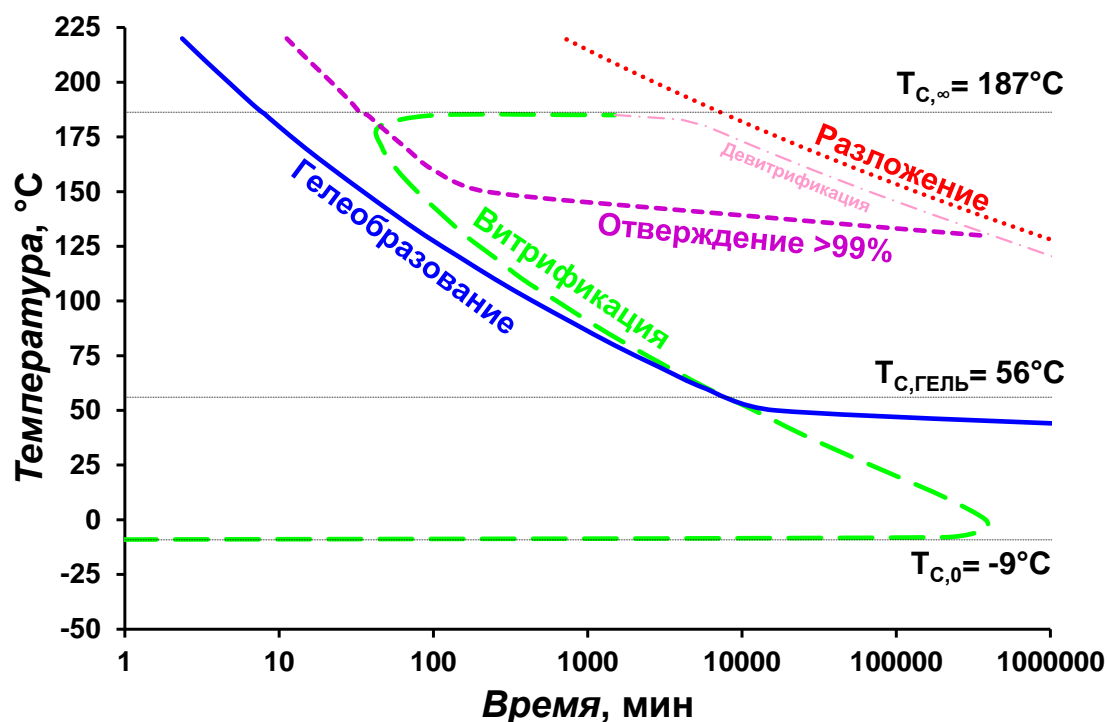


Рис. 6 – Типичная ТВП-диаграмма с областями гелеобразования и витрификации

Литература

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Pascault J.P., Sautereau H., Verdu J., Williams R.J.J., Thermosetting polymers. New York: Marcel Dekker AG., 2002, 477 p.
3. Хасков М.А. Использование методов термического анализа для построения диаграмм изотермических превращений термореактивных связующих //Высокомолекулярные соединения. Серия Б, 2017, т.59, №1, С.37–48.
4. Хасков М.А. Сравнительный анализ влияния природы наполнителя на самопроизвольную полимеризацию связующего в препрегах //Химические волокна, 2015, №1, С.25–33.
5. Martinez I., Martin M.D., Eceiza A., Oyanguren P., Mondragona I. Phase separation in polysulfone-modified epoxy mixtures. Relationships between

curing conditions, morphology and ultimate behavior // Polymer 41 (2000) 1027–1035.

6. Хасков М.А. Расширение диаграммы «Температура-Время-Превращение» с учетом теплофизических свойств компонентов для оптимизации режимов отверждения полимерных композиционных материалов //Журнал прикладной химии, 2016, т.89, №4, С.510–518.

7. Хасков М.А. Построение диаграмм изотермического превращения термореактивных матриц на основании различных кинетических моделей //Клеи. Герметики. Технологии, 2017. № 5. С.20-27.

8. Хасков М.А., Мельников Д.А., Котова Е.В. Подбор температурно-временных режимов отверждения эпоксидных связующих с учетом масштабного фактора //Клеи. Герметики. Технологии., 2017, т.10, С. 24-32.

УДК 533.6.072

Применение полимерных композиционных материалов и аддитивных технологий для создания дренированных аэроупругих моделей ЛА

Азаров Ю.А.¹; Черноволов Р.А.¹

y.al.azarov@yandex.ru; r.chernovolov@gmail.com

¹*НИЦ Жуковского, ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт»*

Аннотация:

Работа посвящена вопросам проектирования и изготовления дренированных аэроупругих моделей летательных аппаратов для исследований в аэродинамических трубах явлений аэроупругости, нестационарных аэродинамических нагрузок и динамической реакции упругой конструкции ЛА. Даны рекомендации для выбора критериев подобия, выполнение которых необходимо при проектировании, изготовлении и испытаниях ДПМ в трансзвуковых АДТ для получения достоверных результатов эксперимента и переноса их на натурную конструкцию.

Ключевые слова:

аэроупругость, аддитивные технологии, нестационарные нагрузки, аэродинамический эксперимент, композиционные материалы.

Введение

Большая роль в исследованиях нестационарных аэродинамических характеристик летательных аппаратов принадлежит экспериментальным методам, которые непрерывно совершенствуются [1]. Для этого проводятся

испытания в аэродинамических трубах (АДТ) моделей разного типа. Каждый тип модели предназначен для проведения определенных исследований:

1) Жесткие геометрически подобные модели предназначены для измерения аэродинамических сил и моментов, визуализации структуры течения, положения скачков уплотнения, области отрыва потока, точечных замеров пульсаций давления.

2) Упруго-подобные модели предназначены для исследований характеристик статической аэроупругости: реверса элеронов, дивергенции, эффективности рулевых поверхностей, аэродинамических сил и моментов с учетом упругих деформаций конструкции ЛА.

3) Динамически подобные модели (ДПМ) всего самолета и изолированных несущих и управляющих поверхностей предназначены для параметрических исследований флаттера в трансзвуковом диапазоне чисел M на угле атаки $\alpha = 0$.

4) Дренированные ДПМ предназначены для исследований, на углах атаки не равных нулю, бафтинга, флаттера, и нестационарных аэродинамических характеристик с учетом отклика упругой конструкции.

Испытания дренированных ДПМ на сегодня представляют наибольший интерес, как с точки зрения их использования для промышленных задач, так и для верификации методов расчетной аэродинамики.

При проектировании дренированных ДПМ необходимо соблюсти следующие требования:

1. Геометрическое подобие модели натурной конструкции по внешним обводам.

2. Подобие натурной конструкции по распределенным массовым характеристикам. Критерий Ньютона – $Nw = idem$.

3. Подобие натурной конструкции по распределенным жесткостным характеристикам. Критерий Коши – $Ca = idem$.

4. Подобие по критерию Струхалия – $Sh = idem$.

5. Обеспечение возможности установки датчиков динамического давления под поверхностью модели в количестве необходимом для воспроизведения физической картины обтекания модели, а также наличие внутренних объемов и каналов для размещения акселерометров, тензометров, кабелей и трубок опорного давления.

6. Обеспечение требуемых расчетных запасов прочности при испытаниях модели в АДТ на углах атаки и скоростных напорах в заданных диапазонах.

7. Обеспечение возможности выполнения непрерывного контроля за фактическим напряженно-деформированным состоянием модели во время пуска АДТ.

Очевидно, что наиболее сложными из аэроупругих моделей с точки зрения проектирования, изготовления и испытаний являются дренированные динамически-подобные модели, так как помимо разработки сложной системы дренирования обтекаемых поверхностей модели к ним предъявляются в соответствии с законом механического подобия жесткие требования по выполнению условий подобия натурной конструкции ЛА по массовым и жесткостным характеристикам.

Наиболее информативной характеристикой материалов при оценке весовой эффективности конструктивно силовых схем ДПМ при одинаковом масштабе жесткости является удельная жесткость $\frac{E}{\gamma}$, где $\gamma = \rho \cdot g$, g - ускорение свободного падения, ρ – плотность. В таблице 1 приведены удельные веса и удельные жесткостные характеристики изотропных конструкционных материалов.

Удельные веса и удельные жесткостные характеристики
 изотропных конструкционных материалов

Материал	γ_l , гр/см ³	$\frac{\gamma_l}{\gamma_{B95}}$	E кг/см ²	$\frac{E}{\gamma} \cdot 10^3$ см
Алюминиевый сплав Д16Т	2,8	1,0	$7,2 \cdot 10^5$	$2,57 \cdot 10^5$
Алюминиевый сплав В95	2,8	1,0	$7,2 \cdot 10^5$	$2,57 \cdot 10^5$
Магниевый сплав МА3	1,8	0,64	$4,2 \cdot 10^5$	$2,33 \cdot 10^5$
Магниевый сплав МА5	1,8	0,64	$4,2 \cdot 10^5$	$2,33 \cdot 10^5$
Титановый сплав ВТ5	4,4	1,57	$1,1 \cdot 10^6$	$2,50 \cdot 10^5$
Сталь 30ХГСА	7,8	2,79	$2,1 \cdot 10^6$	$2,69 \cdot 10^5$
Углепластик	1,45	0,52	$5,0 \cdot 10^5$	$3,45 \cdot 10^5$
Стеклопластик	1,5	0,53	$1,15 \cdot 10^5$	$0,77 \cdot 10^5$
АВС- термопластик	1,04	0,37	$2,4 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$
Термопластик поликарбонат	1,20	0,36	$2,2 \cdot 10^4$	$1,83 \cdot 10^4$

Для того, чтобы оценить эффективность их применения в конструкциях ДПМ в таблице даны для каждого материала отношения его удельной жесткости к удельной жесткости алюминиевого сплава В95, который принят в качестве базового материала. Из таблицы 1 следует, что наиболее эффективно применять в конструкции динамически подобных моделей углепластик т.к. при одинаковом весе конструкции она будет наиболее жесткой. И, наоборот, при одинаковой жесткости конструкция из углепластика будет наиболее легкой, что очень важно при моделировании флаттера и бафтинга.

Не менее важным вопросом при выборе материала для многоцелевых ДПМ является обеспечение максимальной прочности модели при ее испытаниях в АДТ на углах атаки. В таблице 2 приведены удельные прочностные характеристики изотропных материалов и их отношение к удельной прочности алюминиевого сплава В95, принятого за базовый материал.

Удельные прочностные характеристики изотропных материалов и их отношение к удельной прочности алюминиевого сплава В95

Материал	γ_l гр см ³	$\frac{\gamma_l}{\gamma_{B_{95}}}$	σ_B кг мм ²	$\frac{\sigma_B}{\gamma}$ см
Алюминиевый сплав Д16Т	2,8	1,0	40	14,3 10 ⁵
Алюминиевый сплав В95	2,8	1,0	60	21,0 10 ⁵
Магниевый сплав МА3	1,8	0,64	26	14,4 10 ⁵
Магниевый сплав МА5	1,8	0,64	30	16,7 10 ⁵
Титановый сплав ВТ5	4,4	1,57	100	22,7 10 ⁵
Сталь 30ХГСА	7,8	2,79	120	15,0 10 ⁵
Углепластик	1,45	0,52	50	34,5 10 ⁵
Стеклопластик	1,5	0,53	20	13,3 10 ⁵
АВС- термопластик	1,04	0,37	6,0	5,8 10 ⁵
Термопластик- поликарбонат	1,20	0,36	10,0	8,5 10 ⁵

Из таблицы следует, что наиболее эффективно применять в конструкции ДПМ углепластик т.к. при одинаковом весе конструкции она будет наиболее прочной.

Применение ПКМ требует изготовления сложной объемной технологической оснастки в виде мастер моделей, негативных и позитивных прессформ, матриц, прижимов и т.д. Опыт применения аддитивных технологий для изготовления технологической оснастки из термопластиков показал, что этот способ в данном случае является наиболее эффективным [2]. Но главным преимуществом применения этой инновационной технологии является возможность образования внутри модели криволинейных дренажных каналов к датчикам динамического давления, установленных вблизи обтекаемой поверхности модели в заданных сечениях. Выполнение требований к геометрическим характеристикам модели осуществляется за счет точности изготовления технологической оснастки, которая в свою очередь зависит от точности работы установки быстрого прототипирования.

Поэтому после изготовления оснастка проходит проверку на координатно-измерительной машине (КИМ) на наличие неточностей и дефектов изготовления. В случае необходимости выполняется доводка поверхности оснастки. Завершающим этапом изготовления модели является контрольная проверка ее геометрических характеристик на координатно-измерительной машине.

1. Опыт создания дренированных динамически подобных моделей

В научно-исследовательской лаборатории Центрального Аэрогидродинамического Института были спроектированы и изготовлены дренированные ДПМ четырех типов, для испытаний в АДТ в трансзвуковом диапазоне чисел Маха:

Тип модели №1 – Дренированная ДПМ консоли крыла ближнемагистрального пассажирского самолета.

Для экспериментальных исследований в АДТ в диапазоне чисел $M = 0,5 \div 1,1$ аэроупругих характеристик натурного крыла, была изготовлена многофункциональная дренированная ДПМ крыла большого удлинения с воспроизведением ступенчатой формы натурного крыла (рисунок 1) (переменным профилем, круткой и изломом по размаху).

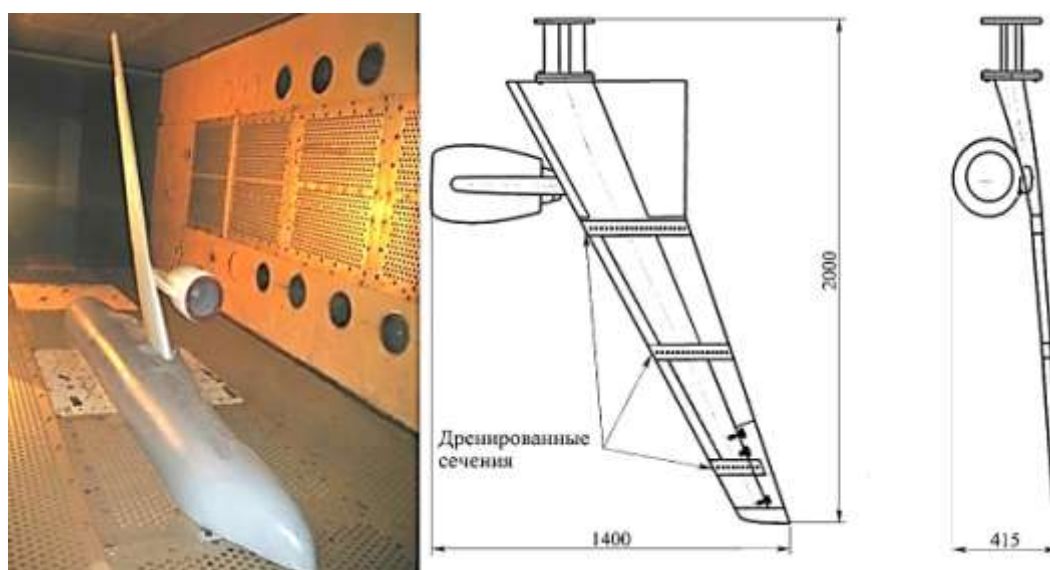


Рис. 1 – Многофункциональная динамически подобная дренированная модель крыла большого удлинения

Для обеспечения необходимых характеристик жесткости и прочности модель изготовлена из композиционных материалов. При изготовлении ДПМ широко применялись аддитивные технологии для создания из термопластиков формообразующих элементов модели и технологической оснастки.

Особенностью данной ДПМ являлось наличие трех дренированных сечений по размаху модели, в которые были установлены 60 ультра миниатюрных датчиков давления серии ХСQ-062 компании «Kulite» и дополнительно 2 датчика на элероне. Датчики устанавливались симметрично на верхней и нижней поверхностях модели.

Тип модели №2 – Дренированная эталонная ДПМ консоли крыла самолета транспортной категории.

Для отработки технологии применения инновационных конструктивных решений на перспективных ЛА и изучения нестационарных аэродинамических нагрузок спроектирована и изготовлена универсальная эталонная дренированная ДПМ нового поколения крыла большого удлинения (рисунок 2), жесткостные и массово-инерционные характеристики которой соответствовали (в заданном масштабе) характеристикам типового натурального крыла самолета транспортной категории.

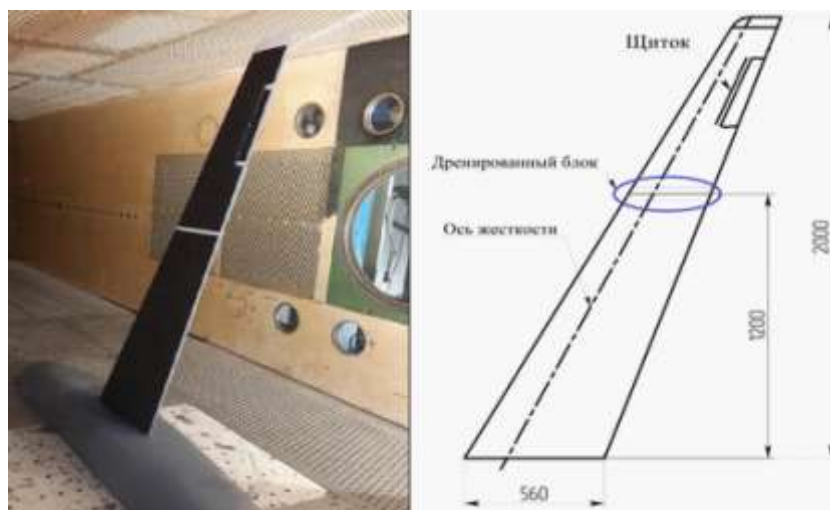


Рис. 2 – Эталонная дренированная ДПМ нового поколения крыла большого удлинения

Для обеспечения требуемых прочностных характеристик при проведении испытаний в АДТ в диапазоне углов атаки $\pm 5^\circ$, возможности установки на модель оборудования разного типа была выбрана лонжеронная силовая схема.

Модель была оснащена 36 датчиками динамического давления ХСQ-062 в сечении крыла на 60% размаха. Для установки датчиков был спроектирован и изготовлен, с применением аддитивных технологий, дренированный блок из поликарбоната [3]. Датчики устанавливались симметрично на верхней и нижней поверхностях модели.

Так же в модели установлены акселерометры (7 сечений) на передней и задней кромках и полумосты тензорезисторов на лонжероне (5 сечений)

Тип модели №3 – Дренированная ДПМ горизонтального оперения (ГО) ближнемагистрального пассажирского самолета

Для исследования характеристик бафтинга ГО в следе за крылом ближнемагистрального пассажирского самолета была спроектирована и изготовлена дренированная ДПМ ГО [4]. Модель спроектирована в масштабе линейных размеров 1/6.32 и была установлена в АДТ на жесткую полумодель самолета (рисунок 3). Подобие частот по числу Струхаля осуществлялось по 1 тону изгибных и крутильных колебаний. Испытания проведены в трансзвуковой АДТ в диапазоне чисел Маха от 0.5 до 0.85.

Особенностью этой модели является то, что датчики динамического давления были установлены на модели в двух сечениях по размаху (1/4 и 3/4) на верхней и нижней поверхности вблизи передней и задней кромок. Для установки датчиков были разработаны конструкции специальных дренированных блоков. Для ГО или вертикального оперения (ВО) дренированный блок представляет собой: дренированную вставку, выполненную в виде съемной части передней или задней кромки модели. Такая конструкция объясняется тем, что модели ГО и ВО, в отличии от

лонжеронной модели крыла, как правило проектируются по кессонной схеме с работающей обшивкой.

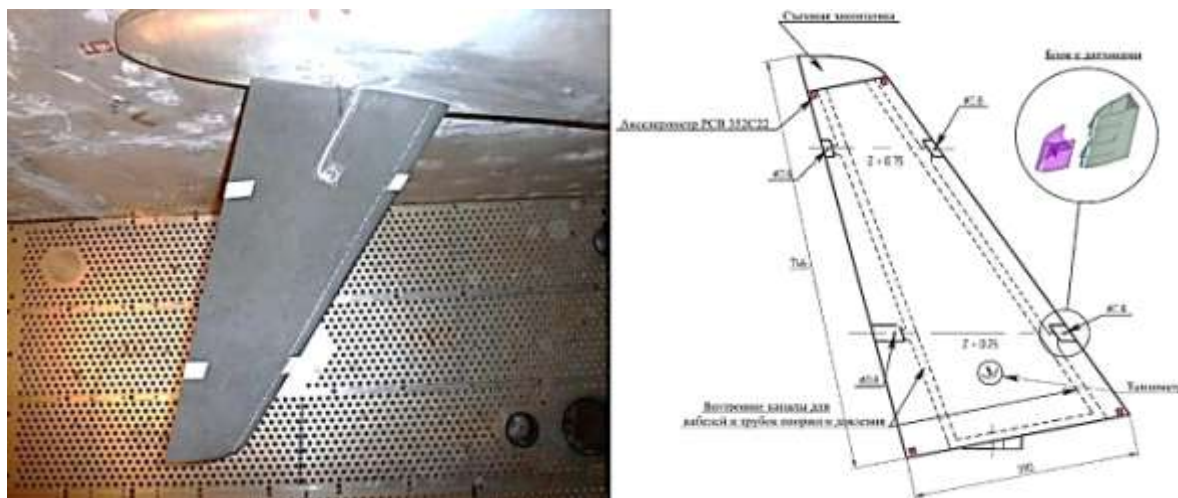


Рис. 3 – Дренированная ДПМ ГО

Амплитуды и частоты изгибных и крутильных колебаний модели определялись с помощью четырех малогабаритных акселерометров, установленных на передней и задней кромке в двух сечениях.

Напряженно-деформированное состояние модели при испытаниях на углах атаки $\alpha \neq 0$ измерялось наклеенными на нее полумостами тензодатчиков.

Тип модели №4 – Дренированная ДПМ закрылка среднемагистрального пассажирского самолета.

Дальнейшим развитием технологии моделирования бафтинга и исследований нестационарных аэродинамических нагрузок была разработка в лаборатории конструкции дренированной ДПМ внутренней секции закрылка крыла средне магистрального пассажирского самолета (рисунок 4) для проведения исследований в трансзвуковой АДТ в диапазоне углов атаки от -2° до $+26^\circ$. При проведении эксперимента модель закрылка устанавливается на крупномасштабной жесткой аэродинамической полумодели самолета, изготовленной из стали в масштабе линейных размеров 1/8,16, в трех положениях: в убранном (крейсерский режим полета самолета), на режимах взлета ($\delta_{зак.}=18,6^\circ$) и посадки ($\delta_{зак.}=36,8^\circ$).

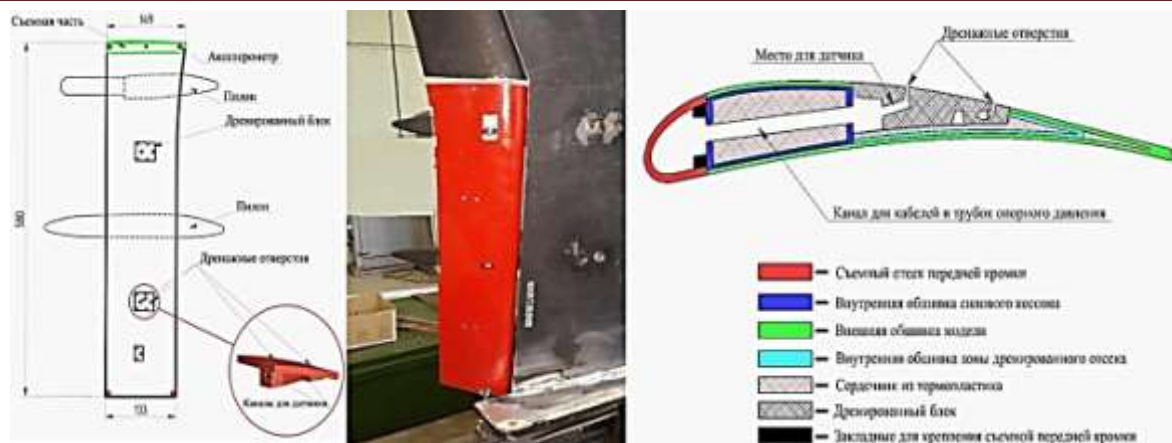


Рис. 4 – Дренажная ДПМ внутренней секции закрылка, установленная на крыло аэродинамической полумодели самолета

Модель закрылка спроектирована по кессонной схеме с работающей обшивкой. Кессон имеет сквозные технологические каналы в дренажных сечениях, через которые проходят провода и трубки опорного давления от датчиков динамического давления.

В качестве формообразующего элемента использовались полые сотовые конструкции, изготовление которых стало возможным благодаря применению аддитивных технологий.

В модель для измерения пульсаций давления установлены шесть датчиков динамического давления. Для них спроектированы и изготовлены три дренажные вставки.

Для определения частот и амплитуд изгибных и крутильных колебаний закрылка в углах модели установлены четыре акселерометра.

2. Требования к характеристикам новых материалов, применение которых позволит выполнить одновременно критерии подобия Ca и Nw

Первое требование к удельным жесткостным характеристикам новых материалов сформулируем из условия, что характерная погонная масса m_l сечения для каждой конструктивно силовой схемы ДПМ является постоянной величиной и равна m_{95} базового материала. Для этого воспользуемся формулами, приведенными в таблице 3.

Отношение масс для разных конструктивных схем

Кессонная схема	Балочная схема	Пластинная схема
$\frac{m_i}{m_{95}} = \frac{\gamma_i}{\gamma_{95}} \cdot \frac{E_{95}}{E_i}$	$\frac{m_i}{m_{95}} = \frac{\gamma_i}{\gamma_{95}} \cdot \sqrt{\frac{E_{95}}{E_i}}$	$\frac{m_i}{m_{95}} = \frac{\gamma_i}{\gamma_{95}} \cdot \sqrt[3]{\frac{E_{95}}{E_i}}$

Для моделей кессонной схемы при $E_i t_i = const$ и $m_i = m_{95}$ требование к новым материалам состоит в том, чтобы их удельная жесткость была равна удельной жесткости базового материала.

На графике $E_i(\gamma_i)$ эта зависимость представляет прямую линию (рисунок 5). В этом случае конструктор, проектирующий ДПМ, учитывая различные факторы, имеет возможность задать необходимую величину удельного веса конструкционного материала и далее подбирать (или создавать) материал с соответствующим модулем упругости.

Для выбора необходимого материала при проектировании модели балочной схемы график зависимости $E_i(\gamma_i)$, представляющий собой квадратную параболу. Конструктор может задать требуемую величину модуля упругости материала и по графику определить требуемую величину удельного веса материала или поступить наоборот.

Характеристики и возможности применения материалов при использовании пластинной схематизации определяются выполнением условий $E_i \delta_i^3 = const$ и $m_i = m_{95}$. Для выбора необходимого материала при проектировании модели приведен график зависимости E_i от γ_i , представляющий собой кубическую параболу.

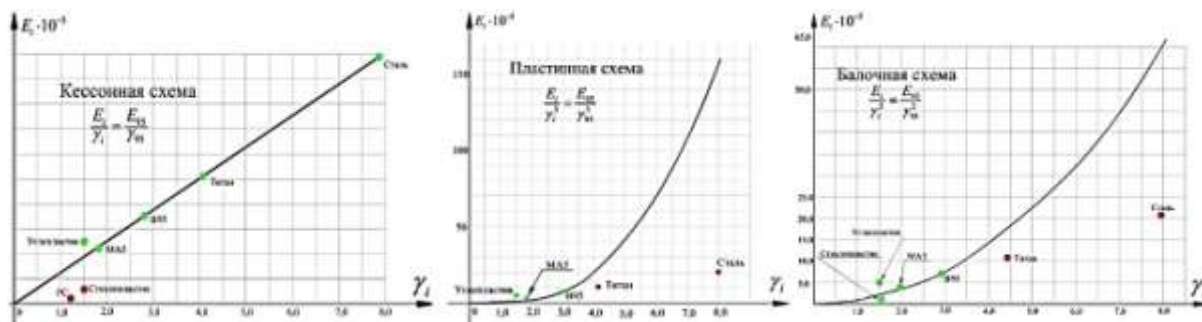


Рис. 5 – Графики зависимости $E_i(\gamma_i)$: для моделей кессонной, балочной и пластинной схем

Необходимо подчеркнуть, что при выборе удельной жесткости материала конструктор должен сделать контрольные расчеты для определения характерных линейных размеров и прочностных характеристик выбранной конструктивно силовой схемы, а затем решить главную задачу – разработку технологии создания материала с заданной удельной жесткостью.

3. Оценка возможностей использования перспективных конструкционных материалов с заданными жесткостными характеристиками для выполнения критериев подобия Ca и Nw при проектировании трансзвуковых ДПМ ЛА

Приоритетным направлением в решении задачи повышения весовой эффективности и прочности ДПМ является применение гетерогенных материалов, состоящих из сильно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых компонентов. Эти материалы позволяют иметь заданное сочетание разнородных свойств с возможностью варьирования удельными жесткостными и прочностными характеристиками при проектировании модели. В первую очередь этому требованию удовлетворяют полимерные композиционные материалы. Их преимущества связаны с имеющимися возможностями управления их свойствами в широком диапазоне, что достигается путем подбора сочетания армирующих компонентов, связующего, их количественного соотношения, распределения и ориентации волокон в объеме материала.

Другим направлением является применение аддитивных технологий для изготовления на первом этапе из низкомодульных и легких термопластиков крупных блоков модели для уменьшения количества стыков при сборке. Термопластик в данном случае выполняет несколько функций: во-первых он является позитивной прессформой, на которую наформовываются несущие тонкие слои полимерного композиционного материала, во-вторых он обеспечивает местную мембранную жесткость и прочность тонкостенных элементов при сжатии, и в-третьих варьируя его толщиной можно создавать гибридные материалы для выполнения условия массового подобия, практически не изменяя жесткостных характеристик. Благодаря низкой плотности перспективными конструкционными композиционными материалами на сегодня также являются органопластики.

Перспективным направлением для снижения массы модели является также повышение коэффициента рациональности сечений для моделей балочной и пластинной схемы. Для балочной схемы это переход от сплошного сечения к пустотелому, в котором внутренний тонкостенный контур изготавливается из термопластика с использованием аддитивной технологии, на который затем наформовываются слои высоко модульного и высоко прочного однонаправленного углепластика в направлении оси жесткости балки $[0^\circ]$ и под углами $[\pm 45^\circ]$.

Для пластинной схемы это переход от сплошной пластины к трехслойной панели, состоящей из внутренней тонкостенной панели, изготовленной в виде сотового блока из термопластика на установке быстрого прототипирования. Сотовый блок изготавливается переменной высоты по размаху и по хорде в соответствии с геометрией несущей поверхности. Затем на него сверху и снизу наформовываются слои высоко модульного и высоко прочного углепластика, количество и ориентация которых определяются расчетом по заданной матрице коэффициентов упругого влияния.

Здесь необходимо подчеркнуть, что конструирование пакета материала, проектирование модели и разработка технологического процесса ее изготовления – это единый взаимосвязанный процесс, в котором каждая процедура дополняет и определяет другие.

Выводы:

1. Разработаны конструкции дренированных ДПМ нового поколения из полимерных композиционных материалов с применением аддитивных технологий.

2. Разработаны конструкции и технология изготовления съемных дренированных блоков и вставок для датчиков динамического давления, устанавливаемых в основную силовую конструкцию моделей.

3. На дренированных ДПМ проведены экспериментальные исследования явлений аэроупругости и нестационарных аэродинамических нагрузок в трансзвуковой аэродинамической трубе.

4. Сформулированы требования к характеристикам новых материалов, применение которых позволит выполнить одновременно критерии подобия Ca и Nw .

5. Дана оценка возможностей создания перспективных конструкционных материалов с заданными жесткостными характеристиками для выполнения критериев подобия Ca и Nw при проектировании трансзвуковых ДПМ ЛА.

Литература

1. Азаров Ю.А., Черноволов Р.А. Дренированные аэроупругие модели летательных аппаратов «Труды МАИ». Выпуск № 92, 2017 г.

2. Азаров Ю.А., Брускова Е.В., Губернатенко А.В., Зиченков М.Ч., Ишмуратов Ф.З. «Система автоматизированного проектирования, изготовления и инженерного анализа аэроупругих моделей летательных аппаратов и строительных сооружений». Труды центрального аэрогидродинамического института. 2013г., выпуск №2738, 289–317 стр.

3. Патент на изобретение «Динамически подобная аэродинамическая модель несущей поверхности летательного аппарата» №2578915, Российская Федерация, заявка № 2014136937/11 от 27.11.2014, опубликовано 27.03.2016 Бюл. №9, 2 стр.

4. Черноволов Р.А., Янин В.В. Исследование бафтинга ЛА в аэродинамической трубе. «Авиационная промышленность» Выпуск №3, 2016 г.

УДК 691.175.3

Несущие конструкции сооружений из пултрузионных стеклопластиковых профилей

Фахрутдинов А.Э.¹, к.т.н.; Арипов Д.Н.¹

faxrutdinoff@yandex.ru; architector-1992@mail.ru

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ)

Аннотация:

Рассматриваются варианты реализации несущих конструкций сооружений различного назначения из пултрузионных стеклопластиковых профилей. Приводятся результаты расчётов, компьютерного моделирования, экспериментальных исследований и конструирования несущих элементов из пултрузионных стеклопластиковых профилей. По сравнению с традиционными решениями, конструкции из пултрузионного стеклопластика обладают легкостью, эстетичностью, высокой стойкостью к коррозии и агрессивной химической среде, при этом обеспечивают требуемую прочность и надёжность.

Ключевые слова: пултрузия, стеклопластиковые профили, несущая способность.

В настоящее время актуальным направлением является применение конструкционных стеклопластиковых изделий в авиации, железнодорожном транспорте, строительстве и других областях. Примерами таких изделий

являются конструкционные элементы композитных мостов [1], элементы стеклопластиковых опор высоковольтных линий электропередач [1], силовые элементы авиаконструкций, фермы покрытий зданий и сооружений и др.

В мире насчитывается более 300 предприятий, освоивших технологию производства пултрузионного стеклопластика. Мировыми лидерами являются компании Exel (Финляндия) [2], Strongwell Corporation (США) [3], Werner Co (США) [4]. Наибольшие темпы развития пултрузионного рынка имеют место в Китае. Так, в собственности компании Owens Corning [5] насчитывается около 100 производств пултрузионного стеклопластика. Лидерами среди отечественных производителей являются компании "Flotenk" (г. Санкт-Петербург) [6], ООО "Композит" (г. Нижний Новгород) [7], "Стальпром" (г. Москва) [8], ООО "Лидер-Композит" (г. Санкт-Петербург) [9], ООО "Новые композитные материалы" (г. Саранск) [10]. Основными товарами перечисленных производств являются решетчатые настилы, оконные и дверные профили, поручни и ограждения, лестницы, люки, шумозащитные экраны, фонарные столбы, кабельные лотки и антенны.

Конструкции из полимерных композиционных материалов являются весьма дорогостоящими по сравнению с конструкциями из традиционных материалов – дерева, бетона, металла. Однако, во многих областях применения, особенно в случаях ограничений на вес конструкции и стойкость к агрессивным средам, конструкции из композитных материалов успешно соперничают с традиционными аналогами [11]. Необходимо отметить, что при этом они должны оставаться конкурентоспособными с точки зрения стоимости.

Наиболее экономичным способом производства конструкционных профилей из полимерных композиционных материалов является пултрузия. Суть пултрузионного процесса заключается в том, что непрерывный армирующий наполнитель (стеклоровинг) протягивается тянущим устройством через пропиточный узел с термореактивным связующим, затем

поступает в обогреваемую фильеру, определяющую геометрию поперечного сечения изделия, в которой осуществляется полимеризация связующего [12].

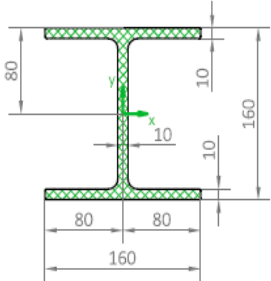
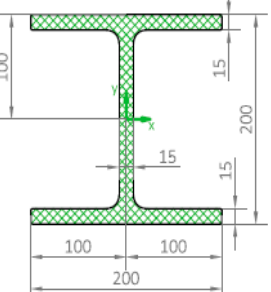
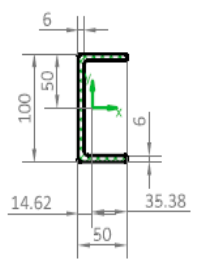
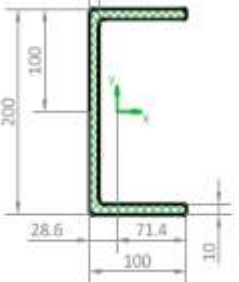
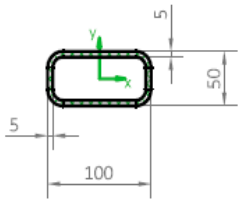
Конструкции из пултрузионных профилей не требуют затрат на обслуживание поверхности, а благодаря лёгкости и отсутствию сварочных работ значительно уменьшают стоимость монтажных работ.

Основными преимуществами профилей из пултрузионного стеклопластика являются: прочность, высокая устойчивость к коррозии и агрессивной химической среде, легкий вес, долговечность, устойчивость к перепадам температур и ультрафиолетовым излучениям, диэлектричность.

В условиях отсутствия на территории Республики Татарстан производств традиционного сырья (цемента, стали) для строительного сектора возникает необходимость внедрения новых эффективных конструкций из материалов местного производства, таких как, например, пултрузионный стеклопластик.

В настоящее время предприятием ООО «Татнефть-Пресскомпозит» (Республика Татарстан, г. Елабуга) налажено серийное производство строительных профилей из пултрузионного стеклопластика (замкнутого, уголкового, швеллерного, таврового, двутаврового сечений и т.д.). Некоторые типы профилей и геометрические характеристики их поперечного сечения приведены в таблице 1.

Типы профилей и геометрические характеристики их поперечного сечения

Наименование	Сечение	$\frac{I_x, \text{см}^4}{W_x, \text{см}^3}$	$\frac{I_y, \text{см}^4}{W_y, \text{см}^3}$	$I_c, \text{см}$	$i_x, \text{см}$	$A, \text{см}^2$
Двутавр 160x160x10		$\frac{2068,6}{258,57}$	$\frac{681,86}{85,23}$	6,65	3,81	46,82
Двутавр 200x200x15		$\frac{5846,8}{584,68}$	$\frac{1999,5}{199,95}$	8,2	4,79	86,82
Швеллер 100x50x6		$\frac{167,22}{33,44}$	$\frac{26,02}{7,43}$	3,84	1,52	11,31
Швеллер 200x100x10		$\frac{2294,22}{229,42}$	$\frac{358,31}{50,18}$	7,77	3,07	38,03
Труба прямоугольная 100x50x5		$\frac{49,7}{19,88}$	$\frac{147,21}{29,44}$	1,96	3,37	12,93

Приведенный обзор показывает, что на практике осуществлены лишь первые шаги по направлению строительства сооружений с применением пултрузионных стеклопластиковых профилей. Их широкое внедрение сдерживается в связи с отсутствием опыта возведения подобных конструкций и нормативной литературы.

В рамках данной статьи приводятся результаты разработки и исследования несущих конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей, направленные на обоснование возможности применения таких профилей в качестве несущих конструкций сооружений. Это позволит, в частности, восполнить потребность строительной области Республики Татарстан в легких, прочных, долговечных и эстетичных конструкциях, а также расширить области применения пултрузионных стеклопластиковых профилей.

Для этого на первом этапе были выполнены расчёт и конструирование каркаса навеса над автозаправочной станцией, план покрытия которого приведен на Рис. 1.

Статический расчёт производился с учетом нагрузок от собственного веса конструкций и веса снегового покрова для V-го снегового района (320 кг/м^2) согласно [13].

Расчёт конструкций навеса над автозаправочной станцией показал, что двутавровые сечения пултрузионных профилей размерами $254 \times 127 \times 12,7$ мм обладают достаточной прочностью (удовлетворяют условиям I-й группы предельных состояний), так как максимальные напряжения в конструкциях с учетом кратковременного загрузения снегом составили $\sigma = 1629 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ при расчётном сопротивлении материала вдоль направления пултрузии $R = 2700 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$. При этом выполнение требований по деформативности (II группа предельных состояний) было не обеспечено из-за относительно небольшого значения модуля упругости материала. Фактический прогиб балок составил $f = 145 \text{ мм}$ при предельно допустимом значении $[f] = 40 \text{ мм}$.

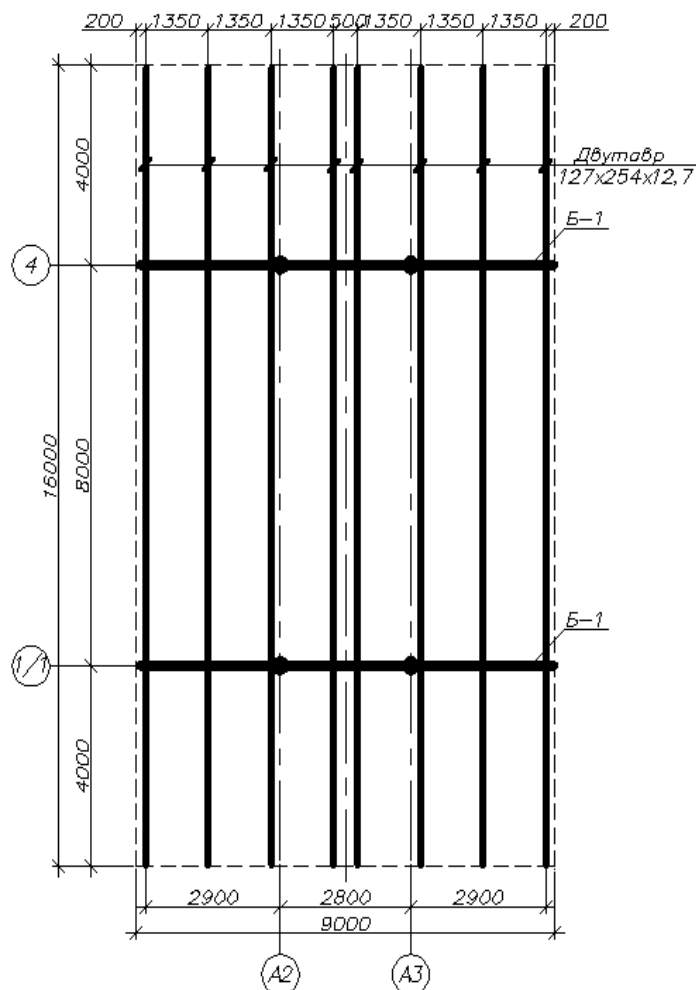


Рис. 1. - План балок покрытия и прогонов навеса над АЗС

Следующим шагом явилась разработка каркаса ангара. В качестве несущей конструкции покрытия была выбрана треугольная стропильная ферма на стальных фасонках (Рис.2). Решётчатый ригель в данном случае обладает существенно большей жесткостью, нежели балочная конструкция, рассмотренная на первом этапе. Таким образом, в рамках данного исследования проводится постепенное определение рациональной области применения рассматриваемых конструкций.

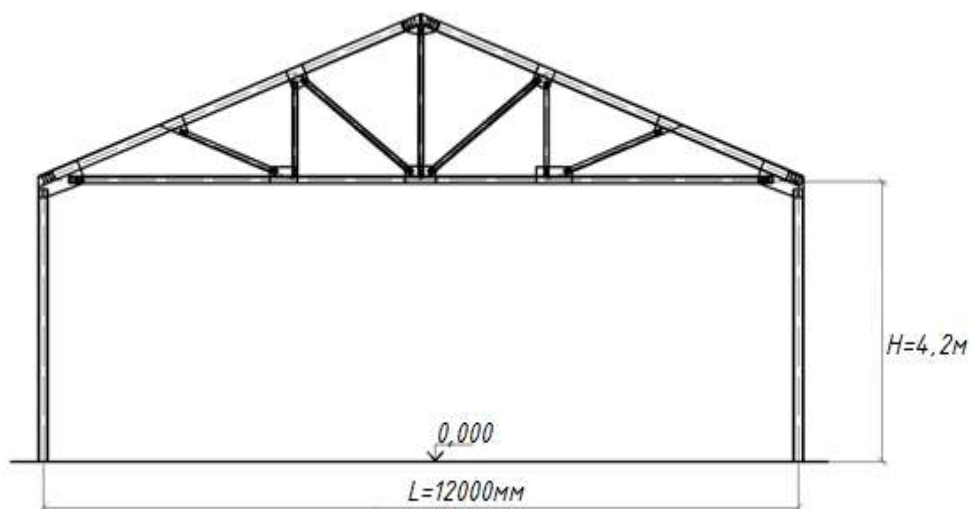


Рис. 2. - Поперечная рама ангара из пултрузионных стеклопластиковых профилей

В ходе исследования рамы ангара были выполнены компьютерное моделирование, расчёты и конструирование несущих элементов с учетом реальных физико-механических характеристик композитного материала. Статический расчёт производился с учетом нагрузок от собственного веса, снеговых (для IV района) и ветровых (для II района) нагрузок согласно [13]. Для статического расчёта был использован программный комплекс «ЛИРА-САПР», реализующий метод конечных элементов.

В ходе расчёта были учтены реальные характеристики материала, приведенные в таблице 2.

При конструировании были использованы швеллера с поперечными сечениями 200x100x100мм, 102x29x6,4мм, 100x50x6мм, 76x25x4,8мм. Был определен ряд особенностей при проектировании таких конструкций. При конструировании элементы следует располагать так, чтобы направление армирования (пултрузии) совпадало с направлением действия усилия. Большое внимание при проектировании следует уделять пространственной жесткости и устойчивости конструкций, что обеспечивается устройством соответствующей системы связей.

Характеристики исследуемого материала

Показатели качества	Обозначение	Единица измерения	Значение показателя
Предел прочности при растяжении в направлении 0° , не менее	$R^H_{t,L}$	МПа	380
Предел прочности при растяжении в направлении 90° , не менее	$R^H_{t,T}$	МПа	50
Модуль упругости при растяжении в направлении 0° , не менее	$E^H_{t,L}$	ГПа	28
Модуль упругости при растяжении в направлении 90° , не менее	$E^H_{t,T}$	ГПа	8,5
Предел прочности при сжатии в направлении 0° , не менее	$R^H_{c,L}$	МПа	270
Предел прочности при сжатии в направлении 90° , не менее	$R^H_{c,T}$	МПа	150
Модуль упругости при сжатии в направлении 0° , не менее	$E^H_{c,L}$	ГПа	20
Модуль упругости при сжатии в направлении 90° , не менее	$E^H_{c,T}$	ГПа	7
Коэффициент Пуассона в направлении 0° , не менее	ν_{LT}		0,23
Коэффициент Пуассона в направлении 90° , не менее	ν_{TL}		0,1
Предел прочности на смятие штифтом в направлении 0° , не менее	$R^H_{bp,L}$	МПа	150
Предел прочности на смятие штифтом в направлении 90° , не менее	$R^H_{bp,T}$	МПа	70
Предел прочности при межслойном сдвиге, не менее	$R^H_{sh,int}$	МПа	25
Модуль при сдвиге, не менее	G^H_{LT}	ГПа	3
Коэффициент линейного температурного расширения материала профилей	α	$^\circ\text{C}^{-1}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$

Расчёты каркаса ангара с использованием треугольной стропильной фермы на стальных фасонках показали достаточную несущую способность, а конструирование – возможность выполнения различных узловых соединений из пултрузионных стеклопластиковых профилей (Рис. 3).

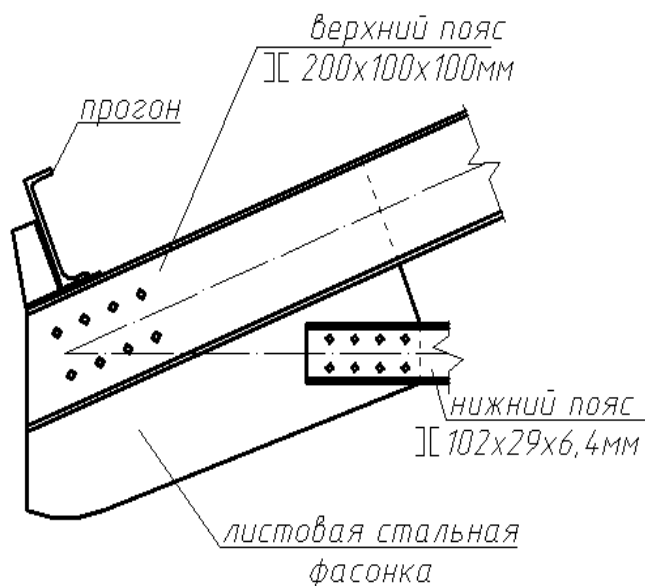


Рис. 3. - Опорный узел треугольной фермы из пултрузионных стеклопластиковых профилей

Узловые соединения элементов конструкций из пултрузионных стеклопластиковых профилей в большинстве случаев выполняются болтовыми.

Несущая способность соединения должна превышать усилие, действующее в узле. Расчёт болтовых соединений следует выполнять на срез и на смятие. При этом необходимо также учитывать ряд моментов: не следует располагать более трех болтов в ряд; диаметр отверстия не должен превышать диаметра болта более чем на 1,6 мм. Отличительной особенностью является также отсутствие возможности нарезать резьбу в материале, а, следовательно, использовать в соединениях самонарезающие самосверлящие винты.

Однако при эксплуатации здания в агрессивной химической среде стальные фасонки подвергаются коррозии и перестают удовлетворять

предъявляемым к ним требованиям. Необходимость применения пултрузионных листовых фасонки в решетчатых конструкциях явилась основанием для подачи заявки и получения патента на изобретение [14].

В данном изобретении стеклопластиковая листовая фасонка выполнена из нескольких слоев с различной ориентацией направления пултрузии (Рис.4).

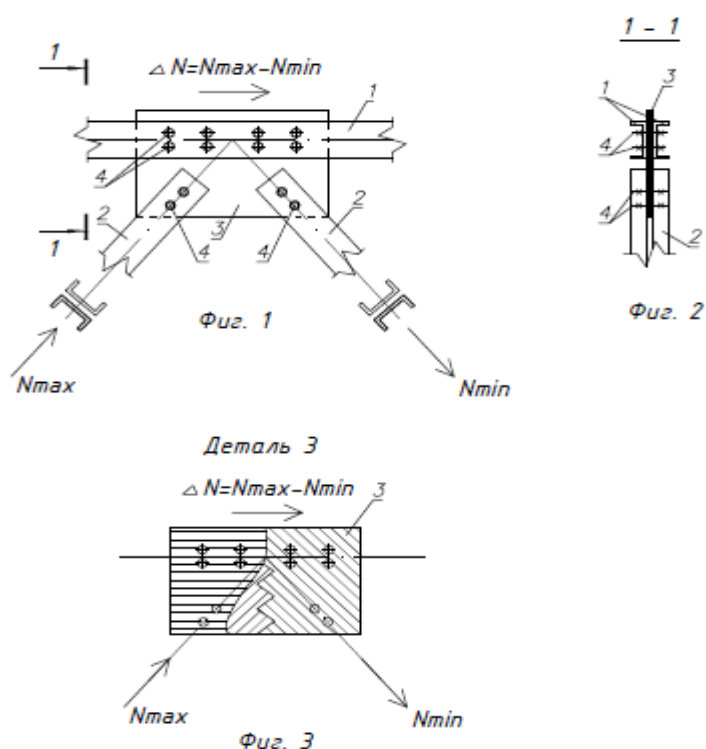


Рис. 4 - Узел соединения стеклопластиковых профилей в решетчатых конструкциях

Следующим шагом стала разработка конструкций пятирядных трибун с навесом для детских лагерей на 200 мест, расчётная схема поперечной рамы которого приведена на Рис. 5. Все примененные в проекте изделия выполнены из пултрузионного стеклопластика.

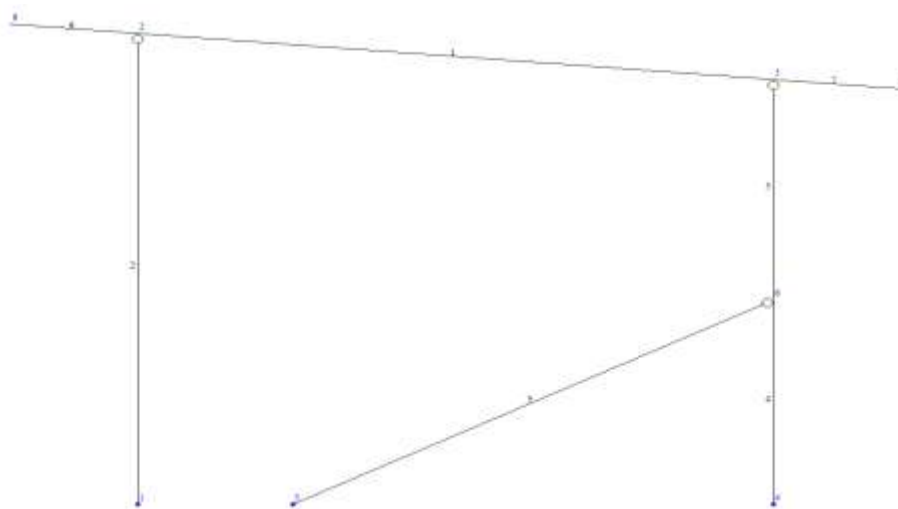


Рис. 5. - Расчетная схема поперечной рамы каркаса трибуны с навесом из пултрузионных стеклопластиковых профилей с нумерацией узлов и элементов

Статический расчёт каркаса трибуны с навесом выполнялся с учетом нагрузок от собственного веса, полезной нагрузки от веса людей (400 кг/м^2), снеговой (для IV района) и ветровой (для II района) нагрузок [13].

По результатам статического расчёта в качестве несущих элементов подобраны профили двутаврового и швеллерного сечений размерами $200 \times 200 \times 15 \text{ мм}$ и $200 \times 100 \times 10 \text{ мм}$ соответственно.

На базе научно-образовательного центра «Прочность» КГАСУ были проведены экспериментальные исследования опытных образцов элементов и их узловых соединений (Рис. 6).



Рис. 6. - Образцы для испытаний балки, листа и узловых соединений из пултрузионных стеклопластиковых профилей

Экспериментальные исследования узловых соединений были проведены с использованием универсальной испытательной машины марки ИР 5082-500. В ходе испытаний отслеживались перемещения в узлах в зависимости от прикладываемого усилия. При этом регистрация изменения нагрузки и перемещений в соединении, а также управление указанными параметрами осуществлялись в автоматическом режиме.

В результате экспериментальных исследований элементы из пултрузионных стеклопластиковых профилей и их узловые соединения подтвердили достаточную несущую способность.

Выводы

1. В ходе исследований обосновано применение пултрузионных стеклопластиковых профилей в качестве несущих конструкций сооружений. Для этого были выполнены расчеты, компьютерное моделирование и конструирование несущих конструкций ряда сооружений (ангаров, трибун, навесов) с учетом реальных физико-механических характеристик композитного материала.

2. Расчёты показали достаточную несущую способность профилей, а конструирование – возможность реализации различных узловых соединений. Так, при проектировании ангара пролетом 12м, полезной высотой 4,2м и с шагом рам 3м расход материала на несущие конструкции составил 13 кг/м², что примерно в два раза меньше аналогичного показателя для стального каркаса.

3. Экспериментальные исследования опытных образцов подтвердили достаточную несущую способность профилей и их узловых соединений, а также достоверность проведенных расчетов.

Литература

1. Ушаков А.Е., Кленин Ю.Г., Сорина Т.Г., Хайретдинов А.Х., Сафонов А.А. Мостовые конструкции из композитов // Композиты и наноконструкции. 2009. №3. С. 25-37.
2. <http://www.luettelomedia.ru/exel-composites-oyj-heinavaara-132836/>.
3. <http://www.strongwell.com/>.
4. <http://www.wernerco.com/>.
5. <https://www.owenscorning.com/>.
6. <http://www.flotenk.ru/>.
7. <http://kompozit-nn.blizko.ru/>.
8. <http://stalprom.ru/>.
9. <http://www.leader-composite.ru/>.

10. <http://www.winpul-rm.ru/>.
11. Антонов Ф.К. О возможности улучшения защитных свойств многослойных преград при использовании связующего нового типа // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб / Нижегород. ун-т, 2010. Вып.72. С 184-189.
12. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов: Учеб.-справ.пособие СПб.: Профессия, 2003. 240с.
13. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП II – 23 – 81*. – Москва, 2011.
14. Патент РФ на изобретение №2633927 от 19.10.2017.

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/Vista/7; Adobe Reader; дисковод CD-ROM; 10 Мб; Загл. с экрана.

Использованное программное обеспечение: Microsoft Office Word 2010

Статьи представлены в авторской редакции

За содержание статьи, точность приведенных фактов и цитирование
несут ответственность авторы публикаций

Объем издания: 10 Мб.

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
Государственный научный центр Российской Федерации (ФГУП «ВИАМ»
ГНЦ РФ)

Изд-во ФГУП «ВИАМ»

admin@viam.ru

МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО НАДЗОРУ
В СФЕРЕ СВЯЗИ, ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ

ФГУП НТЦ "ИНФОРМРЕГИСТР"

РЕГИСТРАЦИОННОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО
обязательного федерального экземпляра
электронного издания

№ 52330

Электронное издание на 1 CD-R
«Полимерные композиционные материалы
и производственные технологии нового поколения:
II Всероссийская научно-техническая конференция,
30 ноября 2017 г.: материалы конференции: посвящается
80-летию со дня рождения профессора, д.т.н. Георгия
Михайловича Гуныева: электронное издание.
Москва, 2017. ISBN 978-5-905217-18-0» (© 2017 ФГУП "ВИАМ").

Номер государственной регистрации обязательного экземпляра
электронного издания – 0321704537.

Производитель: ФГУП "Всероссийский научно-
исследовательский институт авиационных материалов".

И. о. директора ФГУП НТЦ "Информрегистр"



Т.В. Плескачева



19 декабря 2017 г.