



Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Государственный научный центр Российской Федерации
(НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)



**VII Всероссийская научно-техническая конференция
«Полимерные композиционные материалы и
производственные технологии нового поколения»,
приуроченная к 40-летию со дня основания
Ульяновского научно-технологического центра ВИАМ –
НИЦ «Курчатовский институт»**

Материалы конференции

24 ноября 2023 г.

Электронное издание

Москва

2023

УДК 66.018.8

ББК 30.82

П50

Редакционная коллегия:

В.В. Антипов, д.т.н. заместитель генерального директора по науке; А.В. Славин, д.т.н. начальник НИО «Полимерные композиционные материалы и технологии их переработки»; Е.А. Вешкин, к.т.н. начальник УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт»

Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения:

П50 материалы VII Всероссийской научно-технической конференции (г. Москва, 24 ноября 2023 г.), [Электронный ресурс] / НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. – М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2023. – 332 с. : ил. – ISBN 978-5-905217-92-0 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel Pentium; 1,3 ГГц и выше; Windows 7/10; Adobe Reader 6.0 и выше; дисковод CD-ROM. – Загл. с экрана.

Основные тематические направления конференции:

- полимерные композиционные материалы авиационного назначения;
- технологии изготовления ПКМ;
- технологии утилизации ПКМ;
- неавиационные области применения ПКМ.

УДК 66.018.8

ББК 30.82

ISBN 978-5-905217-92-0

© НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2023

Организационный комитет

(НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ)

Председатель:

В.В. Антипов – д.т.н., заместитель генерального директора по науке

Заместители председателя:

А.В. Славин – д.т.н., начальник НИО «Полимерные композиционные материалы и технологии их переработки»;

Е.А. Вешкин – к.т.н., начальник УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт»

Члены организационного комитета:

Е.Б. Кочемасова – начальник управления «Корпоративные коммуникации»;

А.О. Курносков – заместитель начальника НИО «Полимерные композиционные материалы и технологии их переработки»;

А.И. Сидорина – к.т.н., начальник лаборатории № 611 «Лаборатория углепластиков и органиатов»;

А.Г. Гуняева – к.т.н., заместитель начальника лаборатории № 611 «Лаборатория углепластиков и органиатов»;

Д.А. Мельников – начальник лаборатории № 625 «Лаборатория технологии и производства полимерных композиционных материалов»;

А.А. Баранников – начальник лаборатории УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт»;

Л.В. Прохорова – начальник отдела № 812 «Реклама и выставочная деятельность»;

И.Ю. Смирнова – заместитель начальника отдела № 812 «Реклама и выставочная деятельность»;

Д.С. Трушин – начальник сектора отдела № 812 «Реклама и выставочная деятельность»;

Е.М. Киселева – ведущий специалист отдела № 812 «Реклама и выставочная деятельность»;

А.В. Бабин – ведущий специалист по связям с общественностью отдела № 813 «Редакционно-издательский»;

Д.В. Жунаев – ведущий специалист отдела № 812 «Реклама и выставочная деятельность».

СОДЕРЖАНИЕ

Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт»: от базовой лаборатории до передового научно-производственного центра ПКМ.....7

к.т.н. Е.А. Вешкин; д.т.н. В.И. Постнов; А.А. Баранников; к.т.н.М.В. Постнова.

Применение углепластиков в нагруженных конструкциях авиационной и ракетно-космической техники.....31

О.Н. Комиссар; А.Н. Силкин.

Особенности технологического проектирования композитных деталей для планеров беспилотных летательных аппаратов класса MALE.....42

В.В. Соколов; Ж.В. Агашина; С.И. Войнов; П.Ю. Антипов; О.А. Голишев;
С.В. Долинский.

Локальные диссипативные процессы в эпоксидных олигомерах и их отвердителях.....55

В.А. Ломовской; С.А. Шатохина; И.Д. Симонов-Емельянов.

Анализ кинетики накопления повреждений в структуре эпоксидных полимеров под действием динамических нагрузок и натурального климатического воздействия.....75

Т.А. Низина; Д.Р. Низин, В.П. Селяев; Н.С. Канаева; И.А. Чибулаев.

Разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области полимерных композиционных материалов для изготовления интерьерных конструкций авиационной техники: развитие и применение.....91

Е.Д. Колпачков; М.И. Вавилова; И.А. Сарычев; Э.Ю. Долгов.

Результаты экспериментальных исследований влияния различных способов подготовки поверхности под склеивание крупногабаритных конструкций из углепластиков на характеристики прочности клеевых соединений.....106

Е.В. Земцова; А.И. Алямовский; Н.И. Копыл; М.Л. Обьедков; В.А. Тарасов;
В.А. Романенков.

Технология изготовления трехслойных сотовых конструкций с повышенной ударостойкостью и остаточной прочностью.....124

А.Ю. Синицын; П.Г. Бабаевский; А.В. Гайворонский; А.В. Шогенов; А.А. Ширко; С.В. Кузнецов; А.Н. Корнейчук.

Плазменная модификация приповерхностного слоя материалов для создания композиционных материалов.....139

И.К. Некрасов; И.Ш. Абдуллин.

Новая полиуретановая система покрытия для окраски изделий из полимерных композиционных материалов.....147

А.С. Сердцелюбова; Ю.К. Зверевич; Ю.И. Меркулова.

Моделирование влияния влагосодержания на эксплуатационные свойства эпоксидных полимеров с учетом натурального климатического старения.....170

Д.Р. Низин; Т.А. Низина; В.П. Селяев; И.П. Спирин.

Опыт применения эпоксидных стеклопластиков в радиопрозрачных антенных укрытиях мобильных радиолокационных станций194

А.А. Баранов; Г.С. Шуль; А.А. Ширко; Р.М. Гуськов.

Влияние конструктивно-технологических параметров клеевого соединения, осуществляемого без давления, на прочность клеевого соединения в трехслойных конструкциях.....209

Е.Ю. Куприкова; Н.В. Степанов.

Антифрикционные тканевые углеродные композиты219

А.Г. Шпенев; П.О. Буковский; А.Ю. Кривошеев.

Изучение влияния углеродных наноматериалов на электропроводность полимерных композитов с сегрегированной структурой.....231

К.А. Шиянова; М.К. Торкунов; М.В. Гудков; Н.Г. Рывкина; А.А. Гулин; В.П. Мельников.

Влияние материалов жидкой фазы различной химической природы на комплекс свойств полимерных композиционных материалов с двухфазной схемой армирования.....243

Е.А. Косенко; Н.И. Баурова.

Термостойкие стеклопластиковые сотовые наполнители.....257

С.А. Чугунов; А.Н. Корнейчук; В.С. Волков; Е.В. Денисова; И.В. Кулагина.

Новые производственные мощности для получения фторполимерных композиционных пленочных материалов.....267

П.В. Митин; М.Ю. Кацап; Б.В. Левин; Ю.В. Лякина; В.А. Печилин; Д.В. Шумилин.

Семипреги и углепластики на их основе разработки НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.....278

К.И. Донецкий; Р.Ю. Караваев; Д.В. Быстрикова; А.Д. Грачева; М.И. Мищун;
Н.А. Городилова.

К вопросу разработки структурно-имитационной модели волокнистых гибридных композитов конструкционного назначения.....297

А.И. Валиев; А.М. Сулейманов.

Модифицирование сферопластика, используемого при изготовлении конструкций аэрокосмического назначения307

А.С. Магрицкий; А.А. Богачев; И.В. Авцынова; В.А. Шогенов.

Оценка возможности изготовления и контроля качества интегральных конструкций из углепластика.....319

П.В. Капустина; Е.В. Овчарик; М.А. Ключникова; И.М. Гурьева; Е.В. Седов;
С.А. Ведерникова; А.А. Узких; Е.А. Чугунова.

УДК 659.1

**УЛЬЯНОВСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ЦЕНТР ВИАМ – НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ОТ БАЗОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ ДО ПЕРЕДОВОГО
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦЕНТРА ПКМ**

Е.А. Вешкин¹, к.т.н.; В.И. Постнов¹, д.т.н.;

А.А. Баранников¹, М.В. Постнова¹, к.т.н.

**ULYANOVSK SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL CENTER VIAM -
RESEARCH CENTER «KURCHATOV INSTITUTE» FROM BASE
LABORATORY TO ADVANCED PKM RESEARCH AND
PRODUCTION CENTER**

E.A. Veshkin¹, Candidate of Technical Sciences; V.I. Postnov¹, Doctor of
Technical Sciences; A.A. Barannikov¹, M.V. Postnova¹, Candidate of
Technical Sciences.

e-mail untcviam@viam.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ), Москва, Россия*

¹*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM), Moscow, Russia*

Аннотация

В работе рассмотрена история создания и становления филиала НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ в г. Ульяновске, который прошел

сложный путь от базовой лаборатории на авиационном заводе (УАПК) до передового научно-технологического производственного центра страны. В 2023 году Ульяновский научно-технологический центр (УНТЦ) ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» отметил своё сорокалетие, и на этот момент – это место где тесно переплетена прикладная наука в области разработки технологий переработки ПКМ, серийное производство ПКМ разработки ВИАМ и конструкций из них, что дало положительную динамику в его развитии.

Summary

The work considers the history of the creation and formation of the branch Research Center «Kurchatov Institute» - VIAM in Ulyanovsk, which has come a difficult way from the base laboratory at the aviation plant (UAPK) to the advanced scientific and technological production center of the country. In 2023, the Ulyanovsk Scientific and Technological Center (UNTC) VIAM - Research Center «Kurchatov Institute» celebrated its fortieth anniversary, and at that moment it is a place where applied science is closely intertwined in the development of PCM processing technologies, serial derivatives of PKM of VIAM development and structures from them, which gave a positive dynamics in its development.

Реферат

УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» является одним из ведущих предприятий Ульяновской области, занимающийся разработкой технологий переработки ПКМ и серийным производством материалов разработки лабораторий ВИАМ, для авиационной и других отраслей промышленности. Филиал был основан как базовая лаборатория ВИАМ на базе Ульяновского авиационно-промышленного комплекса (УАПК), для ускорения внедрения новейших материалов и прогрессивных технологий в

производство самолетов. За 40 лет своего существования УНТЦ ВИАМ превратился в научно-технологический центр, который обладает большим научно-производственным потенциалом, имеющим в своем распоряжении более 5000 м² производственных площадей, 88 сотрудников (из них 4 кандидата наук), более 100 единиц передового технологического, испытательного и измерительного оборудования.

На сегодняшний день УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» серийно производит свыше 40 наименований продукции из полимерных композиционных материалов и находится в кооперационных связях более чем с 25 предприятиями, находящимися в различных субъектах Российской Федерации.

Paper

UNTC VIAM - NIC «Kurchatov Institute» is one of the leading enterprises of the Ulyanovsk region, engaged in the development of PCM processing technologies and serial production of materials for the development of VIAM laboratories, for aviation and other industries. The branch was founded as the base laboratory of VIAM on the basis of the Ulyanovsk Aviation and Industrial Complex (UAPK), to accelerate the introduction of the latest materials and progressive technologies into the production of aircraft. Over the 40 years of its existence, UNTC VIAM has become a scientific and technological center that has great scientific and production potential, has at its disposal more than 5000 m² of production space, 88 employees (including 4 candidates of sciences), more than 100 units of advanced technological, testing and measuring equipment.

To date, the UNTC VIAM - Research Center «Kurchatov Institute» mass-produces over 40 products from polymer composite materials and is in cooperative relations with more than 25 enterprises located in various constituent entities of the Russian Federation.

Ключевые слова:

полимерные композиционные материалы, малотоннажные производства, полимерные связующие, препреги, технологии, покрытия, заготовки ПКМ

Keywords:

polymer composites, small-tonnage production, polymer binders, prepregs, technologies, coatings, PCM blanks

В 2023 году НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ отметил 91 годовщину с момента своего основания (основан 28 июня 1932 г.). История ВИАМ это история рождения и становления новой науки авиационного материаловедения, история возникновения и развития ресурсно-сырьевых и материаловедческих предприятий отрасли. На основе фундаментальных и прикладных исследований в институте создавались и осваивались в промышленности новые материалы [1].

Именно для ускорения освоения новых материалов на предприятиях авиационной отрасли, и не только на них, создавались филиалы ВИАМ по всему СССР [2]. Исключением не стал и Ульяновский авиационно-производственный комплекс (УАПК), строительство которого началось с середины 70-х годов XX века, и на базе которого приказом МАП № 15 от 5 марта 1983 года была организована базовая научно-исследовательской лаборатории (БНИЛ) ВИАМ, предназначенная для ускорения внедрения новых материалов и прогрессивных технологических процессов в серийное производство авиационной техники.

С этого момента начинается история УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт». Временной период после образования БНИЛ ВИАМ на Ульяновском авиационно-промышленном комплексе (в настоящее время Филиал ПАО «Ил» - Авиастар) до настоящего времени можно условно разделить на три этапа:

Этап 1. 1983–1998 гг. Становления научного коллектива лаборатории, определение приоритетных технологических направлений по реализации разработок лабораторий ВИАМ, создание новых технологических и конструкторских решений.

Этот период неразрывно связан с серийным производством самолетов Ан-124-100, Ту-204 и их модификаций на УАПК (рис. 1).

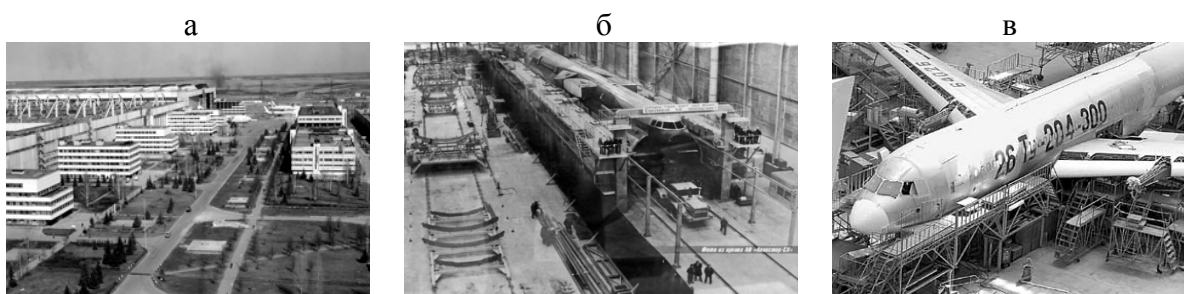


Рис. 1 – БНИЛ ВИАМ на базе УАПК: а – вид на УАПК; б – Ан-124-100 в стапелях сборочного цеха; в – Ту-204 в стапелях сборочного цеха

Перед БНИЛ ВИАМ на УАПК были поставлены следующие задачи:

- внедрение металлических и неметаллических композиционных материалов в изделия;
- внедрение прогрессивных материалов и технологических процессов, обеспечивающих надежную антикоррозионную защиту изделий;
- совершенствование и внедрение технологических процессов термической обработки, литья, объемной штамповки из легких сплавов и сталей;
- разработка неразрушающих методов контроля качества материалов, деталей и узлов изделий.

С поставленными задачами молодой коллектив БНИЛ ВИАМ успешно справлялся, однако к концу 1980-х годов наступала новая эпоха.

В СССР отраслевая наука была плотно встроена в систему государства. Пока государство было стабильным, наука, административно

разделенная по отраслям, также составляла единый организм. Поэтому самым драматичным периодом в новейшей социально-экономической истории России для научного сообщества стали 1990-е годы [3].

Произошел переход от плановой экономики к рыночной, и в связи с отменой Госплана начался резкий спад производства летательных аппаратов в авиационной отрасли страны. УАПК был преобразован в ЗАО «Авиастар-СП» и реструктуризирован, в результате чего в тяжелом финансовом положении оказалась и базовая лаборатория ВИАМ, связанная с заводом договорами и пользующаяся его инфраструктурой. В 1993 г. базовая лаборатория после нескольких переименований преобразована в Ульяновское технологическое научно-исследовательское отделение (НИО-90) ВИАМ.

И только благодаря усилиям нового руководства ВИАМ филиал был не только сохранен, но в 1999 г. обзавелся собственной производственной площадкой (рис. 2).



Рис. 2 – Производственная площадка Ульяновского технологического научно-исследовательского отделения (НИО-90) ВИАМ

Однако после 1990-х годов, кризисных для авиационной отрасли, в НИО-90 ВИАМ действующими остались два направления:

– Технологии изготовления полуфабрикатов и крупногабаритных конструкций из ПКМ.

– Физико-химические способы обработки и защиты поверхности деталей.

С этого момента начинается следующий этап развития филиала.

Этап 2. 1999–2008 гг. Этап создания научно-технологического центра по разработке расплавных связующих, препрегов и изделий из ПКМ. Зарождение малотоннажного производства.

В 2001 г. НИО-90 ВИАМ преобразован в Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ (УНТЦ ВИАМ).

В указанный период коллективом лаборатории «Технологии изготовления полуфабрикатов и крупногабаритных изделий из ПКМ» были решены крупные научно-технологические задачи в направлениях:

– производство препрегов на расплавных связующих для авиационных конструкций (расплавные связующие ЭДТ-69Н, ФПР-520, ВСО-200);

– проектирование и изготовление полимерной формообразующей оснастки;

– разработка технологий и изготовление конструкций из ПКМ для автомобильного, железнодорожного транспорта и др.;

В лаборатории «Физико-химических способов обработки и защиты поверхности деталей» УНТЦ развиваются следующие технологические направления:

– кластерные гальванические покрытия;

– пиролитические покрытия;

– избирательное осаждение (ремонт) покрытий.

Достижения указанного выше периода подробно описаны в книге [1].

Этап 3. С 2009 года по настоящее. Совершенствование научно-технологической базы, развитие малотоннажных производств по изготовлению серийной продукции из ПКМ.

Данный период развития УНТЦ ВИАМ связан с созданием новых производственных участков и освоением на них серийных производств продукции (материалов разработки ВИАМ, препрегов и конструкций на их основе) совместно с лабораториями ВИАМ. В этот период проходит реорганизация производственной базы УНТЦ.

В 2009–2011 гг. за счёт средств Федеральных целевых программ (ФЦП) осуществлена реконструкция существующих и строительство новых зданий, приобретено 45 единиц технологического и исследовательского оборудования (обновление основных фондов на 85 %) и дополнительно, к 1200 м² имеющихся, введено в эксплуатацию 865,8 м² производственных площадей (рис. 3), что позволило освоить серийный выпуск ряда продукции.



Рис. 3 – Производственная площадка УНТЦ ВИАМ после реконструкции

С 2012 года в ВИАМ начата реализация «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года», формируются новые направления развития Центра. С целью их реализации осуществляется комплекс мер по созданию новых ПКМ и их постановки на производство совместно с лабораториями ВИАМ. Так в период с 2012 по настоящее время, только в филиале коллективами лабораторий успешно реализованы следующие научно-исследовательские работы (НИР):

Разработка ПКМ нового поколения, технологий их изготовления и конструкций строительного назначения на их основе, изготавливаемые

методом вакуумной инфузии из компонентов российского производства. Результаты научно-исследовательской, технологической и интеллектуальной деятельности (РИД) позволили построить арочный автомобильный двухполосный мост в р.п. Языково Ульяновской области длиной 19,6 метров, шириной 12 метров грузоподъемностью до 100 тонн (рис. 4).



Рис. 4 – Мост в р.п. Языково Ульяновской области: а – мост до реконструкции; б – мост после реконструкции; в – интеллектуальная система контроля движения встроенная в дорожное полотно моста

Разработка технологии изготовления конструкций из ПКМ нового поколения для авиационной техники различного назначения. РИД позволили внедрить на предприятиях авиационной отрасли технологии по изготовлению различных конструкций из ПКМ нового поколения. Примером такого внедрения является элемент конструкции мотогондолы ПД-14 (рис. 5).



Рис. 5 – Элементы конструкции мотогондолы ПД-14

Разработка технологий ремонта конструкций из ПКМ в том числе с применением автоматизированной системы контроля температуры и давления в зонах ремонта в условиях эксплуатации;

Разработка технологии автоматизированного и ручного неразрушающего контроля для лопастей несущего и рулевого винта из ПКМ в условиях производства и эксплуатации и технологии их ремонта в условиях эксплуатации. РИД позволят сократить технологический цикл ремонта конструкций из ПКМ за счет исключения этапа транспортировки в авиаремонтные предприятия (в большинстве случаев), а также увеличить ресурс изделий (рис. 6).



Рис. 6 – Ремонт конструкции из ПКМ вертолетной техники

Разработка технологии изготовления клеевых препрегов для радиопрозрачных конструкций с максимальными рабочими температурами 80, 120 и 175 °С. РИД позволили производить широкую номенклатуру препрегов стеклопластиков радиотехнического назначения для изготовления головных (носовых) обтекателей изделий авиационной техники с высокими показателями упруго-прочностных и функциональных свойств полимерного композиционного материала в конструкции.

Разработка технологии изготовления обтекателей ВВСТ радиотехнического назначения из препрегов марок КМКС. РИД позволили изготовить высокогерметичную конструкцию обтекателя для изделия ВВСТ, эксплуатируемых в интервале от –60 до 150 °С; улучшить радиотехнические (в 1,5 раза), весовые (в 2 раза), прочностные и

аэродинамические характеристики обтекателя; значительно упростить технологический процесс изготовления обтекателя (рис. 7).



Рис. 7 – Обтекатель для изделия ВВСТ

Разработка технологий изготовления клеевых пленок, пленок связующих и препрегов нового поколения на их основе для изделий авиационной техники. РИД позволили производить широкую номенклатуру препрегов нового поколения с высокими показателями упруго-прочностных и функциональных свойств полимерного композиционного материала в конструкции на их основе;

Разработка технологий изготовления препрегов стеклопластиков на основе связующего ВСЭ-34 и стеклянных тканей марок Т-10 и Т-64 для применения в элементах фюзеляжа перспективного скоростного вертолета. РИД позволили выпускать препреги нового поколения с высокими показателями упруго-прочностных и функциональных свойств полимерного композиционного материала в конструкции на их основе;

Разработка технологии изготовления заготовок панелей пола из композиционных материалов для воздушных судов. РИД позволили выпускать продукцию с характеристиками на уровне мировых аналогов, провести импортозамещение ЗПП, а именно ЗПП компании «AIM Altitude

UK Ltd» (Великобритания), и сократить их стоимость на 10 %, по сравнению с зарубежным аналогом приведенной компании (рис. 8).



Рис. 7 – Заготовки панелей пола самолета Ил-114-300: а – заготовка панели пола в подкресельной зоне; б – заготовка панели пола в зоне проходов/выходов сервисной зоны

Разработка технологии изготовления заготовок жестких элементов воздуховодов низкого давления на основе стеклопластиков марок ВПС-42П и ВПС-42П/Т-64 и гибких на основе тканепленочного материала Атом-2 системы кондиционирования воздуха. РИД позволили изготавливать сложнопрофильные элементы конструкции без применения склейки; изготавливать гибкие элементы трубопроводов длиной до 1,5 м и диаметром до 150 мм; снизить массу воздуховодов не менее чем на 40 % по сравнению с СКВ из алюминиевых сплавов (рис. 8).

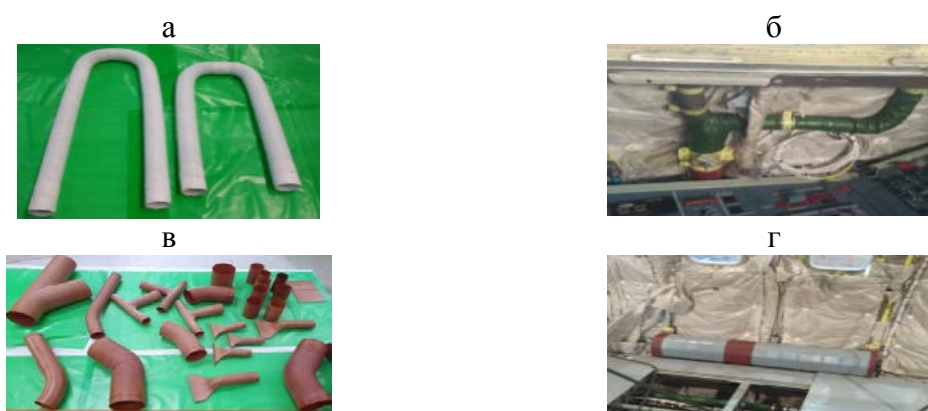


Рис. 8 – Элементы СКВ самолета Ил-114-300: а – заготовка гибкого элемента СКВ; б – заготовка гибкого элемента СКВ в составе самолета Ил-114-300; в – заготовка жесткого элемента СКВ; г – заготовка жесткого элемента СКВ в составе самолета Ил-114-300

Разработка технологии изготовления обтекателей ВВСТ (расшифровать) радиотехнического назначения из синпрега микросферотекстолита марки МСТ-5К. РИД позволили изготовить высокогерметичную конструкцию обтекателя для изделия ВВСТ, эксплуатируемых в интервале от – 60 до 400 °С; улучшить радиотехнические (в 1,5 раза), весовые (в 2 раза), прочностные и аэродинамические характеристики обтекателя; значительно упростить технологический процесс изготовления обтекателя (рис. 8).



Рис. 9 – Обтекатели ВВСТ из МСТ-5К

Разработка технологий подготовки поверхности полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов плазмой атмосферного давления под склеивание. РИД позволяют повысить прочность клеевых соединений ПКМ-ПКМ на основе клеевых препрегов в 1,5–2,5 раза (рис. 10).



Рис. 10 – Обработка листового стеклопластика плазмой атмосферного давления

Для реализации разработок ПКМ ВИАМ в серийном производстве центра с 2012 года создаются новые производственные, технологические и испытательные участки, которые за счет средств ВИАМ оснащаются передовым оборудованием:

– участки изготовления растворных и расплавных полимерных связующих оснащены якорными и планетарными смесителями объемами от 0,16 м³ до 0,25 м³ (рис. 11);



Рис. 11 – Участки изготовления связующих: а – растворных связующих;
б – расплавных связующих

– участок изготовления препрегов на основе растворных связующих, оснащен двумя линиями по изготовлению препрегов (на основе растворных и высококонцентрированных связующих) (рис. 12);



Рис. 12 – Участок изготовления препрегов на основе растворных связующих

– участок раскроя и выкладки слоев препрегов в технологические пакеты («чистая комната», класс 8 ИСО) оснащен планшетным плоттером и многофункциональным фрезерно-раскроечным станком (рис. 12);



Рис. 13 – Участок раскроя, выкладки и сборки технологических пакетов
«чистая комната»

– участок прессового формования оснащен прессами с рабочей температурой до 250 °С, с максимальным усилием давления от 50 до 160 тонн и рабочей зоной размером от 500×500 до 2500×1300 мм (рис. 14);



Рис. 14 – Участок прессового формования

– участок вакуум-автоклавного формования участок оснащен автоклавом с максимальной рабочей температурой 250 °С и давлением до 0,16 МПа, габаритными размерами рабочей зоны (Д×Ш×В) 2500×1200 мм (рис. 15);



Рис. 15 – Участок вакуум-автоклавного формования

– участок вакуумного, вакуум-печного формования оснащен мобильной вакуумной станцией, термопечью с максимальной рабочей температурой 250 °С, габаритными размерами рабочей зоны (Д×Ш×В) 6000×2500×2000 мм с системой зонного нагрева и 1000×1000×1000 мм, мобильной вакуумной станцией с АПУ и подогревом (рис. 16);



Рис. 16 – Участок вакуум-печного формования

– изолированный участок изготовления препрегов марок КМКС для радиопрозрачных конструкций (рис. 17);



Рис. 17 – Линия по изготовлению препрегов марок КМКС

– участок механической обработки и раскроя оснащен форматно-раскроечными станками, трехкоординатными фрезерными станками с размерами рабочей зоны 2500×1300×250 и 1000×1000×250 мм соответственно (рис. 18);



Рис. 18 – Фрезерные станки с программным управлением

Проведение входного контроля материалов, приемо-сдаточных испытаний изготовленной продукции, формирование научно-технического задания и испытаний для сторонних организаций осуществляются на мощностях участка испытаний ПКМ (рис. 19).

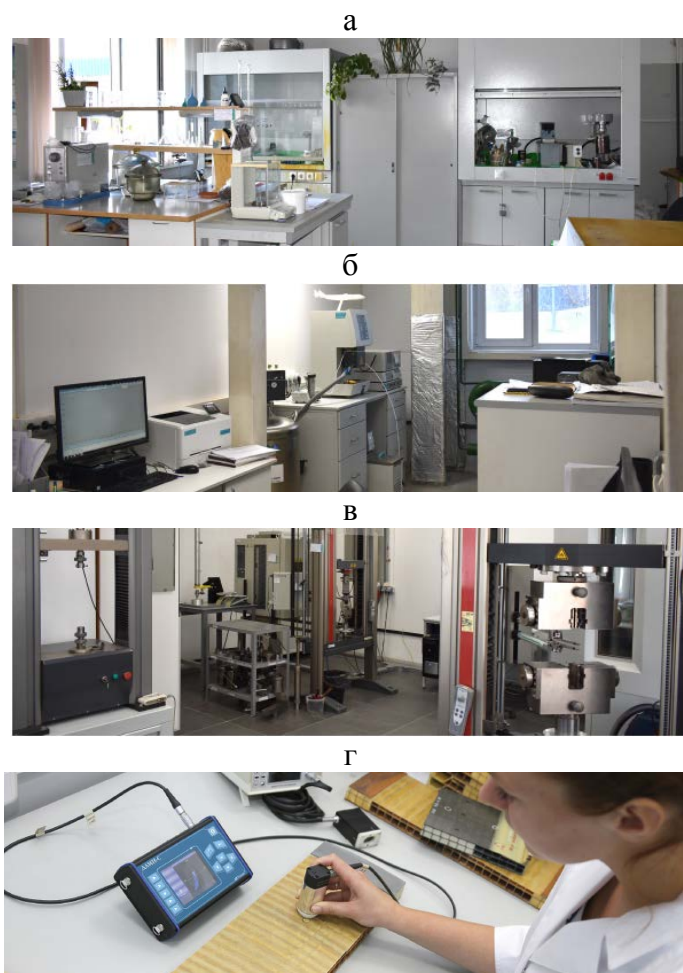


Рис. 19 – Участок испытаний ПКМ: а – участок физико-химических исследований; б – участок физико-механических испытаний; в – участок термических испытаний и анализа; г – участок неразрушающего контроля трехслойных конструкций из ПКМ

На участке проводятся:

- физико-химические исследования;
- физико-механические испытания;
- термические испытания и анализ;
- неразрушающий контроль трехслойных конструкций.

Участок оснащен:

- универсальными электромеханическими испытательными машинами с усилием 0,5; 5 и 10 тонн со встроенными климатическими камерами с температурами от –60 до +250 °С и от 20 до 250 °С;
- металлографическими микроскопами с увеличением до $\times 1000$;
- дифференциальным сканирующим калориметром;
- прибором для динамического механического анализа;
- термографическим анализатором (термомикровесами);
- процессорным тензиомером для определения краевого угла смачивания методом Вельгельми–Вашбурна и др.;
- оптическим гониомером для определения краевого угла смачивания методом «лежащей капли» и др.;
- профилометром для измерения шероховатости по Ra и Rz ;
- портативной измерительной рукой с точностью 40 мкм;
- стендом по определению ресурса заготовок панелей пола методом «катания тележки»;
- стендом по определению герметичности элементов СКВ в соответствии с ОСТ 1 00128–74;
- установка для обработки плазмой атмосферного давления;
- гидроабразивная установка, для изготовления резки образцов и деталей.

В период с 2019 по 2021 г. был построен уникальный Лабораторно-производственный корпус по выпуску полимерных композиционных материалов и покрытий (рис. 20) оснащенный современным

автоматизированным высокотехнологичным оборудованием мирового уровня. В марте 2021 году корпус введен в эксплуатацию. В этом же году приказом № Пр-У-2021-89 Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ переименован в Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт».

Общая площадь лабораторно-производственного корпуса составляет 2045 м², производственная мощность в год: до 1 000 000 м² препрегов, до 160 000 м² пленок связующих.



Рис. 20 – Лабораторно-производственный корпус по выпуску полимерных композиционных материалов и покрытий

На сегодняшний день производственные мощности по выпуску ПКМ авиационного назначения в УНТЦ следующие:

- до **60 000 кг** в год полимерных связующих растворного и расплавного типа;
- до **60 000 пог. м** в год препрегов и семипрегов;
- до **20 000 листов** в год тонколистового органопластика;
- до **100 м²** в год полимерной формообразующей технологической оснастки;
- до **1 000 000 пог. м** в год препрегов на основе расплавных связующих;
- до **160 000 пог. м** в год пленочных клеев;
- до **1 500 м²** в год заготовок панелей пола;
- до **800 комплектов в год** заготовок радиопрозрачных обтекателей;

– до **10 самолетоккомплектов** в год жестких и гибких элементов конструкций систем кондиционирования воздуха (СКВ).

В результате научно-производственной деятельности сотрудников филиала и лабораторий НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, освоено внедрение разработок в условиях малотоннажного производства УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт». Результатом указанного симбиоза научной и производственной деятельности, является то, что в настоящее время филиал производит **свыше 40 наименований** серийной продукции (таблица 1) и находится в кооперационных связях **более чем с 25 предприятиями**, в различных субъектах Российской Федерации.

Таблица 1

Продукция УНТЦ ВИАМ

Полуфабрикаты	
Полимерные связующие и сферопласты	Препреги
<ul style="list-style-type: none"> • Связующее УП-2227Н • Связующее ВФТ • Связующее ЭДТ-69Н • Полимерный наполнитель-сферопласт ВПЗ-16М • Связующее РС-Н • Связующее ВСФ-16М 	<ul style="list-style-type: none"> • Синпрег микросферотекстолита МСТ-5К • Т-10-14.ЭДТ.35Р • ВПС-39П • КМУ-11ТР • ПТ-15(П).ВСФ-16М • ПАТ-15(П).РС-Н.50 • ВПС-42П/Т-64
Препреги марки КМКС	Препреги нового поколения
<ul style="list-style-type: none"> • КМКС-1.80.Т10 • КМКС-1.80.Т10 • КМКС-1.80.Т25 • КМКС-2.120.Т10 • КМКС-2.120.Т15(П) • КМКС-2м.120.Т10 • КМКС-4.175.Т10 • КМКС-4.175.Т15 • КМКС-4м.175.Т64 • КМКС-4к.175.ТС8/3К 	<ul style="list-style-type: none"> • ВКУ-39/ВтКУ-2.200 • ВКУ-29/ВтКУ-3 • ВКУ-25/SYT49S • ВСП-3М/Т-25 • ВСП-3М/ВтКУ-2.280 • ВПС-31.28 • ВПС-31.32 • ВСП-3М/РВМПН-10-400/SYT49S • ВКУ-60 • ВКУ-60/ВтКУ-2.200
Пленки клеевые	Тонколистой органопластик
<ul style="list-style-type: none"> • ВК-36 • ВК-36Р • ВК-36.РТ-140 • ВК-36.РТ- 170 • ВК-102А 	<ul style="list-style-type: none"> • Органит 11ТЛ

Заготовки авиационных конструкций из ПКМ	
Заготовки панелей пола	Заготовки радиопрозрачных конструкций
<ul style="list-style-type: none"> • ЗПП-1-2 • ЗПП-1-3 • ЗПП-2-2 • ЗПП-3-2 • ЗПП-3-3 	<ul style="list-style-type: none"> • Заготовка радиопрозрачной конструкции из синпрега микросферотекстолита МСТ-5К • Заготовка радиопрозрачной конструкции из препрегов марки КМКС
Заготовки гибких и жестких элементов конструкции СКВ	
<ul style="list-style-type: none"> • Заготовка гибких элементов конструкции СКВ • Заготовка жестких элементов конструкции СКВ 	

Производство выше обозначенной серийной продукции осуществляется на соответствующих участках, оснащенных необходимым технологическим оборудованием и измерительным инструментом в соответствии с нормативной документацией.

Одновременно в УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» активно развивается направление материалов, технологий и оборудования для ремонта конструкций из ПКМ. Создан ряд материалов на основе углеродного (ВКУ-45.РТН-3К) и стеклянного (ВПС-53/Т10) армирующего наполнителя и технологий ремонта монолитных и многослойных конструкций, также автоматизированная система контроля температуры и давления в зонах ремонта, которые позволяют сократить издержки и технологический цикл ремонта конструкций из ПКМ за счет: исключения этапа транспортировки в авиаремонтные предприятия (в большинстве случаев), применения материалов с коротким циклом отверждения, применением безавтоклавных методов формования, увеличения гарантированного срока хранения материалов и т. д., а также увеличить ресурс изделий.

Кроме того совместно с учебным центром НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводится дополнительное профессиональное обучение по курсу «Технологии ремонта конструкций из ПКМ» (обучение прошли специалисты авиационной и судостроительной отраслей) (рис. 21).

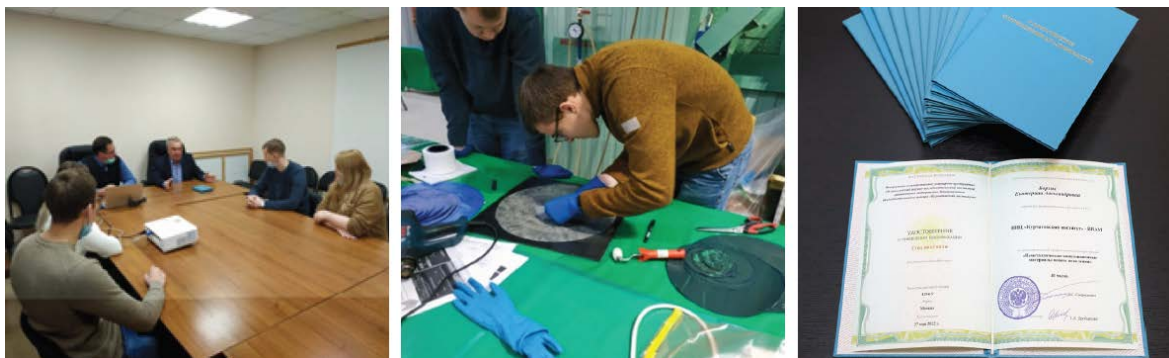


Рис. 21 – Процесс получения дополнительного профессионального образования по курсу «Технологии ремонта конструкций из ПКМ»

В период с 1999 по настоящее время в УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» успешно выполнено **более 40 НИР** направленных на разработку и совершенствование технологий изготовления связующих, препрегов, синпрегов, семипрегов, конструкций из ПКМ, функциональных антикоррозионных покрытий, средств технологического контроля и др.

За указанный период специалистами УНТЦ ВИАМ разработано: ТР – 54; ТИ – 37; ТУ – 20; ДТП – 2; ММ – 7; Паспортов на материал – 9; ОТР – более 20. Защищены 7 кандидатских и 1 докторская диссертация. Опубликовано более 300 статей в ведущих научно-технических журналах. В собственном производстве серийно освоено более 40 технологических процессов

Подытоживая вышеперечисленное можно заключить, что УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» является одним из ведущих центров страны в области разработки технологий и производства ПКМ, обладающий современным оборудованием мирового уровня. Научно-технологические достижения и значимость экономических показателей УНТЦ ВИАМ - НИЦ «Курчатовский институт» связана напрямую с деятельностью следующих сотрудников, которые работали и работают в филиале: Ткаченко В.Н., Постнов В.И., Казаков И.А., Залевский Н.Г.,

Никитин К.Е., Ильин В.А., Вешкин Е.А., Плетинь И.И., Сатдинов А.И., Абрамов П.А., Налетов Б.П., Тюриков Е.В., Родионов В.П., Баранников А.А., Сатдинов Р.А., Семенычев В.В., Салахова Р.К., Юдин А.А., Качура С.М., Семина Т.А., Кубец Ю.С., Бурхан О.К., Макрушин К.В., Кулеш Л.П., Постнова М.В., Орзаев В.Г., Антонов А.И., Семенычева Л.И., Редька Н.А. и др.

В этой связи вспоминая высказывание академика АН СССР, генерального конструктора авиационных и ракетных двигателей Н.Д. Кузенцова: «Создание рабочего коллектива сложнее, чем разработка авиационного двигателя и самолета», данное высказывание наглядно подтверждается на примере УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт».

Основным источником пополнения кадрового потенциала в настоящее, являются вузы Ульяновской области – УлГТУ и УЛГУ, где сформированы базовые кафедры, в условиях которых с 1989 по настоящее время проводится обучение студентов, а также осуществляется прохождение технологических и преддипломных практик. Таким образом, в настоящее время до 50 % сотрудников филиала являются выпускниками этих вузов.

Благодаря проделанной работе создана уникальная научно-производственная площадка позволяющая формировать научно-технический задел, новые технологические решения в производстве ПКМ и реализующая замкнутый цикл производства серийной продукции. В настоящее время Центр обладает большим научно-производственным потенциалом, имея в своем распоряжении более **5000 м², 88 сотрудников** из них ИТР – 47, рабочие специальности – 36, средний возраст сотрудников **45 лет. 54 сотрудника с высшим, 23 с средне-профессиональным образованием, 3 к.т.н. и 1 к.э.н.**, более 100 единиц технологического, исследовательского и измерительного оборудования.

Будущее развитие научно-производственной деятельности УНТЦ ВИАМ – НИЦ «Курчатовский институт» предусмотрено в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» и других государственных целевых программ, таких как:

Разработка технологий изготовления полуфабрикатов, деталей, конструкций из ПКМ;

Проектирование и изготовление металлической и полимерной формообразующей оснастки;

Создание новых и расширение имеющихся мощностей по выпуску полуфабрикатов и элементов конструкций из ПКМ;

Разработка материалов, технологий и оборудования для ремонта конструкций из ПКМ,

Проведение курсов дополнительного профессионального образования по технологиям ремонта конструкций из ПКМ.

Литература

1. История авиационного материаловедения. ВИАМ 80 лет: годы и люди / Под общ. ред. академика РАН, профессора Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. С. 5.

2. Прямая речь: сборник интервью академика Е.Н. Каблова / сост. А.В. Бабин, Н.В. Быкова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. С. 202.

3. ВИАМ 90 лет: гордимся прошлым, создаем будущее / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2022. С. 83.

УДК 629.7.02 : 621.002.3

**ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕПЛАСТИКОВ В НАГРУЖЕННЫХ
КОНСТРУКЦИЯХ АВИАЦИОННОЙ
И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

О.Н. Комиссар, к. т. н.; А.Н. Силкин

**THE USE OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS IN LOADED
STRUCTURES OF AVIATION AND ROCKET AND SPACE
ENGINEERING**

O.N. Komissar, Candidate of Sciences; A.N. Silkin

oleg.komissar@technologiya.ru

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

JSC «OR&PE «Technologiya» named after A.G. Romashin», Obninsk, Kaluga
Region, Russia

Аннотация

В статье приведена статистика по наиболее распространенным типам и механическим характеристикам применяемых конструкционных углепластиков на основе углеродных волокон, лент и тканей в отечественной авиационной технике, ракетах-носителях и космических аппаратах. Приведены результаты исследования влияния на механические характеристики углепластиков конструктивно-технологических факторов.

Abstract

The article provides statistics on the most common types and mechanical characteristics of structural carbon fiber reinforced plastics based on carbon fibers, tapes and fabrics used in domestic aviation engineering, carrier rockets and space vehicles. The research results of influence of structural and processing factors on the mechanical characteristics of carbon fiber reinforced plastics are presented.

Ключевые слова:

углепластик, углеродный наполнитель, волокно, модуль упругости, предел прочности, технология, реализация механических характеристик

Keywords:

carbon fiber reinforced plastics; carbon filler; fiber; modulus of elasticity; tensile strength; technology; realization of mechanical characteristics

Введение

В 1972 году ФГУП "ВИАМ" разработал первый конструкционный углепластик на основе эпоксидной матрицы, который был применен в конструкции космического аппарата "Венера". Начало промышленного использования углепластиков было положено в 1976 году выпуском Постановления Совета Министров СССР № 132-51 "О создании многоцветной космической системы", в состав которой входил многоцветный воздушно-космический корабль "Буран". В конструкции трехслойных панелей створок отсека полезного груза (СОПГ) планера корабля был применен углепластик ФГУП "ВИАМ" марки КМУ-4Э на основе углеродной среднемодульной ленты ЭЛУР-П с температурой эксплуатации до 150 °С, который успешно прошел полный цикл эксплуатации во время орбитального полета корабля "Буран" 15 ноября 1988 года. В этом же году был выпущен первый государственный стандарт ГОСТ 28006-88 на углеродные ленты. Данный тип углеродного

наполнителя позже был применен в хвостовом оперении пассажирских самолетов Ту-204, Ту-214 и транспортного самолета Ан-70.

В период с 1985 по 1992 годы вторая модификация космического корабля "Буран" и новый многоразовый воздушно-космический самолет "Молния" (НПО "Молния") содержали конструкции из углепластика КМУ-8 ФГУП "ВИАМ" на основе углеродной ленты ЭЛУР-П и расплавленного связующего ПАИС с температурой эксплуатации до 200 °С.

С 1990 года в крыле, фюзеляже, хвостовом оперении и аэродинамической механизации спортивно-пилотажных самолетов Су-26, Су-29, Су-31, Су-49 и высокоманевренного самолета Су-47 (ОКБ "Сухой") с крылом обратной стреловидности начали применяться углепластики ФГУП "ВИАМ" на основе нового типа среднепрочных (среднемодульных) углеродных волокон в виде жгута УКН-П/5000, ленты УОЛ и ткани УТ-900.

С начала 2000-х годов для оболочек головных обтекателей, отсеков ступеней ракет-носителей "Рокот" и "Протон-М" (ГННПЦ им. М.В. Хруничева), деталей элементов космических аппаратов начали применяться препреги АО "ОНПП "Технология" на основе углеродных лент ЛУ-П, Грапан, Porcher 4500, Porcher 4510 и углеродных тканей Porcher 3692, Porcher 3750 [1].

При разработке высоконагруженных деталей крыла, центроплана и хвостового оперения нового отечественного пассажирского самолета МС-21 (Корпорация "Иркут") были выбраны препрег компании Hexcel (США) из высокопрочных (среднемодульных) углеродных волокон UD194/ИМА-12К и однонаправленные сухие ленты Cytac (США) из углеродных волокон IMS65-24К [2]. В последние годы компанией "Юматекс" (Россия) организовано производство широкой гаммы отечественных высокопрочных углеродных волокон марок С130UD, С200UD, УМТ49S-12К, УМТ45S и высокомодульных волокон марки УМТ430-12К. Данные

углеродные волокна начали активно заменять импортные аналоги в производимых в настоящее время агрегатах авиационной и ракетно-космической техники.

Критерии применения углепластиков

Целесообразность применения тех или иных типов углеродных волокон в агрегатах определяется специфическими условиями их эксплуатации. Так, нагруженные агрегаты самолета воспринимают высокие знакопеременные нагрузки во время многолетнего цикла эксплуатации в интервале температур от -40 до $+120$ °С в условиях климатического воздействия. Поэтому для них наиболее предпочтительными являются углеродные волокна с высокой прочностью.

В отличие от авиации отсеки ракет-носителей испытывают невысокую нагрузку, в основном, сжатия в течение нескольких минут и как отработанный агрегат отделяются от ракеты. Для предотвращения потери устойчивости оболочек целесообразно применять углепластики с высоким модулем упругости. Для защиты полезного груза от высокого уровня акустического воздействия и повышения частот собственных колебаний в конструкциях оболочек головных обтекателей используют сотовые заполнители и высокомодульные (среднепрочные) углепластики.

Детали элементов космических аппаратов при эксплуатации в открытом космосе не подвержены силовому нагружению. Показателями качества деталей являются стабильность размеров при изменении внешней температуры и отсутствие собственных колебаний при включении двигателей корректировки орбиты. Для таких деталей требуются углепластики с высоким модулем упругости и высокой теплопроводностью.

Таким образом, по условиям эксплуатации можно выделить три основные группы агрегатов: высоконагруженные агрегаты самолетов;

несущие отсеки ракет-носителей; размеростабильные конструкции космических аппаратов (рис. 1).



Рис. 1 – Агрегаты авиационной и ракетно-космической техники с углепластиковыми элементами

При условии удовлетворения требованиям эксплуатации массовая эффективность связана с объемом применения углепластика в агрегате (рис. 2). С увеличением размеров агрегата массовая эффективность повышается в связи с уменьшением доли металлических крепежных элементов.

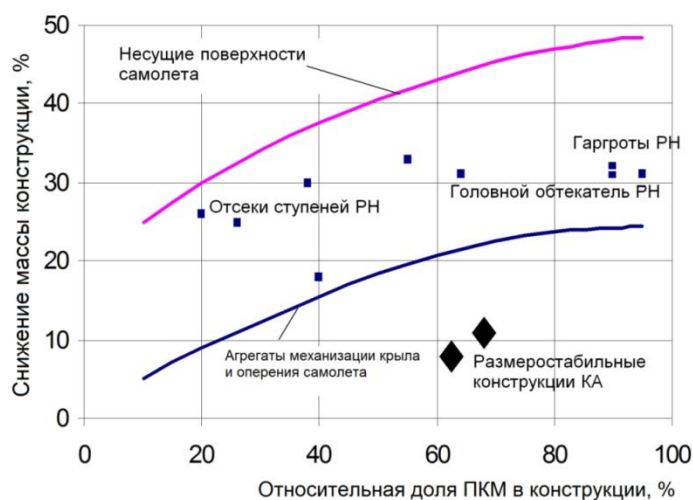


Рис. 2 – Массовая эффективность применения углепластиков в агрегатах авиационной и ракетно-космической техники

Механические свойства углепластиков

Для авиационной и ракетно-космической техники НИЦ "Курчатовский институт" – ВИАМ разработал широкую гамму углепластиков на основе разных типов отечественных и зарубежных углеродных волокон [3–5]. Из всего перечня механических характеристик однонаправленных полимерных углепластиков, указываемых в паспортах на материал, наиболее информативными для конструктора являются предел прочности и модуль упругости при растяжении вдоль направления волокон. Соотношение этих характеристик в материале чаще всего предопределяет его применимость в конкретных нагруженных или несущих агрегатах. На рисунке 3 приведены эти две механические характеристики для углепластиков, чаще всего применяемых в отечественной аэрокосмической технике. На рисунке в маркировке углепластиков использована маркировка углеродных волокон в связи с тем, что эти характеристики непосредственно связаны с прочностью волокон наполнителя. Приведенные значения соответствуют данным, указанным в паспортах или технических условиях на материал. Для сравнения приведены соотношения характеристик для алюминиевых и титановых сплавов, а так же углепластиков на основе тканей.

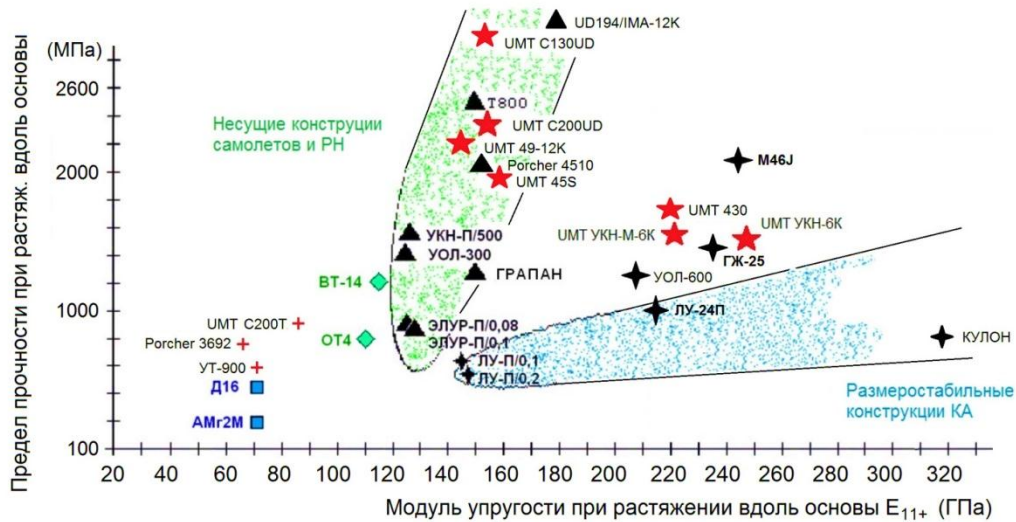


Рис. 3 – Соотношение механических характеристик однонаправленных углепластиков, применяемых в отечественной аэрокосмической технике

На схеме хорошо видно, что применяемые углепластики образуют группы, которые соответствуют применению в несущих нагруженных конструкциях самолетов и ракет-носителей (высокая прочность и средний модуль упругости), а так же в ненагруженных размеростабильных конструкциях космических аппаратов (высокий модуль упругости и низкая прочность). Первая группа является более динамичной в части появления новых углепластиков с улучшенными свойствами. При этом предел прочности углепластика увеличился более чем в 3 раза, а модуль упругости только на 40 % по сравнению с аналогичным по назначению углепластиком 1980-х годов. Во второй группе материалов для космических аппаратов модуль упругости не изменился, но прочность увеличилась почти в 2 раза.

Реализация прочности углепластиков при изготовлении

При применении однонаправленных углепластиков в армированных конструкциях с разными углами укладки слоев многими авторами отмечается эффект снижения механических характеристик по сравнению с

характеристиками, полученными на элементарных образцах однонаправленного углепластика. В работе [6] авторами приведены аналитические зависимости реализации предела прочности при растяжении углепластика КМУ-7 с армированием $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ от доли слоев 0° и толщины пластины (рис. 4).

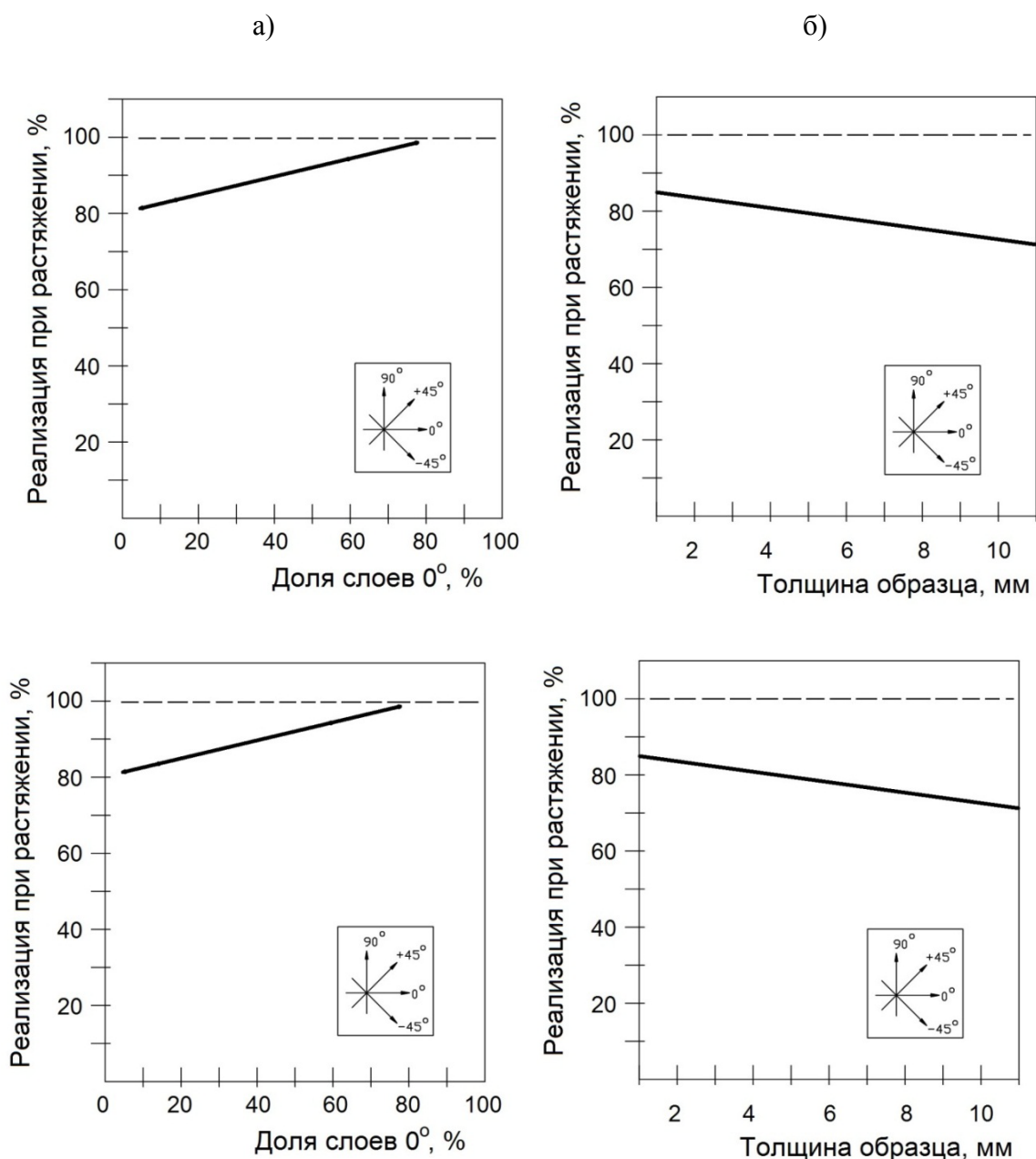


Рис. 4 – Зависимость реализации прочности эпоксидного углепластика от схемы армирования (а) и толщины пластины $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ при растяжении

Показано, увеличение толщины углепластика более 10 мм может приводить к снижению реализации предела прочности при растяжении более чем на 20 % из-за возникновения градиента содержания связующего по толщине пластины.

В работе [7] авторами изготовлены интегральные лонжероны крыла самолета из углепластика на основе углеродной ткани Porcher арт. 3692 и эпоксидного связующего двумя разными технологиями: автоклавным методом из препрега и вакуумной инфузией с использованием сухой преформы. Показано, что применение технологии вакуумной инфузии приводит к снижению на 10–16 % механических характеристик прочности, определяемых свойствами наполнителя (рис. 5).

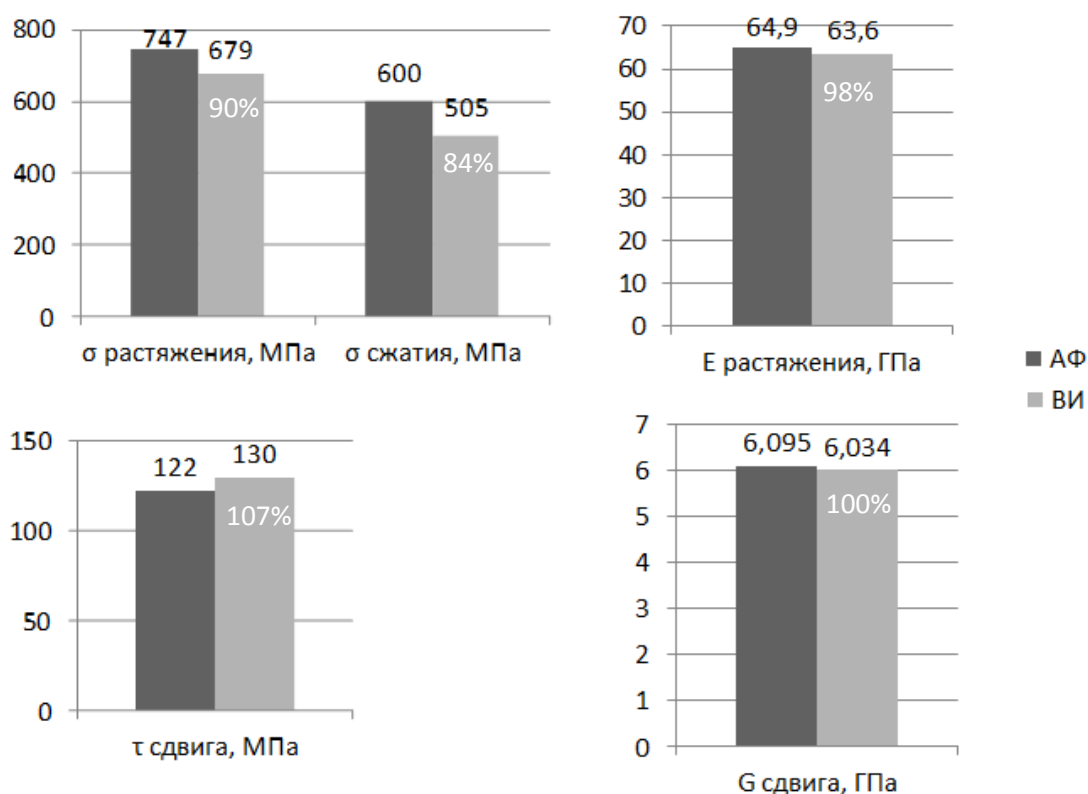


Рис. 5

– Зависимость механических характеристик углепластика от способа формования:
 "АФ" – автоклавной формование; "ВИ" – вакуумная инфузия в печи

При этом упругие характеристики и предел прочности при сдвиге не чувствительны к способу формования.

Выводы

За последние 30 лет в стране накоплен большой опыт применения углепластиков в нагруженных конструкциях хвостового оперения и крыла авиационной техники, в несущих отсеках ракет-носителей и прецизионных корпусах космических аппаратов.

Исходя из особенностей условий эксплуатации авиационно-космических изделий среди углепластиков можно выделить две основные группы:

– высокопрочные и высокомодульные углепластики для нагруженных авиационных конструкций с высоким ресурсом эксплуатации в условиях климатического воздействия;

- – среднепрочные и высокомодульные углепластики для несущих и размеростабильных конструкций ракетно-космической техники с коротким сроком эксплуатации при нагрузке и без климатического воздействия.

Существующие технологии изготовления конструкций могут изменять до 20 % степень реализации механических характеристик углепластика.

Литература

1. Комиссар О.Н. Компетенции государственных научных центров России в создании композитных крыльев самолетов // Тезисы докладов научно-технической конференции, 17 августа 2018 г., Ульяновск, ФГУП "ВИАМ". Ульяновск; ВИАМ, 2018.

2. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства

МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4 (2). С. 686–693.

3. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения // Труды ВИАМ. 2013. № 4. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2022).

4. Гуляев И. Н., Павловский К. А. Высокомодульные углепластики для изделий гражданской авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). С. 95–106. URL: <http://www.viam-works.ru>.

5. Полимерные композиционные материалы. – НИЦ "Курчатовский институт" ВИАМ. 2023. 15 с.

6. Климакова Л.А., Комиссар О.Н. Опыт создания интегральных конструкций из ПКМ для авиационной техники // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов – 21 век: Сборник докладов международной конференции SAMPE Europe, 30 января – 2 февраля 2001, Москва, МГУ. М: РИА, 2001. С. 64–72.

7. Степанов Н.В., Соколова А.В., Сеницын А.Ю. Особенности технологии изготовления лонжерона из композиционных материалов методом вакуумной инфузии // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 3 (143). С. 25–29.

8. Тимошков П.Н. Оборудование и материалы для технологии автоматизированной выкладки препрегов // Авиационные материалы и технологии. 2016. № 2 (41). С. 35–39.

УДК 677.4

**ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
КОМПОЗИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ПЛАНЕРОВ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ КЛАССА MALE**

В.В. Соколов¹, к.х.н.; Ж.В. Агашина¹; С.И. Войнов¹;
П.Ю. Антипов¹; О.А. Голишев¹; С.В. Долинский¹

**FEATURES OF TECHNOLOGICAL DESIGN OF COMPOSITE PARTS
FOR GLIDERS OF MALE CLASS UNMANNED AERIAL VEHICLES**

V.V. Sokolov¹; Z.V. Agashina¹; S.I. Voinov¹;
P.Y. Antipov¹; O.A. Golishev¹; S.V. Dolinsky¹

skit988@mail.ru

¹*АО «Кронштадт», Москва, Россия*
JSC «Kronshtadt», Moscow, Russia

Аннотация

В данной работе рассмотрен процесс технологического проектирования малогабаритных углепластиковых деталей со сложной геометрической формой, используемых в конструкции беспилотных летательных аппаратов. Представлены подходы к размещению мест сращивания в слоях преформы. Установлены закономерности, связывающие количество слоев армирующего материала в преформе с толщиной углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии.

Ключевые слова:

беспилотный летательный аппарат, углепластик, Fibersim, прочность

Abstract

This paper examines the process of technological design of small-sized carbon fiber parts with complex geometry used in the design of unmanned aerial vehicles. Approaches to placing splices in preform layers are presented. Regularities have been established that connect the number of layers of reinforcing material in the preform with the thickness of carbon fiber parts produced by vacuum infusion.

Keywords:

unmanned aerial vehicle, carbon fiber, Fibersim, strength

Для улучшения летно-технических характеристик самолетов в мировом авиастроении широко используются полимерные композиционные материалы (ПКМ). Отечественная авиационная промышленность также стремится к увеличению доли композиционных материалов в планерах современных гражданских и военных самолетов [1]. На основе ПКМ проектируются и изготавливаются российские беспилотные летательные аппараты (БПЛА) класса MALE (Medium Altitude Long Endurance – средневысотный, большой продолжительностью полета). Содержание композитных деталей в планере летательного аппарата данного класса может достигать 90 %.

Композитные детали БПЛА класса MALE характеризуются малыми размерами и сложной геометрической формой, что вызывает определенные трудности при их изготовлении и накладывает дополнительные ограничения, которые следует учитывать при их проектировании. Комплекс задач, который ставится на этапе технологического проектирования данных деталей, несколько отличается от задач, возникающих при создании традиционных крупногабаритных деталей авиационного назначения.

Настоящая работа посвящена двум факторам, определяющим качество композитных деталей: их прочности и геометрической точности.

Прочность композитных деталей определяется множеством факторов, таких как механические характеристики армирующего материала, давление формования, температурно-временной режим отверждения связующего и др. Одним из малоизученных факторов, оказывающих существенное влияние на механические свойства ПКМ, является выбранная технологическая схема сращивания тканых заготовок, формирующих армирующие слои детали. Обозначенный фактор особенно актуален для малогабаритных деталей, так как разместить места сращивания в слоях преформы на значительное расстояние друг от друга не представляется возможным.

Планер современного самолета, выполненный на основе полимерных композиционных материалов, состоит из множества отдельно формуемых деталей. Соединение этих деталей между собой производится различными способами. Существуют три основных вида соединений, применяемых в самолетостроении: клеевые, механические и комбинированные клеемеханические [2]. Необходимость сборки планера из отдельных деталей обуславливает высокие требования к точности их размеров. Даже незначительное отклонение от заданной геометрии стыкуемых деталей может спровоцировать существенные трудности при их сборке. Поэтому геометрическая точность композитных деталей авиационного назначения наряду с механическими характеристиками является важнейшим показателем их качества.

В связи с вышеизложенным целями настоящей работы являлись:

– установление закономерностей, связывающих расположение мест сращивания в армирующих слоях углепластика и его механические характеристики, а также разработка технологических решений для

разнесения стыков в слоях деталей со сложной геометрической формой на примере шпангоута БпЛА;

– установление закономерностей, позволяющих прогнозировать геометрические параметры углепластиковых деталей.

В качестве объекта исследований в работе использовали сформованные методом вакуумной инфузии углепластиковые пластины и детали на основе равнопрочной углеродной ткани марки 22502 саржевого переплетения производства ООО «Итекма». В качестве связующего была выбрана эпоксидная смола Т67 (ООО «Итекма»). Определение прочности при растяжении выполняли в соответствии с ГОСТ Р 56785-2015 на образцах с габаритными размерами 250×25 мм. Определение прочности при сжатии выполняли в соответствии с ГОСТ Р 56788-2015 на образцах с габаритными размерами 300×36 мм. Разрушающие испытания образцов проводили на испытательной машине Tinius Olsen серии ST. Технологическое проектирование композитной детали выполняли в программном обеспечении (ПО) Fibersim, которое моделирует укладку армирующего материала в оснастку.

Результаты и их обсуждение

Композитные детали БпЛА класса MALE характеризуются малыми размерами и сложной геометрической формой, что создает определенные трудности при выкладке слоев преформы. При укладке армирующего материала (АМ) на геометрически сложные участки оснастки происходит образование складок и разрывов в тканом материале (рис. 1), а также отклонение от заданной ориентации нитей. Указанные дефекты устраняются посредством формирования армирующего слоя детали из нескольких заготовок, края которых срачиваются между собой. Образующиеся складки также возможно вырезать с последующим срачиванием краев заготовки вдоль линии надреза. Срачивание

армирующего материала при неправильном подходе к выкладке преформы может оказать негативное влияние на прочностные характеристики композитной детали [3–5]. Поэтому изготовление деталей из ПКМ сопряжено с решением сложной технологической задачи по достижению оптимальной укладки ткани при сборке преформы, то есть такой укладки, которая позволит минимизировать потерю прочности углепластика из-за близкорасположенных сращиваний.

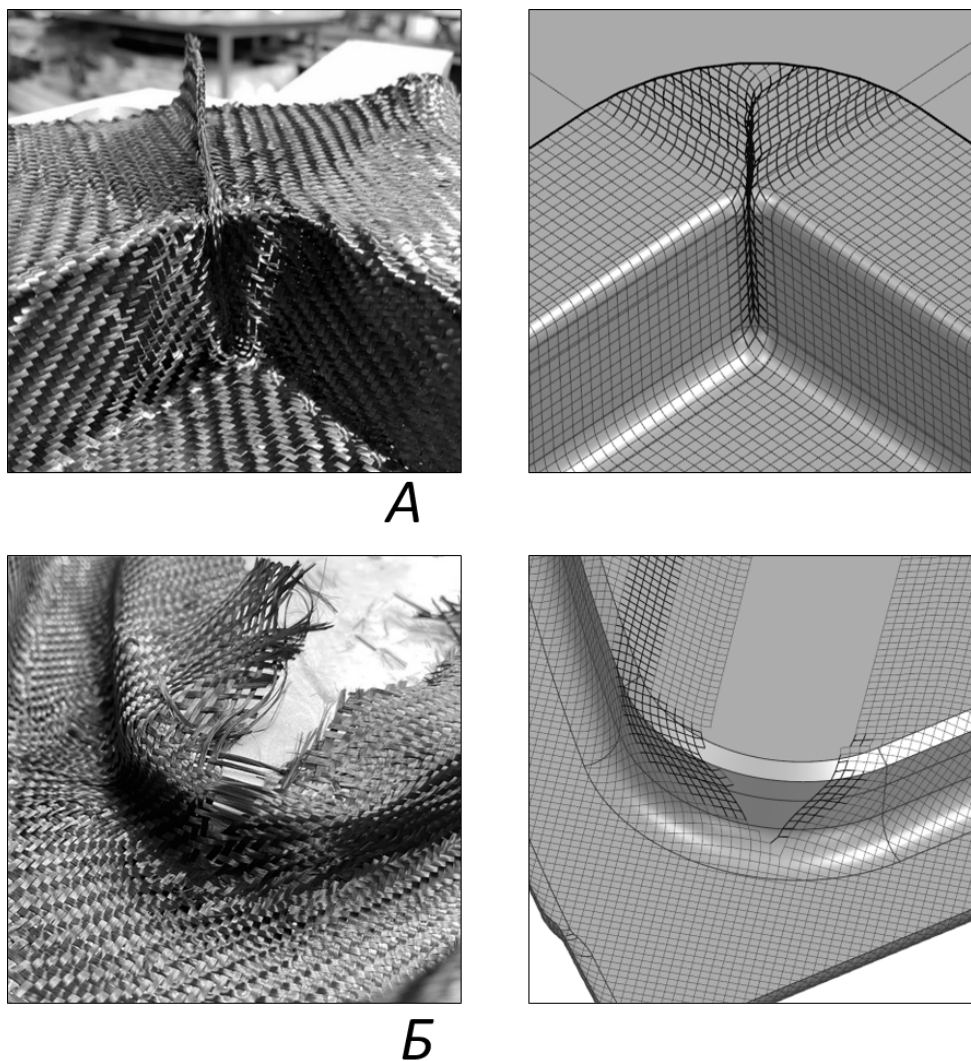


Рис. 1 – Дефекты, образующиеся при укладке армирующей ткани в оснастку, и их отображение при моделировании в ПО Fibersim: А – складка; Б - разрыв в тканом материале

При устранении дефектов, возникающих на стадии выкладки деталей со сложной геометрической формой, не всегда возможно разнести места сращивания в слоях преформы на значительное расстояние друг относительно друга. Это приводит к тому, что зона сосредоточения мест сращивания может составлять менее 100 мм. В этом случае при размещении стыков целесообразно использовать технологическую схему, представленную на рисунке 2. Данная схема позволяет равномерно разнести места сращивания в армирующих слоях ПКМ на ограниченном по длине участке.

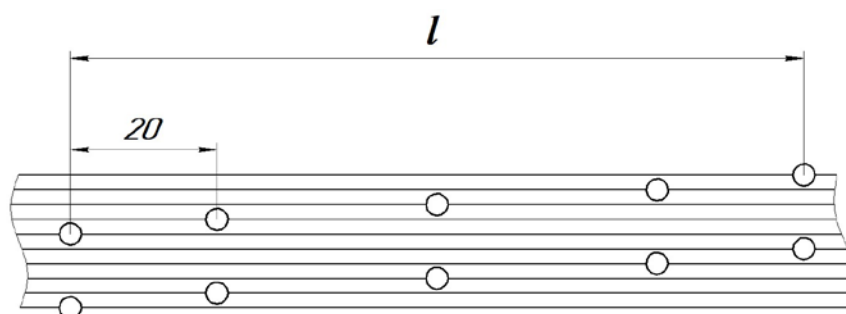


Рис. 2 – Технологическая схема расположения 10 сращиваний в 10-слойном образце.
 l – зона сосредоточения мест сращивания

На рисунке 3 представлены зависимости относительной прочности ($\sigma_{\text{ср}}/\sigma_{\text{исх}}$ – отношение прочности углепластика со сращенными слоями к прочности углепластика, армированного непрерывным тканым материалом) образцов ПКМ при растяжении и сжатии от количества сращенных слоев. При изготовлении образцов была использована технологическая схема, показанная на рисунке 2.

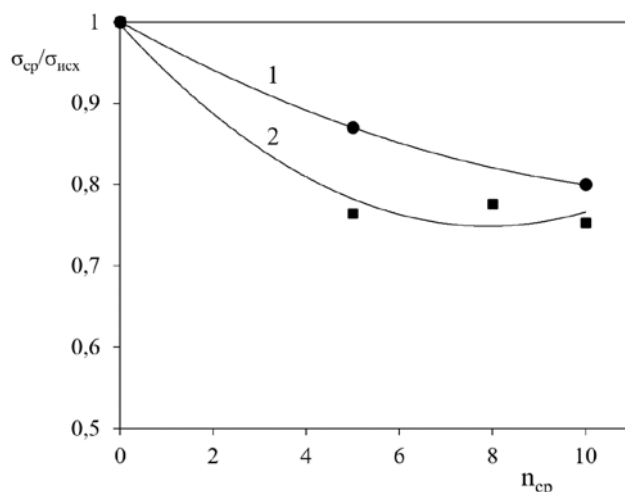


Рис. 3 – Зависимости относительной прочности образцов ПКМ на основе ткани 22502 при сжатии (1) и растяжении (2) от количества сращенных слоев ($n_{ср}$). $l = 100$ мм

Из рисунка 3 видно, что с увеличением количества сращиваний от 0 до 10 прочность углепластиковых образцов при растяжении и сжатии монотонно снижается на 25 и 20 % соответственно. Установленные закономерности следует учитывать при проектировании композитных деталей посредством введения дополнительных армирующих слоев, компенсирующих снижение механических характеристик ПКМ из-за близкорасположенных сращиваний.

На примере 14-слойного шпангоута планера БпЛА, в радиусных зонах которого образуются складки, показана реализация предложенной технологической схемы расположения сращиваний. На рисунке 4 приведены результаты моделирования данной детали в ПО Fibersim. Удаление складок выполнялось посредством разделения каждого армирующего слоя на две заготовки. Сращивание двух заготовок происходило вдоль «линий надреза». Анализ геометрии детали позволил определить габариты зоны сосредоточения дефектов. В области отбортовки центрального отверстия $l = 82$ мм, в зоне «полки» детали $l = 136$ мм. Габариты зоны сосредоточения дефектов, определяются размерами складок и их местоположением, поэтому расширены быть не могут. Выполнение «линии надреза» за пределами указанной зоны не приведет к устранению складки. С учетом габаритов зоны сосредоточения

дефектов на электронной модели детали в каждой радиусной зоне были расположены 7 линий надреза, вдоль которых выполняются 14 сращиваний (рис. 4). В результате, формирующиеся в каждом армирующем слое детали складки устранены, а места сращивания разнесены друг относительно друга на приемлемое расстояние. Таким образом, посредством моделирования углепластикового шпангоута в ПО Fibersim подтверждена возможность использования разработанной технологической схемы расположения сращиваний при выкладке малогабаритных деталей со сложной геометрией. Адекватность разработанной технологической электронной модели была полностью подтверждена в процессе выкладки преформы шпангоута при помощи лазерной проекционной системы Laserguide.

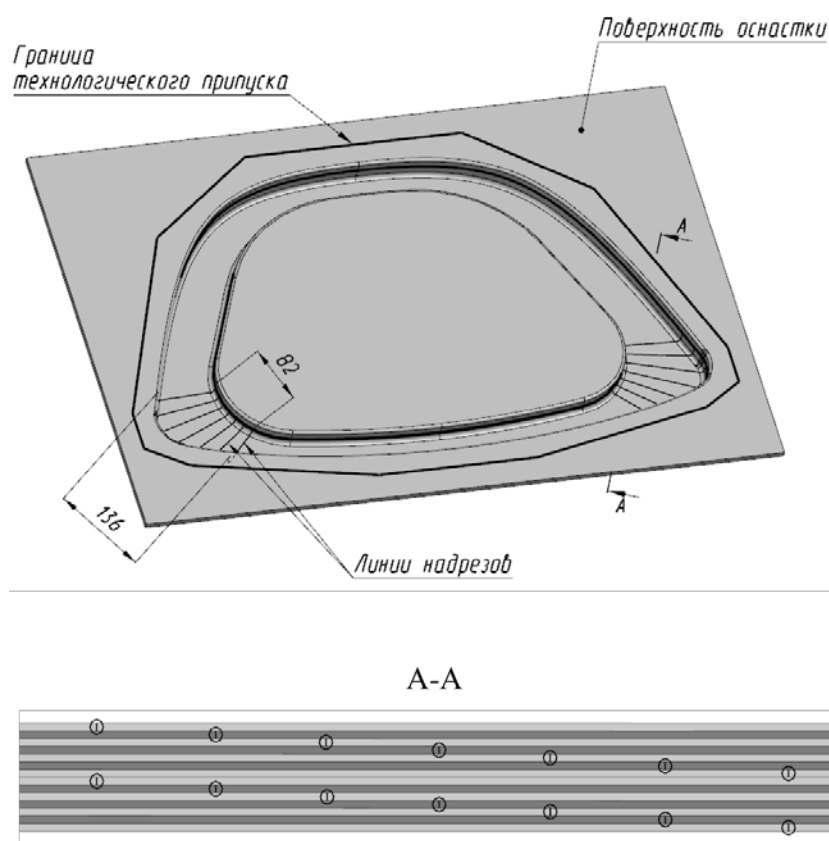


Рис. 4 – Схема расположения мест сращивания в шпангоуте. В сечении А-А светлым цветом показаны слои с ориентацией нитей $\pm 45^\circ$, темным – слои с ориентацией нитей 0/90°, а также обозначены места сращивания

Одним из основных геометрических параметров детали является ее толщина. Толщина композиционного материала складывается из толщин составляющих его монослоев. Монослой (основной структурный элемент волокнистых композитов) – плоский или изогнутый элемент, состоящий из полимерного связующего и одного слоя армирующего материала.

Толщина монослоя и, как следствие, толщина композита варьируется в значительных пределах и определяется множеством факторов, таких как давление формования, схема армирования, тип переплетения ткани, а также другие ее текстильные характеристики. Еще одним важным, но малоизученным фактором, оказывающим влияние на толщину монослоя и плотность ПКМ, является количество слоев в преформе.

На рисунке 5 показана зависимость толщины монослоя от количества слоев в углепластиковых пластинах на основе тканей 22502.

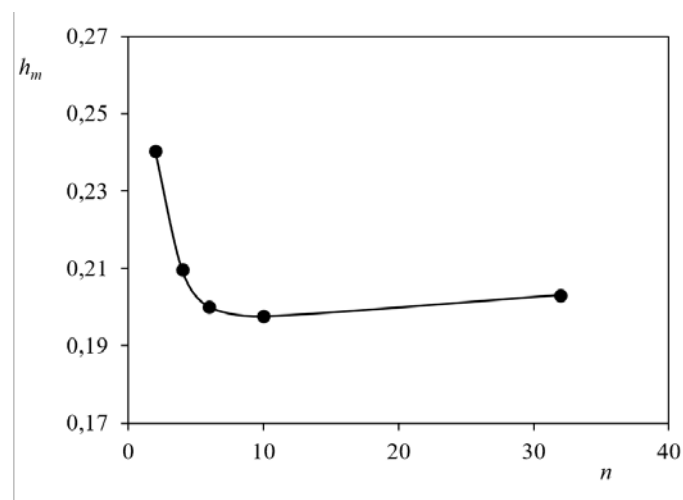


Рис. 5 – Зависимость толщины монослоя от количества слоев армирующего материала в углепластиковых пластинах на основе ткани 22502

Из рисунка 5 видно, что с ростом количества слоев с 2 до 6 происходит снижение толщины монослоя (h_m) образцов на $\sim 18\%$. Дальнейшее увеличение числа слоев не приводит к существенному изменению h_m . Представленную закономерность можно объяснить с точки зрения различной плотности упаковки армирующего материала в

изготовленных образцах. Сборка преформы осуществляется посредством последовательной укладки слоев армирующей ткани. Ткань не является однородной по толщине, что обусловлено перекрытиями – местами в которых нити основы пересекаются с нитями утка. При укладке ткани на ткань предыдущего слоя ячейки могут быть компактно уложены в ячейки предшествующей ткани (рис. 6, А) или, напротив, могут не войти друг в друга и сформировать зазор (рис. 6, Б). Плотность упаковки описывается в данном случае коэффициентом вложения (nesting factor), который рассчитывается по следующей формуле:

$$NF = h_m / h_c$$

где h_c – толщины одного слоя композита [6, 7]. Если слои ткани располагаются точно друг на друге без смещения, то вложение отсутствует и $NF = 1$. Если они располагаются со смещением – плотность упаковки АМ возрастает, а NF принимает значение < 1 .

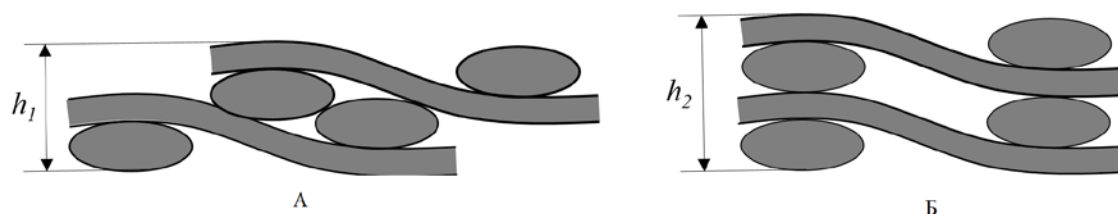


Рис. 6 – Схемы размещения двух слоев ткани при сборке преформы, где $h_1 < h_2$

По всей видимости, с увеличением количества слоев с 2 до 6 вероятность их компактного размещения возрастает, что характеризуется заметным уменьшением NF . При дальнейшем росте количества слоев коэффициент вложения изменяется не столь значительно, сохраняясь в пределах от 0,7 до 0,73.

Количество слоев в преформе из-за вышеописанного эффекта оказывает влияние на соотношение основных компонентов в композиционном материале и, как следствие, на его плотность. С ростом

количества составляющих преформу слоев происходит увеличение содержания волокна в рассматриваемых углепластиках и, как следствие, повышение их плотности. Такой эффект можно объяснить тем, что увеличение количества слоев, сопровождаемое снижением NF, способствует уменьшению пустот в преформе, заполняемых связующим при пропитке.

В результате выполненных исследований установлены закономерности, связывающие количество слоев армирующего материала с толщиной и структурой углепластиковых деталей. Показано, что в ПКМ, состоящих из малого количества слоев, толщина монослоя заметно выше, а плотность ниже, чем в многослойных композитах. Учет выявленных закономерностей при проектировании деталей авиационного назначения позволит более точно прогнозировать их геометрические и весовые параметры.

Заключение

1. Установлены закономерности, связывающие расположение и количество мест сращивания в армирующих слоях углепластика и его прочностные характеристики при сжатии и растяжении. На примере 10-слойного образца показано, что с увеличением количества сращиваний от 0 до 10 прочность углепластиковых образцов при растяжении и сжатии монотонно снижается на 25 и 20 % соответственно.

2. Определена технологическая схема размещения мест сращивания на небольшом по площади участке углепластиковой детали, обеспечивающая сохранение ~75 % от прочности ПКМ, армированного непрерывными слоями, при выполнении сращивания в каждом слое.

3. Посредством моделирования углепластикового шпангоута планера БпЛА в программном обеспечении Fibersim подтверждена возможность использования разработанной технологической схемы расположения

сращиваний при выкладке малогабаритных деталей со сложной геометрией.

4. Установлены закономерности, связывающие количество слоев армирующего материала с толщиной углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии. Показано, что с ростом количества слоев с 2 до 6 происходит снижение толщины монослоя образцов из ткани 22502 на ~18 %. Дальнейшее увеличение числа слоев не приводит к существенному изменению толщины монослоя. Данные закономерности можно объяснить тем, что при малом количестве слоев плотность упаковки ткани в преформе сравнительно невысока. С увеличением количества слоев с 2 до 6 вероятность их компактного размещения возрастает, что приводит к снижению толщины монослоя.

Литература

1. Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21 // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 4(2). С. 686–693.

2. Особенности сборки деталей из композиционных материалов в конструкциях летательных аппаратов / Ю.А. Вашуков. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 68 с.

3. Meng Zhu, Dingding Chen, Qigao Hu. Failure mechanisms and reinforcing modes of ply splice fiber-reinforced composite laminates under tensile load // Materials. 2019. № 12. P. 1–18.

4. Meng Zhu, Dingding Chen, Suli Xing, Qigao Hu, Rui Wang¹ Tensile properties of ply splice fiber reinforced composite laminates // Journal of Composite Materials. 2020. Vol. 54. P. 2887–2897.

5. Chen, D, Wang, M, Arakawa, K, et al. Tensile properties of fiber reinforced epoxy resin composite with ply splice structures // *Acta Mater Compos Sin.* 2017. № 34. P. 2473–2478.

6. Dungan F.D., Senoguz M.T., Sastry A.M., Faillaci D.A. Simulations and Experiments on Low-Pressure Permeation of Fabrics: Part I—3D Modeling of Unbalanced Fabric // *Journal of Composite materials.* 2001. Vol. 35. №. 14. P. 1250–1284.

7. Z.Yousaf1 & P. Potluri 1 & P. J. Withers. Influence of Tow Architecture on Compaction and Nesting in Textile Preforms // *Appl Compos Mater.* 2017. № 24. P. 337–350.

УДК 544.64:539.199

**ЛОКАЛЬНЫЕ ДИССИПАТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭПОКСИДНЫХ ОЛИГОМЕРАХ И ИХ ОТВЕРДИТЕЛЯХ**

В.А. Ломовской¹, д.ф.-м.н.; С.А. Шатохина¹, к.ф.-м.н.;
И.Д. Симонов-Емельянов², д.т.н.

**LOCAL DISSIPATIVE PROCESSES IN EPOXY OLIGOMERS
AND THEIR HARDENERS**

V.A. Lomovskoy¹, S.A. Shatokhina¹, I.D. Simonov-Emelyanov²

lomovskoy49@gmail.com, svetlanka.mazurina@mail.ru, simonov@mitht.ru

¹*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН*

¹*A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry*

²*МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва, Россия*

²*MIREA — Russian Technological University (Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, Russia*

Аннотация

Проведен теоретический анализ экспериментальных результатов спектров внутреннего трения и температурно-частотных зависимостей, полученных методом свободных затухающих крутильных колебаний для различных по химической природе жидких отвердителей эпоксидных олигомеров: ТЭТА, ПЭПА, изо-МТГФА.

Ключевые слова:

ТЭТА, ПЭПА, изо-МТГФА

Abstract

The theoretical analysis of experimental results of internal friction spectra and temperature-frequency dependences obtained by the method of free damped torsional oscillations for different in chemical nature liquid hardeners of epoxy oligomers TETA, PEPA, MTHPA is carried out.

Keywords:

TETA, PEPA, MTHPA

Введение

Исследование различных свойств композиций «эпоксидный олигомер – отвердитель» показало, что характеристики получаемых систем непосредственно связаны с физико-механическими и физико-химическими характеристиками, как эпоксидного олигомера, так и отвердителя в отдельности [1–5]. При этом систематических исследований характеристик компонентов этих композиций в широких температурных интервалах (от –150 до +110 °С) и динамических механических внешних воздействиях практически нет [6]. Обобщенные отрывочные данные о свойствах и реакционной способности таких отвердителей и некоторых показателях полимеров на их основе, неоднократно публиковались в справочной монографической литературе [7–12].

В этой работе впервые представлены экспериментальные спектры внутреннего трения $\lambda = f(T)$ и температурные зависимости частоты $\nu = f(T)$, полученные в режиме свободных затухающих крутильных колебаний, возбуждаемых в исследуемых образцах отвердителей эпоксидных олигомеров (триэтилентетрамин (ТЭТА), полиэтиленполиамин (ПЭПА), изо-метилтетрагидрофталевого ангидрид (изо-МТГФА)) в температурном интервале (от –150 до +110 °С).

Следует отметить, что выбранные системы используются не только в качестве отвердителей эпоксидных олигомеров, но и имеют очень широкое применение в других областях. Например, ТЭТА используется в медицине для связывания и удаления меди из организма как альтернатива пеницилламину, при химиотерапии рака в качестве противоопухолевого агента, при диабетических заболеваниях, предположительно будет иметь применение при лечении болезни Альцгеймера [13]. В промышленности ТЭТА с углеродными жирными кислотами или таловыми кислотами может быть использован в качестве ингибитора коррозии. Раствор триэтилентетрамин-этанол проявляет высокие абсорбционные свойства в отношении двуокиси углерода. ТЭТА используется в качестве присадок к топливам, смазкам, асфальтовым системам и в производстве целлюлозы [13].

В данной работе рассматривается возможность исследования физико-механических (температурная зависимость модуля сдвига, дефект модуля сдвига для каждого локального диссипативного процесса, температурные области проявления локальной неупругости, механизм внутреннего трения) и физико-химических характеристик (энергия активации, время релаксации каждого локального диссипативного процесса) и их изменений для аминных и ангидридных отвердителей эпоксидных олигомеров в интервалах температур, охватывающих твердое и жидкое агрегатное состояние этих систем. Теоретический анализ полученных экспериментальных результатов проводится на феноменологических модельных представлениях стандартного линейного тела и обобщенной модели Максвелла [14] без рассмотрения взаимосвязи конкретной химической природы, строения и структуры элементов исследуемых отвердителей с модельных представлений атомно-молекулярного строения исследуемых систем, что представляет собой отдельную фундаментальную работу. Вследствие этого, каждый

локальный по температуре диссипативный процесс будет обозначен в цифровом варианте без привязки к конкретному структурному элементу.

Исследование спектров внутреннего трения проводилось для кристаллических и аморфных систем, находящихся в твердом агрегатном состоянии при начальных температурах проведения эксперимента и переходящих в жидкое агрегатное состояние при изменениях температуры в ходе проведения эксперимента [15–26]. Однако, исследований спектров внутреннего трения систем в режиме свободно затухающего колебательного процесса в широком температурном интервале (от –150 до +110 °С), охватывающем твердое в жидкое агрегатное состояние этих систем, и которые находились при начальных температурах проведения эксперимента в жидком агрегатном состоянии, по данным литературных источников, на сегодня нет.

Спектры внутреннего трения представляют собой набор локальных пиков диссипативных потерь, проявляемых в различных интервалах температур. Каждый из пиков образуется в результате структурной подвижности определенных элементов той или иной (в зависимости от температуры) структурно-кинетической подсистемы. Вся исследуемая система представляет собой совокупность структурно-кинетических подсистем, квазинезависимо реагирующих на одновременно приложенное внешнее воздействие. Каждый пик потерь на спектре внутреннего трения будет характеризоваться не только тем, что его появление обусловлено подвижностью тех или иных структурных элементов, но и тем, что каждый пик, являясь локальным диссипативным процессом, будет характеризоваться своим переходным процессом, а следовательно, и своей функцией, описывающей этот переходный процесс и феноменологической моделью со своими характеристиками [14].

Композиция «отвердитель – эпоксидный олигомер» образует полимерную матрицу, которая как бы соединяет все компоненты этой

системы в единое целое – полимерный материал. Именно такой полимерный материал обладает ценным комплексом прочностных, теплофизических, диэлектрических, адгезионных и других свойств, что делает возможным его практическое использование, при этом на физико-механические и физико-химические характеристики полученной системы оказывают решающее влияние аналогичные характеристики, как эпоксидного олигомера, так и отвердителя [1].

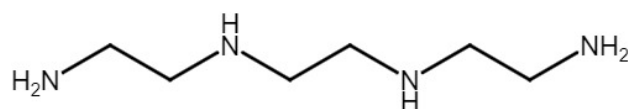
Как было отмечено выше, систематических исследований физико-механических и физико-химических характеристик этих жидких систем (за исключением исследований температурной зависимости вязкости и плотности в положительной области температур [27]) в интервале температур от $-150 \div +150$ °С и динамических режимах внешнего воздействия не проводилось.

В качестве объектов исследования были выбраны, различающиеся по химической природе, строению и структуре, аминные и ангидридный отвердители, используемые в различных режимах процессов отверждения эпоксидных олигомеров. Известные справочные данные этих систем приведены в таблице 1.

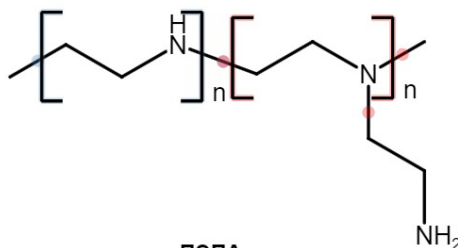
Таблица 1

Характеристики отвердителей эпоксидных олигомеров [1–13]

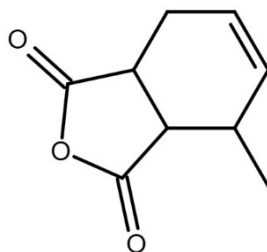
Отвердитель	ТЭТА	ПЭПА	Изо-МТГФА
CAS №	112-24-3	68131-73-7	26590-20-5
Цвет	бесцветный	от свето-желтого до темно-бурого	от светло-желтого до светло-коричневого
Молекулярная масса, г/моль	146	230–250	166
Аминное число, мг (КОН/г)	1443	1250	660–685
Температура плавления, °С	–35	–30	90
Температура кипения, °С	277	>350	308,9
Температура вспышки, °С	118	104	146,8
Плотность, г/см ³ при 25 °С	0,98	1,017	1,17–1,23
Динамическая вязкость, мПа·с при 25 °С	14	250	120
Содерж. азота, % по весу	37	>30	–
Время желтинизации, мин. при 20–25 °С	25	25	–



ТЭТА



ПЭПА



изо-МТГФА

Экспериментальные спектры внутреннего трения $\lambda = f(T)$ и температурные зависимости частоты $\nu = f(T)$, получены в режиме свободных затухающих крутильных колебаний, возбуждаемых в исследуемых образцах отвердителей эпоксидных олигомеров. При этом следует отметить, что отвердители эпоксидных олигомеров представляют собой жидкие системы, вследствие чего они не могут быть непосредственно включены в колебательную систему устройства для исследования локальных диссипативных процессов по спектрам внутреннего трения [28].

Вследствие этого необходимо использовать твердую подложку, на которую будет наноситься исследуемый жидкий отвердитель. В этом случае исследуемый образец будет представлять собой композит:

подложка-отвердитель. Подложка выполняет роль упругой компоненты композита во всём температурном интервале исследований, а отвердитель будет проявлять упругую реакцию на внешнее деформирующее воздействие при температурах твёрдого агрегатного ($T < T_{nl}$) состояния и неупругую реакцию при температурах жидкого агрегатного состояния ($T > T_{nl}$) (табл. 1).

Таким образом, в температурном интервале от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до T_{nl} отвердитель находится в твёрдом агрегатном состоянии, поэтому исследуемый образец будет представлять собой композитную твёрдую систему, состоящую из двух твёрдых подсистем: – упругой несущей матрицы и упругой подсистемы (твёрдой) отвердителя. В температурном интервале от T_{nl} до $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$ отвердитель находится в жидком агрегатном состоянии, поэтому исследуемый образец будет представлять собой композитную твёрдую систему, состоящую из двух подсистем: – упругой несущей матрицы-подложки и вязкоупругой жидкой подсистемы отвердителя. И в том и другом случае исследуемые образцы могут быть непосредственно включены в колебательную систему устройства [28]. При этом особое внимание необходимо уделить выбору материала и геометрических размеров подложки (толщины h и ширины b), с учётом того, что длина образца $l = const$ зависит от требований к длине исследуемых образцов в колебательной системе установки.

Вследствие того, что основной интерес вызывают локальные диссипативные явления не в самой комбинированной композитной системе образца, а только в его подсистеме – отвердителе, материал подложки должен быть химически инертным к отвердителю в интервале температур от -150 до $+110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это требует получения экспериментальных спектров внутреннего трения отдельно для подложки, что позволит отделить от спектра внутреннего трения полученного комбинированного образца, спектр внутреннего трения чистой подложки и получить спектр

только отвердителя. Таким образом, к материалу подложки предъявляются следующие требования:

1 – на спектре $\lambda = f(T)$ подложки в интервале температур от -150 до $+110$ °С не должно быть интенсивных диссипативных потерь, заглушающих потери в подсистеме отвердителя;

2 – геометрические размеры, а следовательно, и момент инерции $I_{подл}$ подложки должны быть минимальными, чтобы оказывать минимально возможное воздействие на колебательный процесс, возбуждаемый в исследуемой комбинированной композитной системе;

3 – между материалом подложки и нанесённой на подложку подсистемой отвердителя не должно возникать химического взаимодействия;

4 – необходим учёт адгезионных контактных взаимодействий между поверхностью подложки (матрицы) и отвердителем композита.

Именно по этим критериям были отобраны три вида несущих подсистем (подложек) для композитной системы: «подложка-отвердитель»: - медь; -целлюлоза; -сетка из нержавеющей стали [30]. Более подробно анализ выбора металлических подложек представлен в работе [31], где проведен анализ влияния поверхности на диссипативные процессы, протекающие в эластичном стирол-(алкил)акрилатном полимере, локализованном на металлических подложках различной химической природы. Анализ основан на сопоставлении поверхностной энергии металлической поверхности с интенсивностью пиков внутреннего трения.

Из всех видов подложек в данном исследовании используется целлюлозная подложка. Этот выбор объясняется следующими причинами. Целлюлоза – это линейный гомополисахарид, представляющий собой длинные цепи, не имеющие разветвлений. Макромолекулы целлюлозы состоят из мономерных звеньев ангидро β -D-глюкопиранозы (остатков β -

D-глюкозы), соединенных гликозидными связями 1 – 4 (брутто формула целлюлозы имеет вид: $(C_6H_{10}O_5)_n$ или $[C_6H_7O_2(OH)_3]_n$) [29].

Особенности надмолекулярной структуры целлюлозы, а именно кристаллическое строение, сильное межмолекулярное взаимодействие, а также отношение органических кислот к слабым кислотам, определяют невозможность получения сложных эфиров при участии органических кислот. Сложные эфиры образуются при действии ангидридов соответствующих кислот на целлюлозу в присутствии кислотных катализаторов. Таким образом, в принципе целлюлоза способна прореагировать с ангидридным отвердителем, который исследуется, однако, вследствие того что в данных исследованиях не используются вещества, которые могли бы быть катализатором, эта реакция невозможна.

Аминные отвердители являются гигроскопичными, и в них может присутствовать некоторое количество молекул воды, которая в свою очередь может служить активатором поверхности целлюлозы. Можно предположить, что за счёт этого низковязкие отвердители способны пропитать целлюлозу без химического взаимодействия.

В отличие от целлюлозных подложек подложки из меди реагируют с ТЭТА в стехиометрическом соотношении (1:1) с образованием стабильных комплексов с азотом, в которых ТЭТА является высокоселективным хелатором двухвалентной меди [6, 13]. Именно по этой причине медные подложки в данном исследовании не использовались. Подложки из нержавеющей стали не использовались вследствие наличия на их экспериментальных спектрах внутреннего трения дополнительных локальных диссипативных процессов значительной интенсивности, что приводит к существенным сложностям при обработке конечных результатов получения спектров отвердителей. Кроме того, выбор целлюлозной подложки обусловлен тем, что жесткость её при равенстве моментов инерции всех металлических подложек, минимальна, что

существенно повышает расчет модулей сдвига жидких отвердителей, как компонентов композитной системы.

Получение спектров внутреннего трения $\lambda = f(T)$ и температурной зависимости частоты $\nu = f(T)$ колебательного процесса, возбужденного в исследуемых системах в широком температурно-частотном интервале, использовался метод свободных затухающих крутильных колебаний, подробно описанный в работах [32, 33].

Экспериментальная часть

Спектры внутреннего трения $\lambda = f(T)$ и температурные зависимости частоты $\nu = f(T)$ колебательного процесса, возбуждаемого в исследуемом композите «целлюлозная подложка – отвердитель» для ТЭТА, ПЭПА и изо-МТГФА представлены на рисунке 1 – рисунке 3 соответственно, где представлены спектры, как для композита, так и для отвердителя (за вычетом фона внутреннего трения целлюлозной подложки – линия 2) отдельно. Сопоставление этих результатов показывает незначительное влияние подложки на диссипативные процессы в отвердителе.

Таблица 2

Обобщающая таблица физико-механических характеристик отвердителей, нанесенных на подложки

Название	№ пика	$T_{\max}, ^\circ\text{C}$	λ_{\max}		$\nu_{\max}, \text{Гц}$	$T, ^\circ\text{C}$		$\nu, \text{Гц}$	
			с подл	без подл		н	к	н	к
Целлюлозная подложка									
ТЭТА	I	-114	0,16	0,109	9,03	–	–	–	–
	II	-53	0,76	0,706	4,17	-81	-42	9,89	2,39
	III	25	0,39	0,315	2,389	10	40	3,52	1,34
ПЭПА	I	-50	0,44	0,37	2,37	-70	-36	3,16	1,87
	II	58	0,13	0,06	1,37	40	65	1,59	1,34
изо-МТГФА	I	-76	0,24	0,171	4,04	–	–	–	–
	II	-56	0,61	0,54	2,65	-82	-42	4,36	1,85
	III	6	0,21	0,13	1,987	-1	13	2,35	1,71

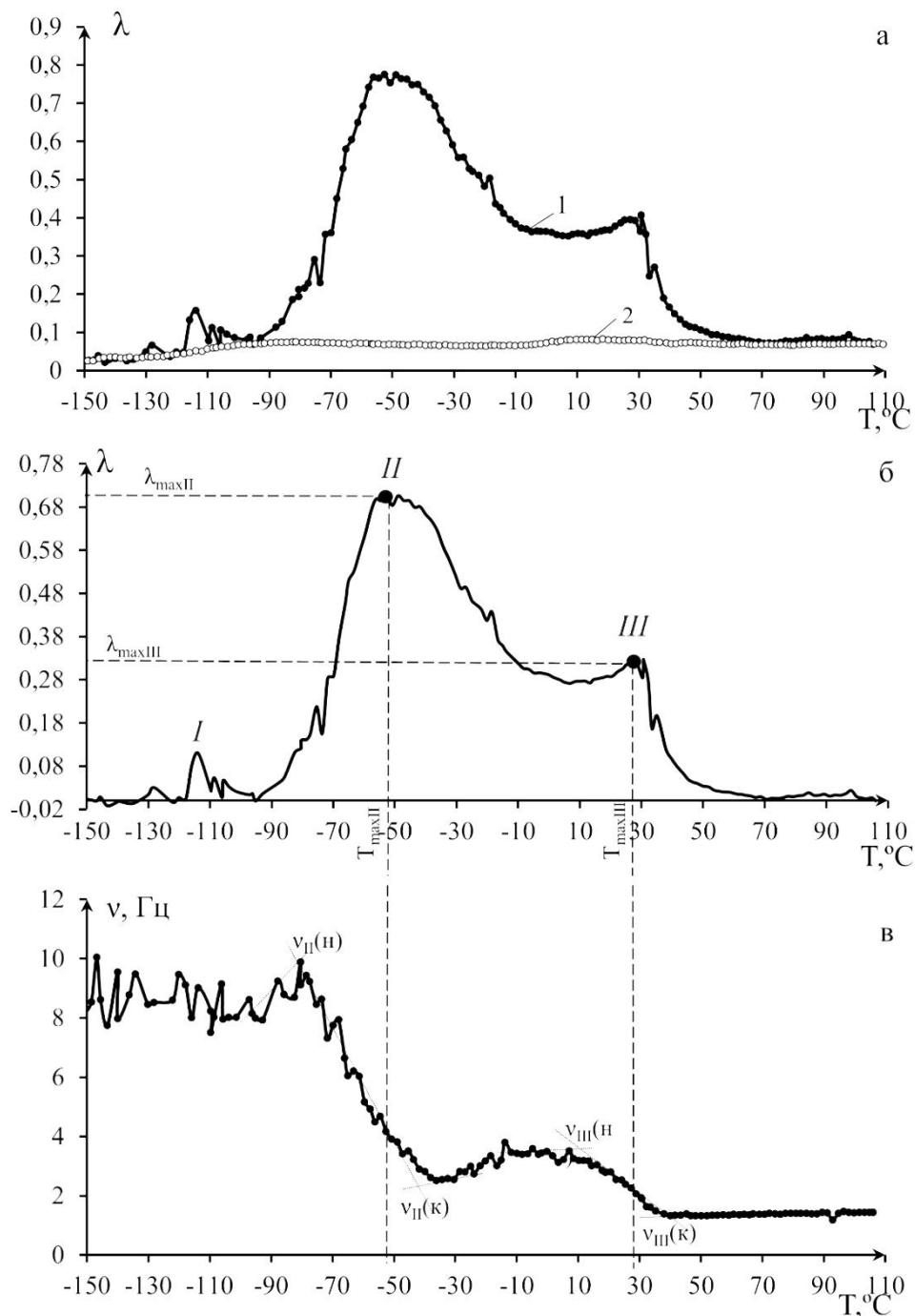


Рис. 1 – Спектр внутреннего трения $\lambda = f(T)$ композитной системы «ГЭТА – целлюлоза» (кривая 1) и целлюлозной подложки (кривая 2) – (а); спектр $\lambda = f(T)$ этой же композитной системы «ГЭТА – целлюлоза» без диссипативных потерь вносимых целлюлозной подложкой – (б); температурная зависимость частоты $\nu = f(T)$ в композитной системе «ГЭТА – целлюлоза» – (в)

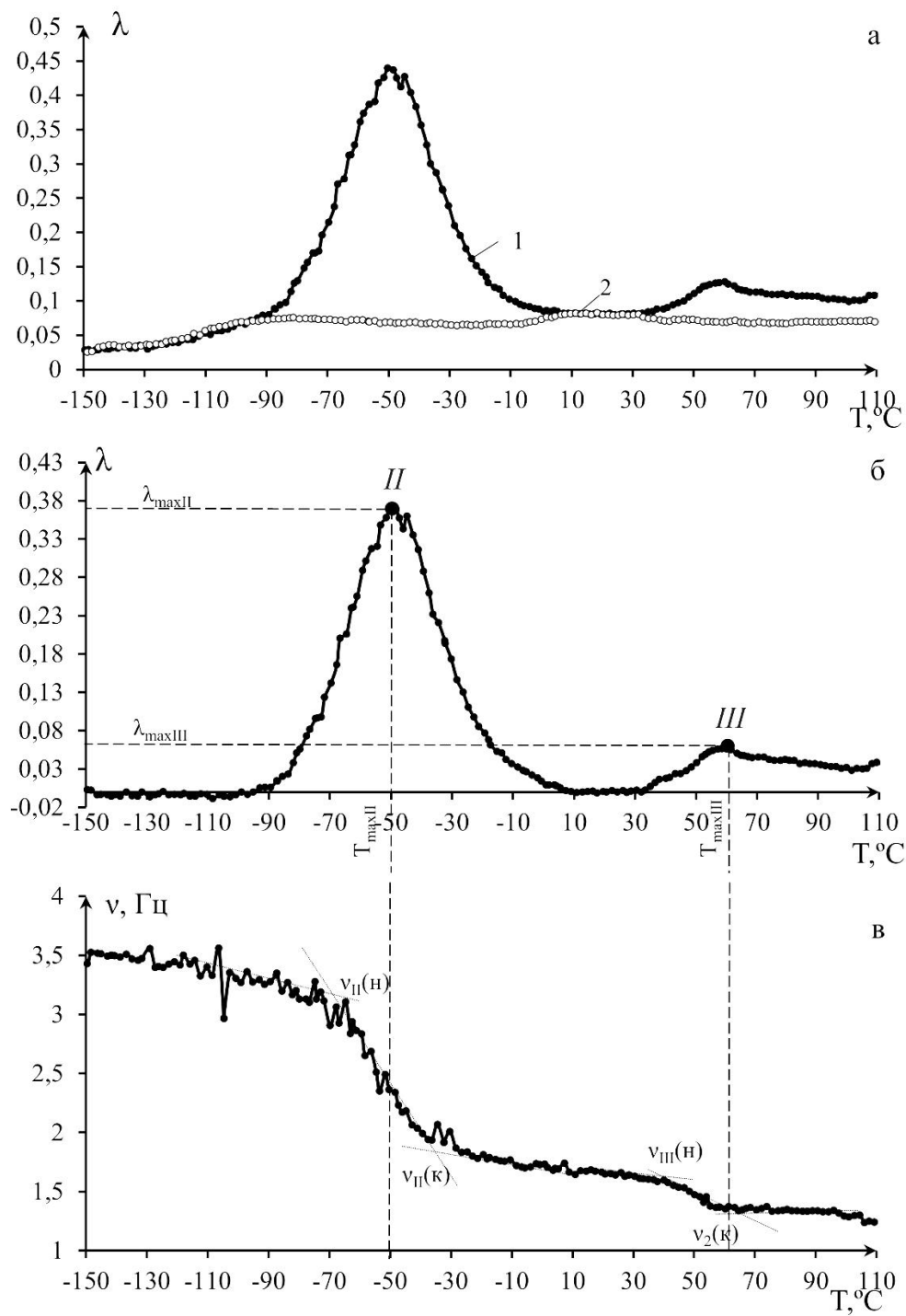


Рис. 2 – Спектр внутреннего трения $\lambda = f(T)$ композитной системы «ПЭПА – целлюлоза» (кривая 1) и целлюлозной подложки (кривая 2) – (а); спектр $\lambda = f(T)$ этой же композитной системы «ПЭПА – целлюлоза» без диссипативных потерь вносимых целлюлозной подложкой – (б); температурная зависимость частоты $\nu = f(T)$ в композитной системе «ПЭПА – целлюлоза» – (в)

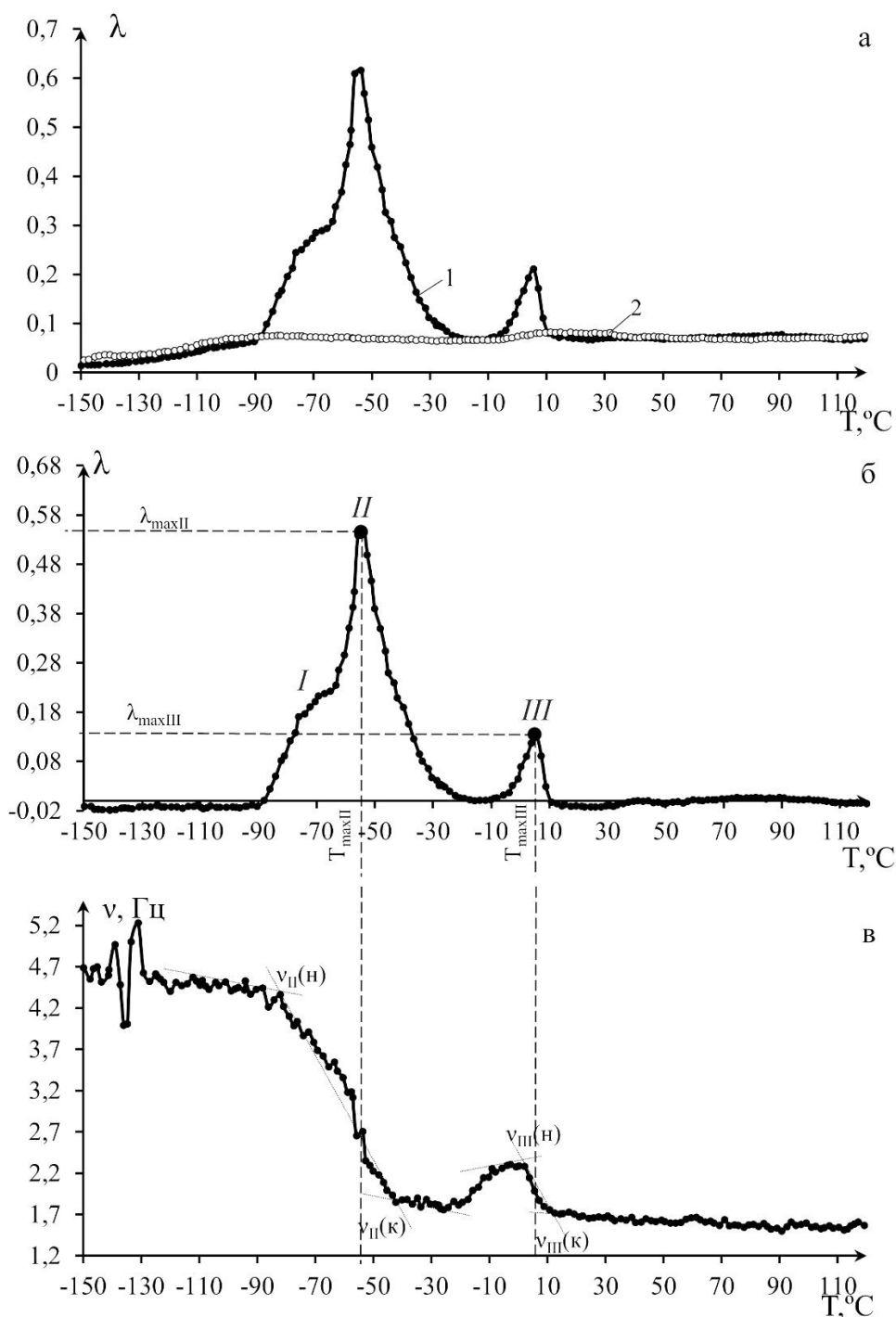


Рис. 3 – Спектр внутреннего трения $\lambda = f(T)$ композитной системы «изо-МТГФА – целлюлоза» (кривая 1) и целлюлозной подложки (кривая 2) – (а); спектр $\lambda = f(T)$ этой же композитной системы «изо-МТГФА – целлюлоза» без диссипативных потерь вносимых целлюлозной подложкой – (б); температурная зависимость частоты в композитной системе «изо-МТГФА – целлюлоза» – (в)

На рис. 1, б представлен спектр ТЭТА за вычетом спектра подложки из спектра композита. Эти спектры характеризуются наличием 3 пиков

диссипативных потерь, расположенных в разных температурных интервалах спектра и имеющих различные интенсивности λ_{\max} их проявления (табл. 2):

I – пик диссипативных потерь, имеет минимальную интенсивность на спектре $\lambda = f(T)$ относительно других диссипативных процессов этого спектра ($\lambda_{I_{\max}} \approx 0,16$). Данный пик расположен в интервале температур от $-120,5$ до -95 °С. Данный процесс связан с наличием различных форм молекулярной воды [34] в структуре $NH_2-(CH_2-CH_2-NH)_3-H$. Следует отметить, что этот отвердитель ТЭТА очень гигроскопичен. С водой образует кристаллогидраты (CAS 305808-21-3, номер EINECS 253-854-3 [6, 13]), который полностью смешивается с водой и многими полярными органическими растворителями. Молекулярная формула кристаллогидрата: $NH_2-CH_2-CH_2-(NH-CH_2-CH_2)_2-NH_2 \times H_2O$ с температурой плавления $+45 \div +50$ °С.

II – пик диссипативных потерь, имеет максимальную интенсивность на спектре $\lambda = f(T)$ относительно других диссипативных процессов этого спектра ($\lambda_{II_{\max}} \approx 0,76$). Этот процесс расположен в интервале температур от -90 до -10 °С, а пик диссипативных потерь является сложным и может быть разложен на три пика наложенных друг на друга. Таким образом, данный процесс может быть связан с подвижностью структурных элементов аморфной подсистемы, неких упорядоченных областей структуры и граничных между ними проходных областей. Структурно-кинетическое атомно-молекулярное объяснение данного процесса (также как и других диссипативных процессов) в этой работе не рассматривается.

III – пик диссипативных потерь, имеет среднюю интенсивность на спектре $\lambda = f(T)$ относительно других диссипативных процессов этого спектра ($\lambda_{III_{\max}} \approx 0,39$) и расположен в интервале температур от $+10$ до

+50 °С. Данный процесс может быть связан с подвижностью структурных элементов неких упорядоченных областей структуры при термическом разрушении кристаллогидрата $NH_2 - CH_2 - CH_2 - (NH - CH_2 - CH_2)_2 - NH_2 \times H_2O$

Спектр ПЭПА $\lambda = f(T)$ характеризуется наличием 2 пиков диссипативных потерь, расположенных в разных температурных интервалах спектра и имеющих (также как и для ТЭТА) различные интенсивности λ_{\max} их проявления рис. 2, (табл. 2). В данной системе отсутствует *I* – пик диссипативных потерь в области низких температур, что может быть связано с отсутствием процесса сорбции влаги из окружающей среды.

Другие пики обозначены аналогично пикам потерь на спектре отвердителя ТЭТА следующим образом:

II – пик диссипативных потерь, имеет максимальную интенсивность на спектре $\lambda = f(T)$ относительно других диссипативных процессов этого спектра ($\lambda_{II_{\max}} \approx 0,44$). Этот процесс расположен в интервале температур от –90 до +10 °С;

III – пик диссипативных потерь, имеет низкую интенсивность на спектре $\lambda = f(T)$ ($\lambda_{III_{\max}} \approx 0,13$) и расположен в интервале температур от +30 до +65 °С.

Спектр изо-МТГФА (также как и для ТЭТА) характеризуются наличием 3 пиков диссипативных потерь, расположенных в разных температурных интервалах спектра и имеющих различные интенсивности λ_{\max} их проявления рис. 3 (табл. 2):

I – пик диссипативных потерь, имеет среднюю интенсивность на спектре $\lambda = f(T)$ относительно других диссипативных процессов этого спектра ($\lambda_{I_{\max}} \approx 0,24$). Низкотемпературная ветвь данного процесса расположена в

интервале температур от -90 до -65 °С, а высокотемпературная ветвь поглотилась *II* – пиком диссипативных потерь.

II – пик диссипативных потерь, имеет максимальную интенсивность на спектре $\lambda = f(T)$ относительно других диссипативных процессов этого спектра ($\lambda_{II_{\max}} \approx 0,61$). Этот процесс расположен в интервале температур от -65 до -20 °С.

III – пик диссипативных потерь, имеет также среднюю интенсивность ($\lambda_{III_{\max}} \approx 0,21$) и расположен в интервале температур от -8 до $+10$ °С.

Учитывая, что изо-МТГФА представляет собой легкокристаллизующуюся систему, его структурное происхождение связано с термическом распадом неких упорядоченных областей структуры. Природа внутреннего трения (гистерезисная, релаксационная, фазовая) может быть определена по экспериментальным температурным зависимостям частоты $\nu = f(T)$ свободно затухающего колебательного процесса (рис. 1, в; рис. 2, в; рис. 3, в), возбуждаемого в исследуемой системе [20, 35].

Литература

1. Иржак В.И. Эпоксидные полимеры и нанокompозиты. Черноголовка: «Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН», 2021. 319 с.
2. Derek B. Dwyer, Sara Isbill, Zachary E. Brubaker, Jong K. Keum, Wim Bras, Jennifer L. Niedziela. Thermally Induced Structural Transitions in Epoxy Thermoset Polymer Networks and Their Spectroscopic Responses // ACS Applied Polymer Materials. 2023. Vol. 5. No 8. P. 5961–5971. DOI: 10.1021/acsapm.3c00637.
3. Guangxin Lv, Chengtian Shen, Naisong Shan, Elynn Jensen, Xiaoru Li, Christopher M. Evans, David G. Cahill. Odd–even effect on the thermal

conductivity of liquid crystalline epoxy resins // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2022. Vol. 119. No 46. DOI: 10.1073/pnas.2211151119.

4. Lv G.X., Jensen E., Shen C.T., Yang K.X., Evans C.M., Cahill D.G. Effect of Amine Hardener Molecular Structure on the Thermal Conductivity of Epoxy Resins // ACS Appl. Polym. Mater. 2021. Vol. 3. P. 259–267.

5. Morgan R.J., Oneal J.E. Effect of Epoxy Monomer Crystallization and Cure Conditions on Physical Structure, Fracture Topography, and Mechanical Response of Polyamide-Cured Bisphenol-A-Diglycidyl Ether Epoxies // J. Macromol. Sci., Part B: Phys. 1978. Vol. 15. P. 139–169.

6. Этиленамины // Dow Chemical. [Electronic resource]. URL: <https://pdfslide.net/documents/-dow-chemical-.html?page=4>.

7. Эпоксидные смолы и отвердители (структура, свойства, химия и топология отверждения) / под ред. Мошинский Л. Тель-Авив: Аркадия пресс Лтд., 1995. 370 с.

8. Ли Г., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. Пер. с англ. / под ред. Александров Н.В. Москва: Энергия, 1973. 415 с.

9. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. Москва: Химия, 1982. 232 с.

10. Катаев В.М., Попов В.А., Сажин Б.И. Справочник по пластическим массам: в 2-х т. Москва: Химия. 1975, Т. 2. 568 с.

11. Lidaoik M. Epoxydove Priskioice. Praha (Czecho-Slovakia): SNTL, 1983.

12. Brojer Z., Hertz Z., Penczek P. Ziwice Epoksydowe. Warszawa (Polska): WNT, 1981.

13. Electronic resource. URL: <https://linux-admins.ru/otverditeli-pepa-i-teta>.

14. Ломовской В.А. Проблемы структурообразования в дисперсных системах. Научное издание «Современные проблемы физической химии. М.: Изд. Дом «Граница», 2005. С. 193–209.

15. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. М.: Metallurgy, 1969. 330 с.
16. Криштал М.А., Головин С.А. Внутреннее трение и структура металлов. М.: Metallurgy, 1976. 376 с.
17. Мешков С.И. Вязкоупругие свойства металлов. М.: Metallurgy, 1974. 192 с.
18. Внутреннее трение в металлах и сплавах. Сб. научных трудов ИМЕТ АН СССР. М.: Наука, 1970. 208 с.
19. Внутреннее трение в металлах, полупроводниках, диэлектриках и ферромагнетиках. Сб. научных трудов АН СССР. М.: Наука, 1978. 240 с.
20. Гриднев С.А. Механизмы внутреннего трения в сегнетоэлектриках и сегнетоэластиках. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 1983. 360 с.
21. Механизмы релаксационных явлений в твердых телах. Сб. научных трудов АН СССР. Каунас: КПИ, 1974. 364 с.
22. Бартенев Г. М., Бартенева А.Г. Релаксационные свойства полимеров. М: Химия, 1992. 384 с.
23. Шутилин Ю.Ф. Физико-химия полимеров. Воронеж: Обл. тип, 2012. 838 с.
24. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Физматгиз, 1960. 194 с.
25. Гранато А, Люкке К. Дислокационная теория поглощения // Ультразвуковые методы исследования дислокаций. М.: Изд-во ИЛ, 1963. С. 27–57.
26. Мазурин О.В., Стрельцина М.В., Швайко-Швайковская Т.П. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов. Справочник. В 4-х томах. М.: Наука, 1975.

27. Каталог отвердителей эпоксидных смол // ХИМЭКСЛимитед [Electronic resource]. URL: https://disk.yandex.ru/i/ScB6NV_oHfEBmg (accessed: 19.10.2023).

28. Ломовской В.А. Устройство для исследования локальных диссипативных процессов в твердых материалах различной химической природы, строения и структуры // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 33–46.

29. Асламазова Т.Р., Ломовской В.А., Шоршина А.С., Золотаревский В.И., Котенев В.А., Ломовская Н.Ю. Температурно-частотные области неупругости в композитах канифоль-медь и канифоль-целлюлоза // Журнал физической химии. 2022. Т. 96. № 1. С. 144–152. DOI: 10.31857/S0044453722010034.

30. Асламазова Т.Р., Котенев В.А., Ломовская Н.Ю., Ломовской В.А., Цивадзе А.Ю. Диссипативные процессы в акриловом полимере локализованном на металлических подложках. Журнал физическая химия. 2022. Т. 96. № 5. С. 707–715. DOI: 10.1134/S0036024422050028.

31. Терентьева Э.П., Удовенко Н.К., Павлова Е.А. Химия древесины, целлюлозы и синтетических полимеров: учебное пособие. Ч. 1. Санкт-Петербург: СПбГТУРП, 2014. 53 с.

32. Ломовской В.А. Устройство для исследования локальных диссипативных процессов в твердых материалах различной химической природы, строения и структуры // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 33–46.

33. Ломовской В.А., Чугунов Ю.В., Шатохина С.А. Методика исследования внутреннего трения в режиме свободно-затухающего колебательного процесса (Часть 1) // Научное приборостроение. 2023. Т. 33. № 4. С. 60-71.

34. Асламазова Т.Р., Котенев В.А., Ломовская Н.Ю., Ломовской В.А., Шатохина С.А., Цивадзе А.Ю. Анализ диссипативных процессов в

наполненном полимере с привлечением данных механической релаксационной спектроскопии // Журнал физической химии. 2022. Т. 94. № 7. С. 1–5.

35. Асламазова Т.Р., Котенев В.А., Ломовская Н.Ю., Ломовской В.А., Цивадзе А.Ю. Диссипативные процессы в облученных латексных полимерах // Химия высоких энергий. 2019. Т. 53. № 5. С. 369–374.

**АНАЛИЗ КИНЕТИКИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ
В СТРУКТУРЕ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК
И НАТУРНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Т.А. Низина¹, д.т.н.; Д.Р. Низин¹, к.т.н.;

В.П. Селяев¹, академик РААСН, д.т.н.; Н.С. Канаева¹, И.А. Чибулаев¹

**ANALYSIS OF THE KINETICS OF DAMAGE ACCUMULATION
IN THE EPOXY POLYMER STRUCTURE EXPOSED
TO DYNAMIC LOADS AND FIELD CLIMATIC EFFECTS**

T.A. Nizina¹, D.R. Nizin¹, V.P. Selyaev¹, N.S. Kanaeva¹, I.A. Chibulaev¹

nizinata@yandex.ru

¹*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва, Саранск, Россия*

¹*National Research Mordovia State University, Saransk, Russia*

Аннотация

Представлены результаты экспериментальных исследований по оценке изменения свойств эпоксидных полимеров под действием динамических нагрузок различной интенсивности, эксплуатирующихся в условиях натурального климатического старения в условиях умеренного климата. Произведен расчет кинетики накопления показателей повреждаемости в структуре полимерных материалов согласно предложенной авторской методике. Выявлен комплекс показателей повреждаемости, расчет которых необходимо проводить в процессе

исследований: кинетика накопления повреждений в зависимости от уровня растягивающих напряжений и относительного удлинения; суммарное число отказов при циклическом нагружении и на этапе разрушения; удельные показатели на этапе разрушения и всей истории нагружения.

Ключевые слова:

эпоксидные полимеры, климатическое старение, накопление повреждений, фрактальный анализ, удельные показатели

Abstract

The paper presents the results of experimental studies on the assessment of changes in the properties of epoxy polymers exposed to dynamic loads of varying intensity, operated under conditions of field climatic aging in a temperate climate. The kinetics of damage accumulation in the structure of polymer materials was calculated according to the proposed author's methodology. A set of damage indicators has been identified, to be calculated in the course of research: the kinetics of damage accumulation depending on the level of tensile stresses and elongation; the total number of failures during cyclic loading and at the stage of destruction; specific indicators at the stage of destruction and the entire history of loading.

Keywords:

epoxy polymers, climate aging, damage accumulation, fractal analysis, specific indicators

Введение

Устойчивость к циклическим воздействиям – как механическому нагружению, так и действию агрессивных факторов и сред, представляет собой одно из основных условий обеспечения бесперебойной работы строительных изделий и конструкций. Как показал анализ работ [1–5], прочностные показатели полимерных композиционных материалов при

испытании на динамическую усталость значительно отличаются от аналогичных показателей, определяемых при воздействии статических нагрузок. В условиях действия переменных нагрузок могут протекать процессы как упрочнения, так и разупрочнения, связанные с исходным структурным состоянием материалов, а также его изменением под действием циклических деформаций, образованием и перераспределением остаточных микронапряжений, а также возникновением и развитием микроповреждений.

Вопрос влияния циклического воздействия на изменение несущей способности и долговечности композиционных материалов характеризуется высокой комплексностью и трудоемкостью как с точки зрения проведения экспериментальных исследований, так и разнообразия процессов, протекающих в материалах. Достоверность прогнозирования прочности и долговечности конструкционных полимерных материалов в условиях циклического нагружения осложняется различного рода факторами деградации, такими как климатическое воздействие, агрессивные среды и др. [6–10]. Причем совместное действие факторов зачастую сопровождается возникновением синергетических эффектов.

Определение предела накопления усталостных повреждений и предсказание остаточного ресурса эксплуатации с допустимым уровнем повреждений являются важными научными задачами [11]. В работах [12–14] авторским коллективом была предложена методика для оценки кинетики накопления повреждений в структуре полимерных композитов при статическом нагружении под действием растягивающих нагрузок, основанная на использовании методов фрактального анализа при исследовании кривых деформирования, с высокой частотой снятия показаний. Представленный подход позволяет количественно определять критический уровень накопления микродефектов, приводящих к разуплотнению структуры образца и появлению первых трещин, а также

проанализировать последующий этап нагружения до разрушения полимера. Для количественной оценки изменения кинетики накопления повреждений в структуре образцов полимерного материала под действием растягивающих нагрузок предложено [12–14] использовать показатель ω , определяемый как отношение числа точек с индексом фрактальности, меньшим 0.5, к общему числу точек кривой деформирования (до достижения уровня максимальных напряжений) и удельный показатель θ , отражающий отношение суммарной доли накопленных повреждений к пределу прочности образца полимерного материала. Адаптации данной методики для оценки воздействия циклических нагрузок, а также анализу влияния интенсивности и частоты циклического воздействия на примере одного состава эпоксидного полимера посвящена данная работа.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования для тестирования предлагаемой методики являлись образцы полимерного материала, изготовленные на основе эпоксидной смолы Этал-247 (ТУ 2257-200-18826195-02 изм.1) и отвердителя Этал-45М (ТУ 2257-045-18826195-01). Испытания образцов-восьмерок проводились в соответствии с ГОСТ Р 57143-2016 «Композиты полимерные. Метод испытания на усталость при циклическом растяжении» при мягком циклическом амплитудном нагружении; контролируемый параметр – напряжение. Целевые уровни циклического воздействия составляли 40, 60 и 80 % от предела прочности при растяжении образцов без предварительного циклирования. Для возможности последующего сравнения данных, фиксируемых при различной длительности климатического воздействия, уровень растягивающих нагрузок округлялся до величины, кратной 5 МПа. Количество циклов для уровней напряжения 40 и 60 % рассчитывалось на основе значения суммарной работы нагружения, эквивалентной 5 циклам

растягивающей нагрузки для уровня 80 % от предела прочности при растяжении.

Для исследования воздействия климатических факторов на изменение динамической усталостной прочности полимерных материалов проводилось их натурное экспонирование на испытательной площадке научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз (НИЛ ЭММСТиЭ) Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (Республика Мордовия, г. Саранск), расположенной в умеренно-континентальных климатических условиях. Непрерывно в автоматическом режиме производился контроль и фиксация количественных значений факторов окружающей среды с помощью автоматической станции контроля загрязнения атмосферного воздуха с актинометрическим комплексом в комплекте с шагом 20 минут для метеорологических показателей (температура, относительная влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, осадки и т. д.) и 10 минут для актинометрических (солнечная радиация, ультрафиолетовые излучения диапазона А и В).

Съем образцов с испытательных стендов проводился с учетом контрольных точек, соответствующих достижению следующих уровней накопленных значений суммарной солнечной радиации – 400, 800, 1600 и 3200 МДж/м² (уровень в 3200 МДж/м² соответствует ~1 календарному году натурального экспонирования во временном эквиваленте). Натурные экспериментальные исследования были начаты 01.05.2021 г.

Скорость перемещения зажимов разрывной машины серии AGS-X с программным обеспечением TRAPEZIUM X составляла 2 мм/мин, частота фиксации показаний – 0,01 сек. Испытания осуществлялись при температуре 23±2 °С и относительной влажности воздуха 50±5 %. Число

образцов, испытываемых на каждом уровне циклической нагрузки составляло не менее 6 штук.

Сущность подхода, предлагаемого для оценки кинетики накопления повреждений в полимерных материалах под действием циклических нагрузок, заключается в реализации следующих этапов [14–16]:

1. Определение числа актов нагружения, фиксируемых с частотой снятия показаний 0,01 сек., для отдельных циклов N_1, N_2, \dots, N_m и этапа разрушения $N_{\text{разр.}}$ (до точки достижения максимального уровня растягивающей нагрузки);

2. Выявление числа актов нагружения, сопровождающихся выходом из работоспособного состояния структурных элементов исследуемого материала. В качестве показателя, характеризующего состояние образца в заданный момент времени, используются значения индекса фрактальности временных рядов $\mu(\sigma, \varepsilon)$, рассчитываемых с помощью метода наименьшего покрытия по изменению прироста напряжений при растяжении в процессе нагружения. За акты выхода структурных элементов из работоспособного состояния принимаются точки со значением $\mu(\sigma, \varepsilon)$, меньшим 0,5 (по аналогии с классическими методами фрактального анализа временных рядов). Подсчет ведется как для каждого цикла нагружения (от 1 до m), так и для этапа разрушения – соответственно, $N_{def.1}, N_{def.2}, \dots, N_{def.m}$ и $N_{def.разр.}$;

3. Расчет общего числа актов нагружения N_0 , реализация которых приводит к достижению предельного уровня растягивающих напряжений, осуществлялся по формуле:

$$N_0 = \sum_{i=1}^m N_{def.i} + N_{def.разр.} + N_{разр.}, \quad (1)$$

где $N_{разр.}$ – число актов этапа разрушения (после циклического воздействия), для которого не наблюдалось возникновения отказов;

4. Расчет числа отказов (%):

– при воздействии циклических нагрузок отдельно для каждого этапа нагружения:

$$\omega_i = \frac{N_{def.i}}{N_0} \cdot 100, \quad (2)$$

где $i = 1 \div m$ – номер цикла нагружения;

– при воздействии разрушающей нагрузки (до достижения уровня максимального напряжения)

$$\omega_{разр.} = \frac{N_{def.разр.}}{N_0} \cdot 100; \quad (3)$$

– суммарного числа отказов (%):

$$\omega = \sum_{i=1}^m \omega_i + \omega_{разр.} \quad (4)$$

5. Расчет удельных показателей $\theta_{разр.}$ и θ (%/МПа) как отношения суммарной доли накопленных повреждений к пределу прочности образца полимерного материала, определяемого в двух вариантах:

– при анализе только этапа разрушения (без учета предыстории нагружения)

$$\theta_{разр.} = \frac{\omega'_{разр.}}{\sigma_{раст.}}, \quad (5)$$

где $\omega'_{разр.}$ – число накопленных отказов этапа разрушения, определяемых по формуле:

$$\omega'_{разр.} = \frac{N_{def.разр.}}{N_{def.разр.} + N_{разр.}} \cdot 100; \quad (6)$$

– при анализе всей истории нагружения (циклические воздействия и этап разрушения)

$$\theta = \frac{\omega}{\sigma_{раст.}} \quad (7)$$

Удельный показатель θ , рассчитываемый по формуле (7), позволяет сравнить серии образцов, подвергаемых различным комбинациям циклических нагрузок с последующим разрушением, удельный показатель $\theta_{разр.}$ (5) – оценивать состояние полимера до и после циклического

воздействия.

Для расчетов использовался программный комплекс, реализованный на языке Python [17].

Результаты и обсуждение

Комплексные кривые деформирования, включающие как циклическое воздействие различной интенсивности, так и этап нагружения до разрушения полимерных образцов состава Этал-247/Этал-45М контрольной серии представлены на рисунке 1 (этап циклического нагружения дополнительно вынесен в увеличенном масштабе). Кривые накопления повреждений в структуре исследуемого эпоксидного полимера (до климатического старения) для различных уровней циклического нагружения и числа циклов показаны на рисунке 2. По представленным графическим зависимостям наглядно видна скорость накопления повреждений отдельно для каждого цикла и на этапе разрушения в зависимости от напряжения и относительного удлинения при растяжении. Число накопленных повреждений увеличивается с повышением уровня прикладываемого циклического нагружения, а также числом циклических воздействий.

Учитывая, что в зависимости от длительности климатического воздействия происходит изменение упруго-прочностных показателей и, как следствие, уровня прикладываемых циклических нагружений, для наглядного представления полученных результатов использовались столбчатые диаграммы (рис. 3–5). Из анализа упруго-прочностных показателей эпоксидного полимера Этал-247/Этал-45М выявлено (рис. 2, а, б) повышение предела прочности при растяжении и разрыве, соответственно, на $42,9 \div 55,6 \%$ и $63,2 \div 84,6 \%$ по сравнению с прочностными показателями полимера в контрольном состоянии. Натурное экспонирование образцов в условиях умеренного климата

сопровождается повышением (на $22,1 \div 32,3$ %) относительного удлинения при растяжении и снижением (на $33,1 \div 46,2$ %) – при разрыве (рис. 2, в, г). Модуль упругости при растяжении в процессе климатического старения повышается на $29,7 \div 40,2$ % (рис. 2, д).

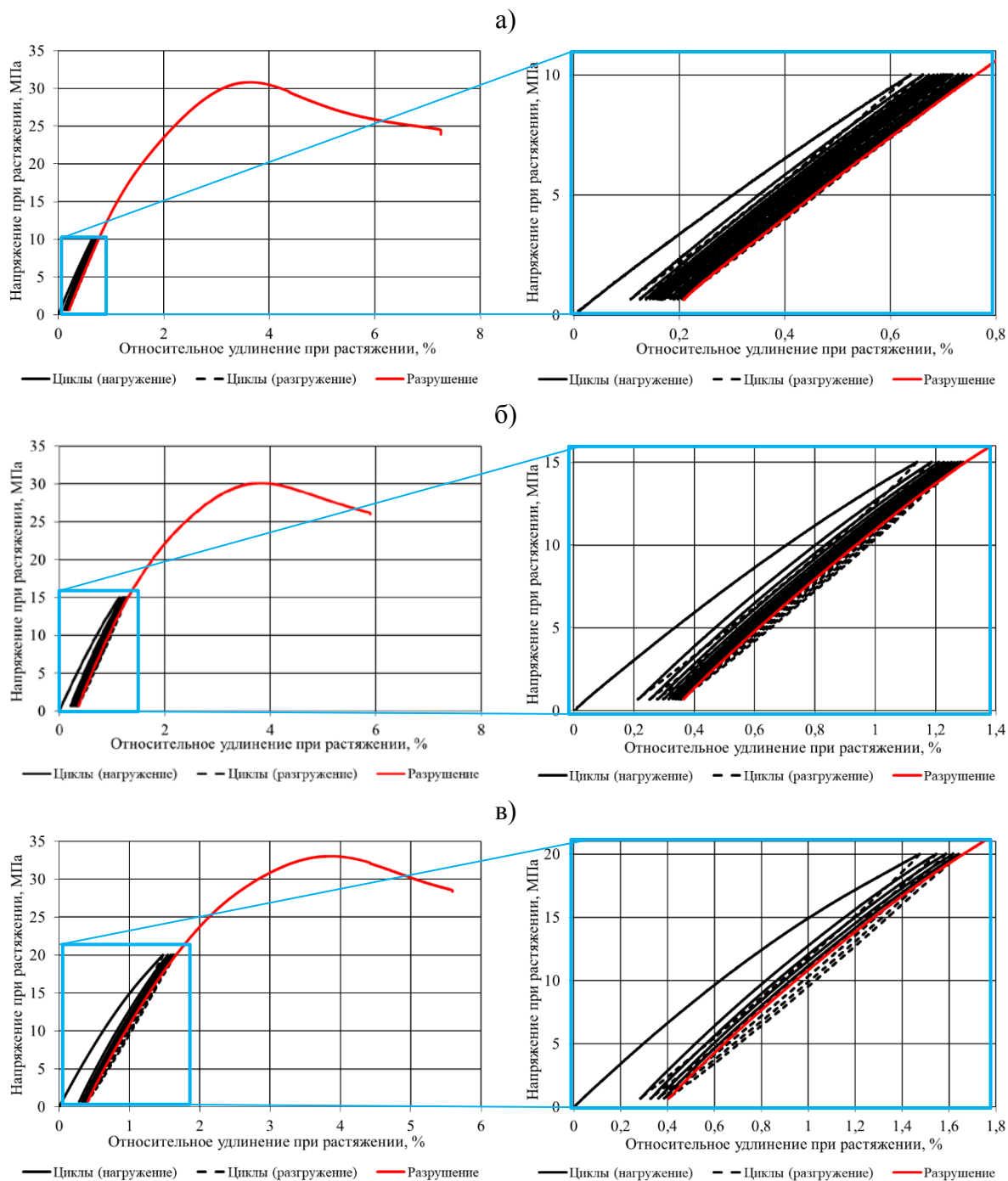


Рис. 1 – Кривые деформирования полимера Этал-247/Этал-45М (до натурального экспонирования) при циклическом нагружении: а – 10 МПа, 25 циклов; б – 15 МПа, 10 циклов; в – 20 МПа, 5 циклов

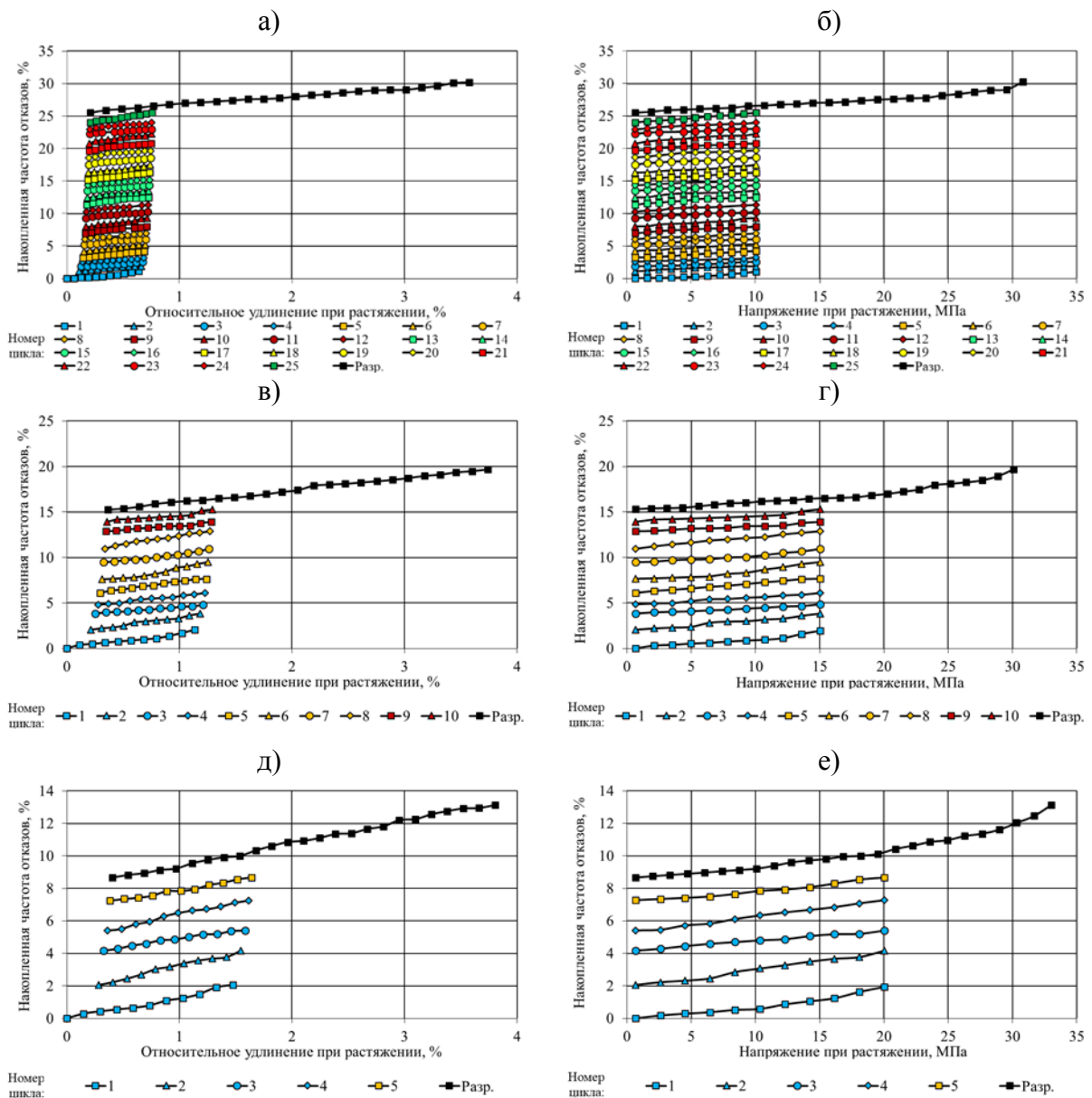


Рис. 2 – Кривые накопления повреждений в структуре полимера Этал-247/Этал-45М в зависимости от относительного удлинения (а, в, д) и напряжения при растяжении (б, г, е) при циклическом нагружении: а, б – 10 МПа, 25 циклов; в, г – 15 МПа, 10 циклов; д, е – 20 МПа, 5 циклов

Влияние циклического нагружения проявляется в увеличении относительного удлинения при повышении уровня циклического нагружения (рис. 2, е). Характер изменения других упруго-прочностных показателей выражен менее ярко. Анализ математических зависимостей, описывающих влияние накопленной суммарной солнечной радиации, уровня и числа циклических воздействий, а также влажностного состояния

исследуемых образцов будет проведен в другой работе.

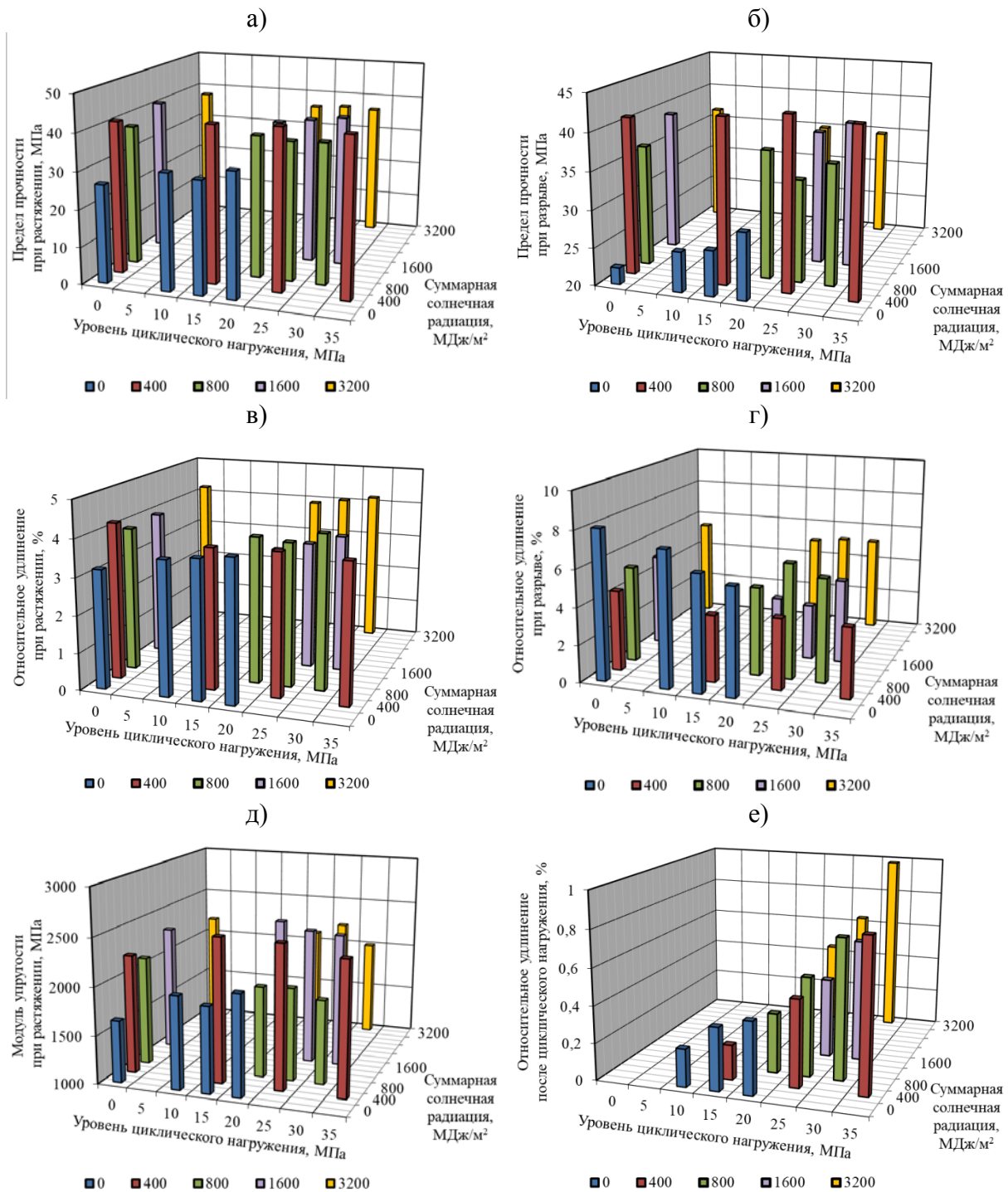


Рис. 3 – Изменение пределов прочности при растяжении (а) и разрыве (б), относительного удлинения при растяжении (в) и разрыве (г), модуля упругости (д) и относительного удлинения после циклического нагружения (е) полимера Этал-247/Этал-45М в процессе натурального экспонирования в зависимости от уровня приложенной нагрузки и накопленной суммарной солнечной радиации

В рамках данного исследования ограничимся выявлением

количественных показателей кинетики накопления повреждений и оценкой их чувствительности при учете интенсивности динамических нагрузений на полимерные образцы, экспонированные в натуральных климатических условиях. Накопленное число повреждений в структуре полимерных материалов оценивалось отдельно для этапа циклических воздействий (рис. 4, а) и разрушения (рис. 4, б), а также комплексном воздействии всех механических нагрузений (рисунок 4, в) и одинаковом числе циклов нагружения (рис. 4, г) – соответственно, $\sum_{i=1}^m \omega_i$ (2), $\omega_{\text{разр.}}$ (3), ω (4) и $\omega_{5\text{ц}}$ (5 циклов).

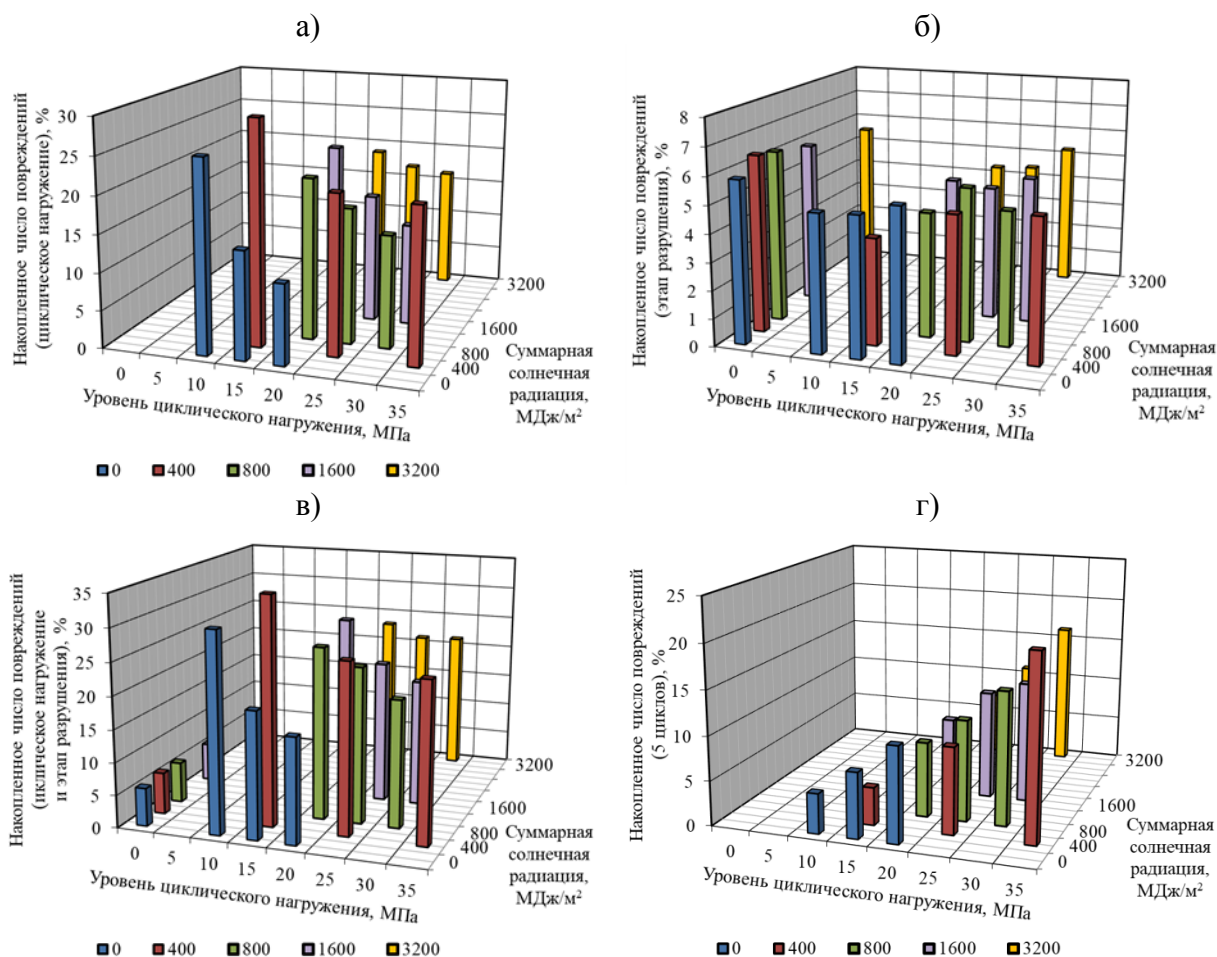


Рис. 4 – Изменение накопленной частоты отказов при циклическом нагружении (а), на этапе разрушения (б), в процессе всей истории нагружения (в), при анализе первых 5 циклов нагружения (г) полимера Этал-247/Этал-45М в процессе натурального экспонирования в зависимости от уровня приложенной нагрузки и уровня накопленной суммарной солнечной радиации

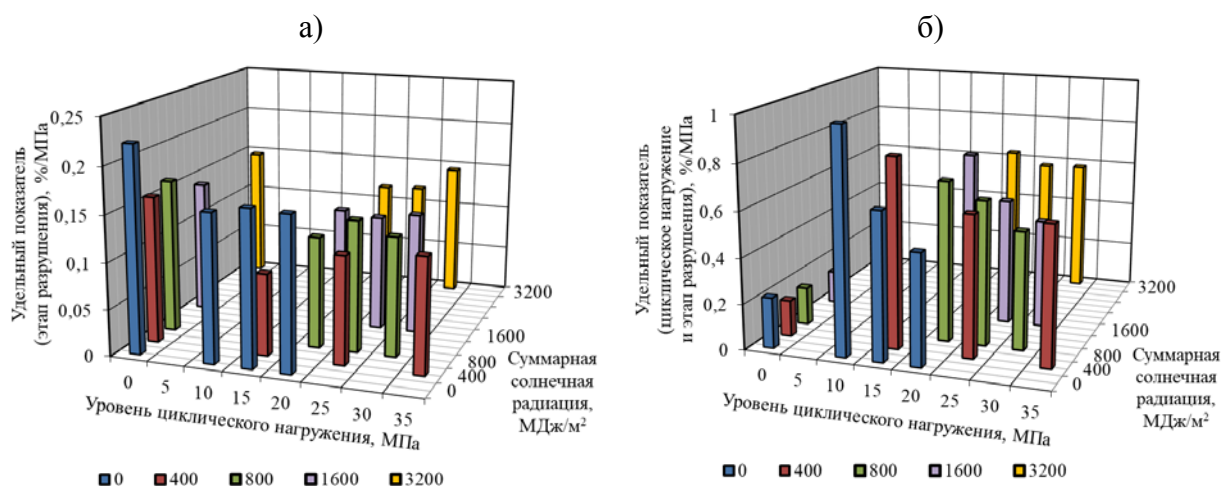


Рис. 5 – Изменение удельных показателей накопленной частоты отказов на этапе разрушения (а) и в процессе всей истории нагружения (а) полимера Этал-247/Этал-45М в процессе натурального экспонирования в зависимости от уровня приложенной нагрузки и уровня накопленной суммарной солнечной радиации

Для образцов, не подверженных циклическим воздействиям, уровень накопленных повреждений, соответствующий достижению сериями полимера предельной растягивающей нагрузки, варьируется в интервале $5,5 \div 6,4$ % (рис. 4, б). При этом, с учетом изменения предела прочности при растяжении в процессе натурального экспонирования, удельный показатель $\theta_{\text{разр.}}$ варьируется в интервале от 0,14 до 0,22 %/МПа, снижаясь с повышением уровня накопленной солнечной радиации (рис. 5, а). Анализ показателя $\theta_{\text{разр.}}$, на наш взгляд, более наглядно отражает влияние варьируемых факторов (в данном случае, уровень циклического нагружения и накопленная суммарная солнечная радиация) на число накопленных повреждений на единицу прочности, приводящих к достижению максимальных растягивающих нагрузок, чем θ . При оценке уровня накопленных повреждений наиболее целесообразным оказывается сравнение числовых значений $\sum_{i=1}^m \omega_i$ при одном и том же числе циклических нагружений, в данном случае $\omega_{5\text{ц}}$ (рис. 4, г).

Заключение

Предложена методика оценки накопления повреждений при

циклическом нагружении образцов полимерных материалов, основанная на использовании методов фрактального анализа временных рядов. Выявлен комплекс показателей повреждаемости, расчет которых необходимо проводить в процессе исследований: кинетика накопления повреждений в зависимости от уровня растягивающих напряжений и относительного удлинения; суммарное число отказов при циклическом нагружении и на этапе разрушения, в том числе при фиксированном уровне циклического воздействия; удельные показатели на этапе разрушения и всей истории нагружения.

Литература

1. Бондарь В.С., Даншин В.В., Макаров Д.А. Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагружениях // Вестник ПНИПУ. Механика. 2014. № 2. С. 125–152.
2. Гоц А.Н., Глинкин С.А. Обзор моделей усталостного разрушения при циклическом нагружении // Фундаментальные исследования. 2016. № 9 (часть 3). С. 478–482.
3. Горохов В.А. Численное моделирование процессов уруговязкопластического деформирования и разрушения элементов конструкций при квазистатических термосиловых, циклических и терморadiационных воздействиях// Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, Нижний Новгород. 2018. 240 с.
4. Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций: Монография. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета. 1999. 226 с.

5. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит. 2008. 424 с.

6. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 4 (21).

7. Булманис В.Н., Ярцев В.А., Кривонос В.В. Работоспособность конструкций из полимерных композитов при воздействии статических нагрузок и климатических факторов // МКМ. 1987. № 5. С. 915-920.

8. Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Матвеевкова Т.Е., Коренькова Т.Г. Влияние последовательного воздействия климатических и эксплуатационных факторов на свойства полимерных композиционных материалов // В сб. докладов V научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2004». М. 2004. С. 155–158.

9. Гладких А.В., Курс И.С., Курс М.Г. Анализ данных натурных климатических испытаний, совмещенных с приложением эксплуатационных факторов, неметаллических материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70) 74–82.

10. Нестерова Т.А., Назаров И.А., Барботько С.Л., Вольный О.С., Платонов М.М. Исследование влияния эксплуатационных и климатических факторов на свойства материала для баллонета пневматического трапа для аварийного покидания кабины вертолета // Труды ВИАМ. 2017. № 6 (54). С. 94–101.

11. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 4 (21). С. 35–40.

12. Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S., Kuznetsov N.M., Artamonov D.A. Applying the Fractal Analysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses / T.A. Nizina T.A., D.R. Nizin, N.S. Kanaeva, N.M. Kuznetsov, D.A. Artamonov // Key engineering materials. 2019. Vol. 799. P. 217–223. Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.217.
13. Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S. Statistical Analysis of the Frequency of Damage Accumulation in the Structure of Epoxy Composites Under Tensile Loads // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 95. P. 1–8. Doi: 10.1007/978-3-030-54652-6_1.
14. Nizin D.R., Nizina T.A., Kanaeva N.S. Kinetics of Failure Accumulation in Polymers under the Cyclic Loads // AIP Conference Proceedings 2497, 040017 (2023). Doi: 10.1063/5.0104894/
15. Nizina T.A., Nizin D.R., Kanaeva N.S. Analysis of the Effect of Cyclic Loading Mode on the Change in the Properties of Polymer Materials // Lecture Notes in Civil Engineering, 2023, 307 LNCE, P. 350–356. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20459-3_44.
16. Nizina, T.A., Nizin, D.R., Kanaeva, N.S. (2023). Effect of Cyclic Loading Level on Elastic-Strength Characteristics and Kinetics of Damage Accumulation in Polymers. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 307. Pp. 49–55. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20459-3_7.
17. Низин Д.Р., Низина Т.А., Канаева Н.С. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022612647 «Расчет локальных и интегрального индексов фрактальности кривых деформирования образцов полимерных материалов» от 28.02.2022 г.

УДК 678.8

**РАЗРАБОТКИ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» - ВИАМ
В ОБЛАСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕРЬЕРНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ:
РАЗВИТИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ**

Е.Д. Колпачков¹, к.т.н.; М.И. Вавилова¹;

И.А. Сарычев¹; Э.Ю. Долгов¹

**DEVELOPMENTS OF THE NATIONAL RESEARCH CENTER
"KURCHATOV INSTITUTE" - VIAM IN THE FIELD
OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR THE
MANUFACTURE OF INTERIOR STRUCTURES OF AIRCRAFT:
DEVELOPMENT AND APPLICATION**

E.D. Kolpachkov¹, Ph.D.; M.I. Vavilova¹;

I.A. Sarychev¹; E. Yu. Dolgov¹

egor.kolpachkov@yandex.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ), Москва, Россия*

¹*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM), Moscow, Russia*

Аннотация

Рассмотрены основные векторы развития интерьерных ПКМ в соответствии с требованиями, предъявляемыми к материалам интерьера

авиационной техники. Представлена история развития полимерных композиционных материалов разработки НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ для интерьеров авиационной техники. Приведены результаты исследований физико-механических характеристик и характеристик пожаробезопасности стеклопластиков и трехслойных сотовых панелей на основе нового расплавленного эпоксидного связующего.

Ключевые слова:

расплавленное эпоксидное связующее, полимерные-композиционные материалы, стеклопластики, интерьерные материалы, трехслойные сотовые панели

Annotation

The main vectors of development of interior PCMs are considered in accordance with the requirements for aircraft interior materials. The history of the development of polymer composite materials developed by the National Research Center “Kurchatov Institute” - VIAM for aircraft interiors is presented. The results of studies of the physical and mechanical characteristics and fire safety characteristics of fiberglass and three-layer honeycomb panels based on a new molten epoxy binder are presented.

Keywords:

melt epoxy binder, polymer composite materials, fiberglass, interior materials, three-layer honeycomb panels

Введение

Исследования и разработки в области новых материалов позволяют конструкторам и машиностроителям создавать новые образцы техники с более высоким уровнем тактико-технических характеристик. Параллельно с этим, регулирующие органы в различных областях машиностроения основываясь на новых подходах к особенностям эксплуатации, в

особенности безопасной эксплуатации, предъявляют новые требования, которые должны учитываться при разработке новых образцов техники. Именно основываясь на принципе учета новых требований, которые должны обеспечивать безопасную эксплуатацию новых видов техники, в частности авиационной, специалисты НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ проводят разработки перспективных образцов полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1, 2].

На сегодняшний день НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ является ведущей материаловедческой организацией и обладает 90-летним опытом разработок и исследований материалов для изделий авиационной техники, в том числе в области ПКМ конструкционного назначения. В настоящее время институт реализует различные проекты в интересах отечественной авиационной отрасли: разрабатывает, исследует, паспортизует новые материалы; изготавливает, поставляет и совершенствует ранее разработанные материалы. Институтом проводится ряд работ, направленных на разработку технических решений, в обеспечении современных образцов авиационной техники, в частности: в области двигателестроения – двигатели ПД-14, ПД-35 и др., в области самолетостроения – самолеты Ил-114-300, SJ-100 и др., в области вертолетостроения – вертолеты Ми-38, Ми-171 и др. Собственно как сейчас, НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ решает самые перспективные задачи в области полимерного материаловедения, так и более 50 лет назад, когда Министерством авиационной промышленности были впервые введены требования по пожаробезопасности к материалам, применяемым в интерьерах авиационной техники [3, 4].

Впервые требования в части пожаробезопасности материалов интерьера были введены в НГЛС-2 в 1974 году и заключались в необходимости соответствия требованиям при испытании на горючесть. Материалы подвергались горению в вертикальном положении и

удовлетворяли требованиям, если: остаточное горение после удаления источника пламени не превышало 15 с, средняя длина обугливания была не более 170 мм, а горение отделяющих капель было не больше 3 с.

С введением данных требований, специалистами НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ было разработано эпоксидное связующее ЭП-2МК, обеспечивающее соответствие новым требованиям по горючести. Были разработаны трехслойные сотовые панели с обшивками из стеклопластиков на основе ЭП-2МК (рис. 1) взамен алюминиевых, что позволило снизить вес трехслойных сотовых панелей (ТСП). Данные ТСП нашли широкое применение в самолетах Ил-86, Ту-154, Як-42. Однако, препреги на основе ЭП-2МК имели низкую жизнеспособность, а стеклопластики на их основе имели энергозатратный режим формования.



Рис. 1 – Трехслойные сотовые панели с обшивками из ПКМ на основе ЭП-2МК

В 1984 году в 3 изд. НЛГС было введено требование к материалам интерьеров авиационной техники в части дымообразования и токсичности. Для соответствия требованиям НЛГС по части дымообразования, максимальная оптическая плотность дыма не должна превышать 200. Для соответствия новым требованиям НЛГС, специалистами

НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ было разработано фенольное модифицированное связующее П-5-15 и препреги на его основе. Материалы на основе П-5-15 полностью удовлетворяли требованиям по пожаробезопасности в части горючести и дымообразования. Однако, в связи с низким уровнем физико-механических характеристик относительно материалов на основе связующего ЭП-2МК не нашли широкого применения в изделиях авиационной техники.

В рамках совершенствования номенклатуры материалов в 1987 году было разработано связующее ЭДТ-69Н и препреги на его основе (рис. 2) для изготовления негорючих стеклопластиков, с целью применения в интерьерах авиационной техники. Стеклопластики на основе ЭДТ-69Н имеют высокие физико-механические свойства, энергоэффективный режим формования и высокую жизнеспособность. Благодаря своим достоинствам, нашли широкое применение в изделиях Ан-38, Ан-70, Бе-200. В части пожаробезопасности, они соответствовали требованиям НЛГС-3 по горючести, однако не соответствовали требованиям в части дымообразования.

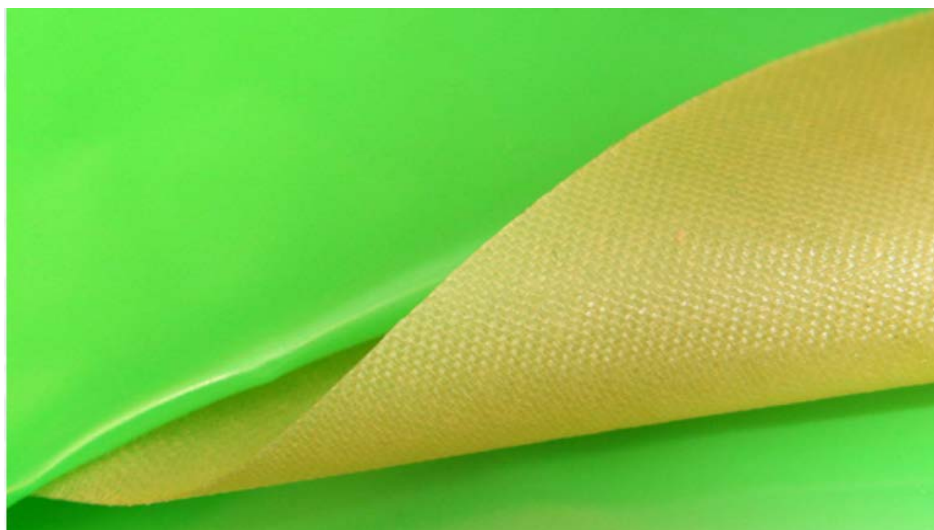


Рис. 2 – Препрег на основе эпоксидного связующего ЭДТ-69Н и стеклянной ткани Т-10

В 1994 году с целью гармонизации внутренних и зарубежных требований, предъявляемых к изделиям авиационной техники, в том числе в части характеристик пожаробезопасности, были выпущены Авиационные правила, Часть 25 (АП-25), содержащие дополнительные требования по тепловыделению. К этому моменту в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ уже было разработано связующее ФП-520 и препреги на его основе соответствующие всему комплексу требований в части характеристик пожаробезопасности – горючесть, дымообразование, тепловыделение. Данные требования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Комплекс требований в части характеристик пожаробезопасности для интерьерных материалов авиационной техники

Горючесть	Дымообразование	Тепловыделение
<p>Образец помещается в пламя горелки на 60 с вертикально</p> <p>Остаточное горение – не более 15 с</p> <p>Средняя длина обугливания – не более 152 мм</p> <p>Горение капель – не более 3 с</p>	<p>Максимальная оптическая плотность дыма – не более 200</p>	<p>Максимальная интенсивность выделения тепла – не более 65 кВт/м²</p> <p>Общее количество выделившегося тепла за 2 мин – не более 65 кВт/м²</p>

Фенольное связующее ФП-520 и материалы на его основе нашли применение в составе ТСП интерьера самолетов Ан-140, Ил-96, Ту-214. Недостатком данного материала в первую очередь являлась необходимость использования дефицитных фосфорсодержащих ингибиторов горения и низкий уровень физико-механических свойств в трехслойных сотовых панелях.

С целью совершенствования перечня ПКМ применяемых в элементах интерьера авиационной техники в 2009 году было разработано фенолформальдегидное связующее РС-Н и препреги на его основе с применением общедоступного сырья. В сравнении с ФП-520, материалы на

основе РС-Н имеют более высокий уровень физико-механических характеристик и меньшие значения тепловыделения.

Для повышения уровня прочностных характеристик и обеспечения более энергоэффективного процесса переработки в 2012 году было разработано модифицированное фенолформальдегидное связующее ВСФ-16М и препреги на его основе. Полученные материалы имеют повышенный уровень прочностных характеристик относительно материалов на основе РС-Н и менее энергозатратный процесс получения панелей интерьера по сравнению с материалами на основе, ранее разработанных связующих ФП-520 и РС-Н. Однако, материалы на основе фенольных и фенолформальдегидных связующих в составе трехслойных сотовых панелей в целом имеют уровень прочностных свойств ниже, в сравнении с ТСП на основе эпоксидных связующих [5–8].

С учетом получения нового опыта эксплуатации изделий авиационной техники и совершенствования требований их безопасной эксплуатации к настоящему времени сформирован основной перечень характеристик пожаробезопасности, соблюдение которых необходимо для применения материала в конструкции изделий авиационной техники. Данные требования представлены на рис. 3.

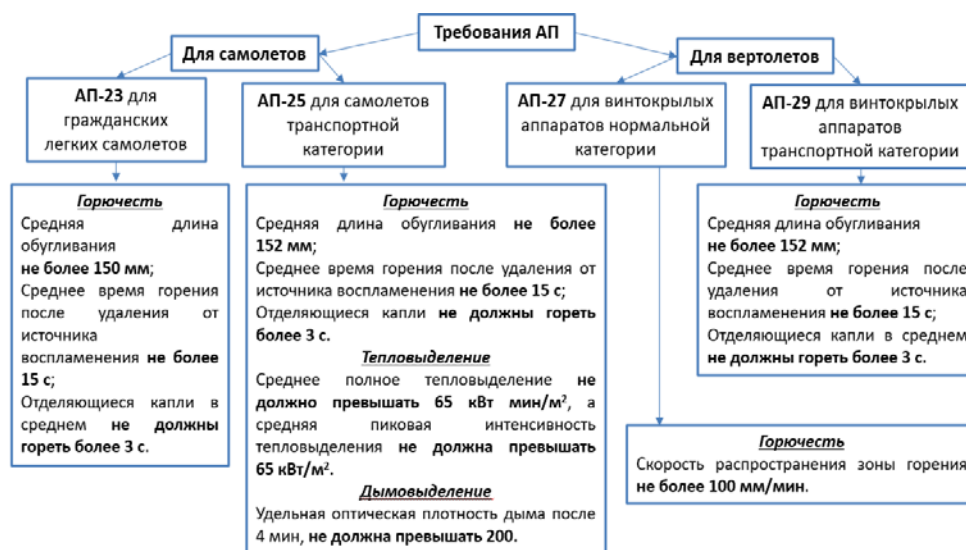


Рис. 3 – Требования к интерьерным материалам в конструкциях самолетов и вертолетной технике

Несмотря на широкую номенклатуру материалов, применяемых в интерьерах самолетов, в 2022 году по запросу предприятий-разработчиков вертолетной техники возникла необходимость разработки комплекса материалов на основе связующего эпоксидной природы с целью изготовления интерьерных панелей вертолетов транспортной категории. С учетом существующего перечня требований (рис 3), а также опыта предприятий отрасли были сформированы основные требования к разрабатываемому материалу (табл. 2).

Таблица 2

Требования к разрабатываемым материалам

Пожаробезопасность		Тип связующего
Горючесть	Дымообразование	
Соответствие требованиям АП-29	Соответствие требованиям АП-25	Расплавное эпоксидное

В данной работе представлены результаты исследования нового расплавного эпоксидного связующего и свойства полученных стеклопластиков и трехслойных сотовых панелей на его основе в части физико-механических характеристик и характеристик пожаробезопасности.

Материалы и методы

В качестве исследуемого материала используются стеклопластики и трехслойные сотовые панели на основе двух композиций расплавного эпоксидного связующего и стеклянной ткани Т-10-14. Данные материалы изготавливаются по препреговой технологии и перерабатываются прессовым методом.

Определение температуры стеклования проводили по ГОСТ Р 55135-2012 методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе Netzsch DSC 204 «Phoenix».

Определение массовой доли летучих веществ проводили по ГОСТ 22456-77.

Массовую долю связующего в стеклопластике определяли по ГОСТ Р 56682-2015.

Определение прочности и модуля упругости при растяжении проводили по ГОСТ Р 56785-2015 при температуре 23 °С.

Определение продолжительности остаточного горения и длины обугливания стеклопластиков и трехслойных сотовых конструкций проводили по ГОСТ 57924-2017 в камере горючести Noselab.

Определение удельной оптической плотности дыма проводили по ГОСТ 24632-1981 в дымовой камере Govmark.

Результаты и обсуждение

На первом этапе с учетом имеющихся требований были получены экспериментальные композиции расплавленного эпоксидного связующего. Были проведены исследования по определению температуры стеклования для определения верхнего предела рабочей температуры разрабатываемых стеклопластиков. Результаты исследования экспериментальных композиций расплавленного эпоксидного связующего приведены в таблице 3.

Таблица 3

Температура стеклования экспериментальных композиций связующего

Образцы	Композиция 1	Композиция 2
Температура стеклования, °С (ДСК)	117	125

Затем проводились исследования по определению предела прочности и модуля упругости при растяжении образцов стеклопластиков на основе экспериментальных композиций эпоксидного связующего. Результаты приведены в таблице 4.

Таблица 4

Свойства стеклопластиков

Наименование показателя	Композиция 1 + Т-10-14	Композиция 2 + Т-10-14	СТ-69Н
Содержание связующего, %	<u>26,4</u> 26,4–26,6	<u>30,1</u> 29,9–32,2	35±2
Предел прочности при растяжении по основе при 23 °С, МПа	<u>645</u> 628–656	<u>681</u> 584–719	629
Модуль упругости при растяжении, ГПа	<u>31</u> 30–32	<u>31,2</u> 30–32	–

По результатам определения предела прочности и модуля упругости можно установить, что образцы стеклопластиков на основе экспериментальных композиций связующего имеют повышенные более высокий предел прочности при растяжении по сравнению со стеклотекстолитом марки СТ-69Н.

На следующем этапе проводили исследования свойств пожаробезопасности полученных стеклопластиков. Результаты испытаний по определению горючести образцов стеклопластиков на основе экспериментальных композиций связующего приведены в таблице 5.

Таблица 5

Характеристики горючести стеклопластиков
на основе экспериментальных композиций связующего и ткани Т-10-14

Материал	Толщина образца, мм	Продолжи- тельность экспозиции пламени горелки, с	Продолжи- тельность остаточного горения (тления), с	Длина обуглива ния, мм	Продолжи- тельность горения капель, с	Класси- фикация
Требования АП	–	60	не более 15	не более 152	не более 3	Самозату- хающий
Композиция 1 + Т-10-14	1,9–2,0	60	<u>не более 9</u>	<u>не более</u> <u>53</u>	<u>нет</u>	<u>Самозату-</u> <u>хающий</u>
Композиция 2 + Т-10-14	1,9–2,0	60	<u>не более 11</u>	<u>не более</u> <u>65</u>	<u>нет</u>	<u>Самозату-</u> <u>хающий</u>

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод, что образцы экспериментальных стеклопластиков классифицируются как самозатухающие, так как продолжительность остаточного горения не превышает 15 с, длина обугливания не превышает 152 мм и отсутствует горение каплей. При этом также можно заметить, что образцы стеклопластика на основе композиции № 1 превосходят образцы на основе композиции № 2 по совокупности характеристик.

Результаты испытаний по определению характеристик при дымообразовании стеклопластиков на основе экспериментальных композиций связующего представлены в таблице 6.

Таблица 6

Характеристики дымообразования стеклопластиков
на основе экспериментальных композиций связующего и ткани Т-10-14

№ образца	Толщина образца, мм	Удельная оптическая плотность дыма D_4
Требования АП	–	не более 200
Композиция 1 + Т-10-14	1,9–2,0	<u>177</u> 158–196
Композиция 2 + Т-10-14	1,9–2,0	<u>170,4</u> 147–194

По результатам проведенных испытаний установлено, что средняя удельная оптическая плотность дыма составляет 177 для композиции 1 и 170 для композиции 2. Данные параметры соответствуют требованиям АП-25 в части дымообразования.

По результатам проведенных исследований образцов стеклопластиков на основе экспериментальных композиций связующего 1 и 2, основываясь на разбросе значений предела прочности при растяжении, а также на результатах определения горючести было принято решение для дальнейших исследований использовать состав композиции 1.

На заключительном этапе исследования были изготовлены трехслойные сотовые панели с использованием препрега на основе экспериментальной композиции связующего 1 и ткани Т-10-14, полимерного сотового заполнителя ПСП-1,25 (рис. 4) и проведены испытания на горючесть и дымообразование, результаты которых приведены в таблицах 7 и 8.



Рис. 4 – Трехслойные сотовые панели на основе экспериментальной композиции связующего

Таблица 7

Характеристики горючести трехслойных сотовых панелей на основе экспериментальной композиции связующего

№ образца	Толщина образца, мм	Продолжительность экспозиции пламени горелки, с	Продолжительность остаточного горения (тления), с	Длина обугливания, мм	Продолжительность горения капель, с	Классификация
Требования АП	-	60	не более 15	не более 152	не более 3	Самозатухающий
Образец без заделки торцов						
Композиция 1 + Т-10-14	15,69	60	<u>не более 15</u>	<u>не более 75</u>	нет	Самозатухающий
Образец с заделкой торцов сферопластиком						
Композиция 1 + Т-10-14	15,46	60	<u>не более 6</u>	<u>Не более 98</u>	нет	Самозатухающий

Характеристики дымообразования трехслойных сотовых панелей
на основе экспериментальной композиции связующего

Материал	Толщина образца, мм	Режим испытания	Удельная оптическая плотность дыма,
			D ₄
Требования АП	–	–	не более 200
Образец без заделки торцов			
Композиция 1 + Т-10-14	15,69	Горение	$\frac{162}{141-183}$
		Пиролиз (тление)	141
Образец с заделкой торцов сферопластиком			
Композиция 1 + Т-10-14	15,46	Горение	$\frac{364,5}{364-365}$
		Пиролиз (тление)	169

В части горючести, трехслойные сотовые панели на основе композиции 1 соответствуют требованиям АП-25 как с заделанными торцами, так и без заделки торцов, полученные ТСП классифицируются как самозатухающие. В части дымообразования, ТСП без заделки торцов имеют удельную оптическую плотность дыма не более 200: при горении – 162 и при пиролизе – 141. Образцы с заделанными торцами при пиролизе соответствуют требованиям АП-25, их удельная оптическая плотность дыма при пиролизе – 169. При горении удельная оптическая плотность дыма составляет 365, что является несоответствием требованиям АП-25. Однако стоит отметить, что на практике ТСП с заделанными торцами при испытаниях на определение характеристик пожаробезопасности не применяются. Данные испытания ТСП с заделанными торцами проведены с целью определения максимальных показателей по дымообразованию и получения сравнительных характеристик.

Заключение

По результатам проведенных работ получены стеклопластики и ТСП на основе композиций расплавного эпоксидного связующего, а также определены механические характеристики и характеристики пожаробезопасности новых материалов, в части горения и дымообразования. Установлено, что стеклопластики на основе экспериментальных композиций эпоксидного связующего 1 и 2 удовлетворяют требованиям АП в части горючести и могут быть рекомендованы к применению в интерьерных конструкциях вертолетной техники. Экспериментальные образцы стеклопластиков имеют механические характеристики выше, чем у ранее разработанных стеклопластиков на основе эпоксидного растворного связующего ЭДТ-69Н. Были получены и испытаны ТСП с заделанными торцами и без заделки на основе композиции 1 для определения продолжительности остаточного горения, длины обугливания и удельной оптической плотности дыма. Все материалы удовлетворяют требования АП-29 по горючести, материалы классифицируются как самозатухающие. В части дымообразования, ТСП без заделки торцов удовлетворяют требованиям АП-25. По результатам проведенных исследований экспериментальных образцов стеклопластиков можно установить, что материалы соответствуют предъявляемым требованиям и могут рассматриваться в интерьерных панелях вертолетной техники.

Литература

1. Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: материалы II Всероссийской нацнотехнической конференции (г. Москва, 30 нояб. 2017 г.), / ФГУП «ВИАМ». М.: ВИАМ, 2017. 295 с.

2. Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники: материалы V Всероссийской научно-технической конференции (г. Москва, 19 июля 2021 г.) / ФГУП «ВИАМ». М.: ВИАМ, 2021. 315 с.

3. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. К вопросу производства панелей пола из ПКМ для летательных аппаратов (обзорная статья) // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. № 4-2.

4. Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валуева М.И., Барботько С.Л. Пожаробезопасность высокотемпературных углепластиков авиационного назначения (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). URL: <http://www.viam-works.ru>.

5. Курносков А.О., Соколов И.И., Мельников Д.А., Топунова Т.Э. Пожаробезопасные стеклопластики для интерьера пассажирских самолетов (обзор) // Труды ВИАМ. 2015. № 11. URL: <http://www.viam-works.ru>.

6. Серкова Е.А., Застрогина О.Б., Барботько С.Л. Исследование возможности использования новых экологически безопасных фосфорорганических антипиренов в составе связующих для пожаробезопасных материалов интерьера // Труды ВИАМ. 2019. № 2 (74). URL: <http://www.viam-works.ru>.

7. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ. 2021. № 9 (103). URL: <http://www.viam-works.ru>.

8. Стрельников С.В., Петухов В.И., Постнов В.И., Швец Н.И. Новые решения в технологии изготовления препрегов для панелей интерьера // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. № 4-2.

УДК 678.067.7

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПОДГОТОВКИ
ПОВЕРХНОСТИ ПОД СКЛЕИВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПРОЧНОСТИ КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Е.В. Земцова¹; А.И. Алямовский¹;

Н.И. Копыл¹; М.Л. Обьедков¹

В.А. Тарасов², В.А. Романенков²

**RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH INTO EFFECTS OF
VARIOUS PREPARATION TECHNIQUES FOR SURFACES OF
LARGE-SCALE CARBON FIBER STRUCTURES ON ADHESIVE
BOND STRENGTH**

Zemtsova E.V., Alyamovskiy A.I., Kopyl N.I., Obiedkov M.L. Tarasov V.A.,
Romanenkov V.A.

post@rsce.ru

¹*ПАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королева»
(РКК «Энергия») ул. Ленина, 4А, г. Королев, Московская область, Россия,
141070*

¹*S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (RSC Energia) 4A Lenin
Street, Korolev, Moscow region, 141070, Russia*

²*МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ул. Бауманская, 5, стр.4, Москва
BMSTU, Bayman Street,5,str 4, Moscow*

Аннотация

В настоящем докладе рассмотрено влияние различных способов подготовки поверхности углепластиков под склеивание на прочностные характеристики клеевых соединений, представлены требования к «жертвенным» слоям, показаны различные материалы «жертвенных» слоев, проведена сравнительная оценка усилия (лёгкости отслаивания) их удаления, наличия остатков углеродного наполнителя на «жертвенном слое», а также наличия на углепластике остатков «жертвенного слоя». Приведены результаты экспериментальной отработки способов подготовки поверхности углепластиков под склеивание, проведен анализ характера разрушения клеевых соединений и представлены результаты экспериментального определения характеристик прочности клеевых соединений, с различными способами подготовки поверхностей склеиваемых образцов.

Ключевые слова:

углепластики, «жертвенный» слой, способ подготовки поверхности, легкость отслаивания, клеевые соединения, сотовый наполнитель и характеристики прочности клеевых соединений при сдвиге и равномерном отрыве

Abstract

In this article, the influence of various methods of the surface treatment of carbon fiber plastics on the strength characteristics of adhesive joints is considered, the requirements for sacrificial layers are presented, various materials of sacrificial layers are shown, a comparative assessment of the effort (ease of peeling) of their removal, the presence of carbon filler residues on the sacrificial layers, as the presence of sacrificial layer residues on carbon fiber is carried out. The result of experimental processing of method for treatment of the surface of carbon fiber plastics for bonding are presented, the nature of the

destruction of the adhesive joint is analyzed and the strength characteristics of adhesive joints with various methods of treatment the surfaces of the materials to be glued are determined.

Keywords:

carbon fiber, sacrificial layer, surface treatment method, ease of peeling, adhesive joints, honeycomb core and strength characteristics of adhesive joints during shear and uniform separation

Введение

Начиная с середины 70-х годов прошлого века в ПАО «РКК «Энергия» (ранее НПО «Энергия») проводились работы по созданию МТКС «Энергия-Буран» в состав которой входила РН сверхтяжёлого класса грузоподъёмностью 100 тонн «Энергия» [1]. 15 мая 2022года исполнилось 35 лет со дня первого запуска РН «Энергия». РН «Энергия» состояла из центрального блока и четырёх разгонных блоков «А». Блоки «А» были многоразовыми (до 10 пусков) поэтому они имели двигатели управления мягкой посадки (ДУМП) и посадочные устройства (ПУ). ПУ и ДУМП в процессе полёта блоков «А» были защищены обтекателями, створки которых открывались в процессе спуска блоков на парашютах перед приземлением. Конструктивно створки обтекателей были выполнены в виде трёхслойных сотовых конструкций (ТСК) состоящих из двух несущих слоёв (НС) листового полимерного композиционного материала (ПКМ) углепластика марки «Слокарбон-10КП» [2], между которыми располагался сотовый наполнитель (СЗ) из алюминиевой фольги АМг-2Н толщиной 0,03 мм с размером ячейки 2,5 мм [3]. НС с СЗ были склеены плёночным клеем ВК-36 [4].

На внешнюю поверхность створок обтекателей было нанесено на клею К-300-61 [5] теплозащитное покрытие (ТЗП), а на внутреннюю теплоизоляционный материал (ТИМ) на клею Эластосил 137-175М [6].

Общая площадь створок обтекателей на четырёх блоках «А» была равна 324 м², а суммарная площадь поверхностей, подлежащих склеиванию составляла 1296 м², в том числе НС с СЗ 648 м², ТСК с ТЗП и ТИМ по 324 м² соответственно. Идеальной можно считать такую подготовку поверхности, при которой при механических испытаниях наблюдается когезионное (по клею) разрушение клеевых соединений.

Способ подготовки поверхности зависит от природы склеиваемых материалов, конструктивных особенностей склеиваемых деталей, условий эксплуатации и типа используемого клея.

Для подготовки поверхности ПКМ, в частности углепластика, перед склеиванием используется абразивная обработка поверхности механическим путем (зашкуривание, зачистка, пескоструйная обработка и т. п.) с предварительной и последующей протиркой салфеткой, смоченной растворителем, например, ацетоном [7, 8].

Механическая обработка поверхности перед склеиванием имеет свои недостатки: во-первых, она рекомендуется для небольших поверхностей или в тех случаях, когда число склеиваемых деталей невелико, во-вторых, она создает повышенную запыленность помещения и требует удаления пыли при зачистке, в-третьих, при такой подготовке нарушается целостность верхних слоев наполнителя, что может привести к снижению механических характеристик склеиваемых деталей.

Для подготовки ПКМ на основе углеродных волокон также могут быть использованы поверхностные защитные удаляемые слои («жертвенные слои»), которые удаляются непосредственно перед нанесением клеевой композиции. Известны попытки использовать в качестве «жертвенных слоев» стеклотканей различных марок и другие ткани, например, нейлоновые, лавсановые, дакрановые [9, 10].

При оценке свойств материала, используемого в качестве удаляемого защитного «жертвенного слоя», исходили из следующих требований:

- 1) «жертвенный слой» должен легко удаляться с поверхности конструкционного материала;
- 2) отличаться по внешнему виду, например, цвету, от цвета склеиваемых материалов;
- 3) не загрязнять поверхности материалов подлежащих склеиванию;
- 4) создавать на склеиваемой поверхности требуемую шероховатость после удаления «жертвенного слоя»;
- 5) иметь низкую стоимость;
- 6) выдерживать технологическую температуру формования ПКМ без изменения своих исходных свойств.

В работе [11] приведены результаты экспериментальных исследований по выбору материала «жертвенного слоя» для создания шероховатости на поверхности высокопрочного углепластика, имеющего модуль упругости и температуру эксплуатации до 150°C.

Прессование углепластика проводили по следующему режиму:

- выдержка 1 час при давлении 1,4 кгс/см² и температуре (121±5) °С,
- выдержка 2 часа при давлении 6 кгс/см² и температуре (177±5) °С.

В качестве «жертвенных слоёв» при проведении экспериментальных исследований были использованы различные тканые материалы с антиадгезионными покрытиями, приведенные в таблице 1.

Для определения характеристики прочности при сдвиге клеевых соединений с различными способами подготовки поверхности испытывали на растяжение образцы с одинарным нахлестом.

Склеивание образцов проводили модифицированным эпоксидным клеем с выдержкой при температуре (177±5) °С и давлении 3,5 кгс/см² в течение 60±30 мин.

Без покрытия в качестве материала «жертвенных» слоев использовались нейлоновые ткани: 5833, 5062, 5014, 506 а, в, с, 4091 RF, SM-49 и

дакроновые ткани (полиэфирное волокно): 15199, 15004/I, 15090/I, 15205/4, 15223.

Таблица 1

Материалы «жертвенных» слоев

Материал «жертвенного слоя»	Антиадгезионное покрытие, нанесённое на тканый материал
Стеклоткани: I B 301F 5I I B 301F 54 I B 301F 56 I B 301F 58	Поливиниловый спирт Силиконовый каучук Фторопласт Силиконовый каучук, нанесенный из суспензии
Стеклоткань	Фторопласт (тефлон), марки Т-83-54
Стеклоткань	Связующее марки 181
Стеклоткань	Аппрет Гаран, марки, марки 128

При отслоении «жертвенных слоёв» проводилась сравнительная оценка: усилия их удаления, наличия остатков углеродного наполнителя на «жертвенном слое», а также наличия на углепластике остатков «жертвенного слоя» (табл. 2).

Таблица 2

Влияние типа «жертвенного слоя» на легкость отслаивания и на наличие углеродного наполнителя на отслоенном «жертвенном слое» и наличие остатков материала «жертвенного слоя» на углепластике

Марка материала «жертвенного слоя»	Легкость отслаивания	Наличие углеродного наполнителя на отслоённом «жертвенном слое»	Наличие остатков материала «жертвенного слоя» на углепластике
Нейлон марки 5833 5062 5014 506 а, 506 в, 506 с 403I	Хорошая Хорошая Хорошая Хорошая Удовлетв. Хорошая Плохая	Минимальное Минимальное Минимальное Минимальное Минимальное Минимальное Значительное	Минимальное Минимальное Минимальное Умеренное Минимальное Умеренное Значительное
Стеклоткань марки: I B 301F 5I I B 301F 54 I B 301F 56 I B 301F 58	Плохая Хорошая Удовлет. Хорошая	Умеренное Минимальное Минимальное Минимальное	Значительное Умеренное Минимальное Минимальное

Марка материала «жертвенного слоя»	Легкость отслаивания	Наличие углеродного наполнителя на отслоённом «жертвенном слое»	Наличие остатков материала «жертвенного слоя» на углепластике
Стеклосототкань, покрытая фторопластом (тефлон), марки Т-83-54	Хорошая	Минимальное	Минимальное
Дакрон (полиэфирное волокно) марки: 15199 15004/1 15090/1 15205/4 15223	Удовлет. Хорошая Хорошая Удовлет. Плохая	Минимальное – – – Умеренное	Минимальное – – Умеренное Минимальное

В итоге комплексной оценки установлено, что для использования в качестве «жертвенного слоя» подходят нейлоновые ткани марок 5062,5833 и стеклоткань I В 30IF 58.

Результаты экспериментальной отработки способов подготовки поверхности углепластиков под склеивание

На первом этапе экспериментальной отработки в качестве «жертвенного слоя» проверялись лавсановая ткань марки 56207, стеклоткани Т-10, ЭЗ-100, ЭЗ-60. На стеклоткани перед их использованием в качестве «жертвенного слоя» предварительно наносили антиадгезионную смазку марки К-21. Также экспериментально проверяли возможность получения на поверхности углепластика регулярной шероховатости при помощи мелкой металлической сетки, уложенной на пакет заготовки из углеродного препрега через тонкую антиадгезионную фторопластовую плёнку марки Ф-4КО.

В результате проведенных исследований установлено:

– текстура ткани «жертвенного слоя» после его удаления четко отпечатывается на поверхности углепластика;

- «жертвенные слои» из тонких тканей при отслаивании легко рвутся и удалять их с поверхности углепластика довольно сложно;
- значение характеристик прочности при сдвиге клеевых соединений углепластика при подготовке поверхности заготовок образцов с использованием «жертвенного слоя» не ниже значений полученных на образцах, подготовленных традиционным способом (зашкуриванием и протиркой поверхности углепластика салфеткой смоченной в ацетоне), а в отдельных случаях они выше;
- «жертвенный слой» позволяет также защитить поверхность углепластика от повреждений при механической обработке и загрязнениях трудноудаляемыми продуктами (маслами, герметиками и т. п.) в процессе предварительных технологических операций;
- лавсановую ткань можно использовать в качестве «жертвенного слоя» 2–3 раза;
- лавсановые ткани обладают недостаточно высокой термостойкостью (до 150 °С), что исключает возможность их применения в качестве «жертвенных слоёв» при изготовлении деталей из углепластиков, формуемых при более высоких температурах.

Попытка получить равномерно шероховатую поверхность ПКМ путем тиснения металлической сеткой через слой разделительной антиадгезионной фторопластовой пленки привела к тому, что тисненая поверхность выглядела как совокупность глянцевых микронеровностей. Характеристика прочности при сдвиге клеевого соединения с такой подготовкой поверхности была существенно ниже, чем при зашкуривании и использовании «жертвенного слоя». Характер разрушения был в основном адгезионный по склеиваемому углепластику.

На втором этапе экспериментальной отработки проверяли следующие тканые материалы:

- 1) ткань стеклянная КТ-11, обработанная 10 % раствором антиадгезионной смазки К-21 в бензине;
- 2) ткань стеклянная Э2-62, обработанная 10 % раствором смазки К-21 в бензине;
- 3) полиформальдегидная ткань;
- 4) ткань стеклянная КТ-11 без обработки;
- 5) ткань стеклянная Т-10-80 без обработки;
- 6) ткань стеклянная КТ-11, пропитанная кремнийорганическим лаком КМ-9К.

Первоначально ткани рассматривались с точки зрения легкости отслаивания и визуального определения качества получаемой поверхности (табл. 3).

Таблица 3

Влияние типа «жертвенного слоя» на легкость отслаивания и качество поверхности

Используемая ткань в качестве «жертвенного слоя»	Легкость отслаивания	Качество поверхности
КТ-11+К-21	С трудом	Хорошее
Э2-62+К-21	–	Хорошее
полиформальдегидная	–	Плохое
КТ-11	–	Хорошее, но с остатком стекловолокон
Т-10-80	–	-
КТ-11+КМ-9К	Легко	Хорошее

В результате проведенных испытаний установлено, что:

- наилучшая легкость отслаивания и качественная поверхность получены при использовании в качестве «жертвенного слоя» ткани КТ-11, пропитанной раствором кремнийорганического лака КМ-9К;
- обработка «жертвенного слоя» 10 % раствором смазки К-21 в бензине практически не оказывает влияния на легкость его отслаивания от поверхности углепластика;

– при приложении отслаивающей нагрузки по диагонали к поверхности квадратной пластины из углепластика «жертвенный слой» отдирается намного легче, чем вдоль или поперек волокон наполнителя;

– также установлено, что «жертвенные слои» из ткани стеклянной КТ-11, пропитанной раствором лаком КМ-9К, могут использоваться несколько раз.

Лак КМ-9К, используемый для пропитки «жертвенного слоя», представляет собой 50–55 % раствор кремнийорганической смолы КМ-9К в этиловом спирте. Смола КМ-9К – это метилполисилоксановый полимер, полученный гидролизом смеси метилхлорсилана и диметилдихлорсилана с последующей конденсацией. Достоинством этого вещества являются нетоксичность, негорючесть, невзрывоопасность, химическая инертность, устойчивость к термической и термоокислительной деструкции, устойчивость к действию кислот и щелочей.

Учитывая эти свойства кремнийорганического лака, а также результаты экспериментов, было решено использовать этот лак для пропитки тканей, используемых в качестве «жертвенного слоя».

Оценку влияния различных способов подготовки поверхности углепластика на характеристику прочности клеевого соединения при сдвиге [12], проводили на образцах из углепластика Слокарбон-10КП, склеенных клеем К-300-61 (табл. 4).

Проведенный микроструктурный анализ образцов углепластика с тисненной поверхностью показал, что при тиснении изменяется структура крайнего монослоя углепластика, внутренние слои остаются без изменений.

Таблица 4

Зависимость прочности клеевого соединения
при сдвиге от способа подготовки поверхности

Способ подготовки поверхности	b, мм	L, мм	F, см ²	P, кгс	τ, кгс/см ²	τ _{ср} , кгс/см ²
-------------------------------	-------	-------	--------------------	--------	------------------------	---------------------------------------

Зачистка шлифовальной шкуркой средней зернистости и протирка бензином	20,0	18,1	3,62	330	91,2	90,1
	19,7	17,1	3,37	313	92,9	
	19,6	17,9	3,51	303	86,3	
Обезжиривание бензином	20,1	19,5	3,92	376	95,9	92,9
	19,6	19,5	3,82	300	78,5	
	20,5	16,6	3,40	355	104,4	
Стеклоткань КТ-11 пропитанная раствором смолы КМ-9К	18,8	17,6	3,31	262	79,2	94,7
	20,4	18,0	3,67	385	104,9	
	19,3	18,1	3,49	345	98,9	
	20,5	18,1	3,71	355	75,7	
Неподготовленная поверхность	19,0	17,7	3,36	206	61,3	
b, мм – ширина клеевого соединения, L, мм – длина клеевого соединения, F, см ² – площадь клеевого соединения, F, см ² – площадь клеевого соединения, P, кг – разрушающая нагрузка, τ , кгс/см ² – предел прочности клеевого соединения при сдвиге, τ_{cp} , кгс/см ² – среднее арифметическое значение характеристики прочности клеевого соединения при сдвиге, τ_{cp} , кгс/см ² – среднее арифметическое значение характеристики прочности клеевого соединения при сдвиге.						

С целью определения влияния тиснения поверхности углепластика Слокарбон-10КП со схемой армирования C/90⁰/0⁰/30⁰/150⁰/0⁰/0⁰/150⁰/30⁰/0⁰/90⁰/C на его механические характеристики прочности при растяжении [13], и сжатии [14], были проведены механические испытания, результаты которых приведены в таблице 5.

Таблица 5

Характеристики прочности при растяжении и сжатии углепластика Слокарбон 10КП с исходной поверхностью и поверхностью подготовленной под склеивание тиснением «жертвенным слоем»

Характеристика прочности	Исходная поверхность	Поверхность с тиснением	Изменение характеристики прочности после тиснения, %
Предел прочности при растяжении вдоль монослоя 90 ⁰ , кгс/мм ²	30,7	29,6	-4
Предел прочности при растяжении вдоль монослоя 0 ⁰ , кгс/мм ²	34,8	37,2	+7
Предел прочности при сжатии вдоль монослоя 90 ⁰ , кгс/мм ²	23,0	21,9	-5
Предел прочности при сжатии вдоль монослоя 0 ⁰ , кгс/мм ²	40,0	39,4	-2
Примечание: в таблице приведены средние арифметические значения результатов испытаний 5 образцов.			

Как видно из результатов испытаний, приведенных в таблице 5, тиснение поверхности углепластика «жертвенным слоем» влияет на его прочностные характеристики незначительно.

Выбранный «жертвенный слой» на основе ткани КТ-11, пропитанной лаком КМ-9К, создал довольно грубое тиснение поверхности пластика, что в отдельных случаях затрудняло растекание клея (смачиваемость поверхности).

В связи с этим возникла задача подбора других видов тканей, дающих более мелкий и плотный рисунок тисненой поверхности, и в то же время удаляющихся без особого труда.

С этой целью были опробованы следующие ткани: Э1-100, Э3-100, ТК-3, а также для сравнения лавсановые ткани полотняного и саржевого плетения.

В конце 90-х годов лавсановая ткань применялась в качестве «жертвенного слоя» для тиснения поверхностей в процессе формования листовых заготовок из углепластика марки КМУ-4К (схема армирования $0^{\circ}/90^{\circ}$) с эффектом памяти цилиндрической формы, используемых при изготовлении секций телескопических грузовых стрел, которые до настоящего времени эксплуатируются на МКС.

Ткани Э1-100, Э3-100, ТК-3 были предварительно пропитаны лаком КМ-9К и в качестве «жертвенного слоя» прошли полный режим отверждения углепластика Слокарбон-10КП.

Лавсановые ткани удалялись с поверхности углепластика Слокарбон 10КП перед его финишной термообработкой при температуре 205 °С.

Образцы клеевых соединений для определения характеристик прочности при сдвиге с различной подготовкой поверхности изготавливали из листового углепластика Слокарбон-10КПП, армированного по схеме $C/0^{\circ}/45^{\circ}/135^{\circ}/135^{\circ}/45^{\circ}/0^{\circ}/C$ без тиснения поверхности и с тиснением поверхности различными тканями. В таблицах 6 и 7 приведены результаты механических испытаний образцов клеевых соединений на сдвиг, склеенных клеями Эластосил-135-175М и К-300-61.

Таблица 6

Характеристики прочности образцов клеевых соединений при сдвиге (клей - Эластосил-135-175М) с различной подготовкой поверхности под склеивание

Способ подготовки поверхности	b, мм	L, мм	F _{скл} , см ²	P, кгс	τ, кгс/см ²	τ _{ср} , кгс/см ²
Зашкуривание	18,2	18,2	3,31	25	7,6	6,7
	19,2	20,2	3,88	20,7	5,3	
	18,3	19,6	3,58	26	7,3	
	18,0	18,1	3,26	24,5	7,5	
	18,2	16,7	3,04	17,2	5,7	
Обезжиривание	18,2	21,4	3,89	22	5,7	4,1
	18,1	17,0	3,08	10,5	3,4	
	19,5	19,1	3,72	11,5	3,1	
ТК-3+КМ-9К	17,8	16,4	2,92	15	5,1	5,1
	17,8	17,5	3,12	18,8	6,0	
	17,5	16,4	2,87	17,5	6,1	
	16,1	18,6	2,99	10,0	3,3	
ЭЗ-100+КМ-9К	19,0	16,5	3,14	34,0	10,8	10,0
	19,0	17,7	3,36	39,5	11,8	
	18,8	18,0	3,38	28,0	8,3	
	18,3	17,4	3,18	32,0	10,1	
	19,6	18,4	3,61	32,5	9,0	
Лавсан полотняный	19,3	19,2	3,71	21,8	5,9	5,6
	17,2	20,3	3,89	16,0	4,6	
	17,4	17,7	3,08	18,0	5,8	
	17,9	16,6	2,97	18,2	6,1	
Лавсан саржевый (по основе)	18,8	18,3	3,44	19,0	5,5	6,0
	19,1	17,9	3,42	20,6	6,0	
	18,8	17,3	3,25	21,0	6,5	
Лавсан саржевый (по утку)	18,2	20,9	3,80	23,2	6,1	5,9
	17,9	19,6	3,51	21,5	6,1	
	18,6	21,5	4,0	23,4	5,9	
	18,4	16,9	3,11	16,8	5,4	

Таблица 7

Характеристики прочности образцов клеевых соединений при сдвиге (клей- К-300-61) с различной подготовкой поверхности под склеивание

Способ подготовки поверхности	b, мм	L, мм	F _{скл} , см ²	P, кгс	τ, кгс/см ²	τ _{ср} , кгс/см ²
ТК-3+КМ-9К	19,5	16,6	3,24	355	103,4	124,6

	19,0	16,4	3,12	442	141,7	
	18,5	17,5	3,24	325	100,3	
	18,6	18,1	3,37	462	137,1	
	18,6	16,0	2,98	418	140,3	
Э1-100+КМ-9К	19,0	16,2	3,08	465	151,0	121,6
	18,8	16,6	3,12	330	105,8	
	18,9	16,8	3,18	348	109,4	
	18,6	16,4	3,05	322	105,6	
	19,0	15,9	3,02	412	136,4	
Э3-100+КМ-9К	19,2	19,4	3,72	504	135,5	127,5
	19,1	20,0	3,82	460	120,4	
	19,4	19,3	3,74	475	127,0	
	19,2	14,5	2,78	358	128,8	
	18,5	18,6	3,44	433	125,9	
Лавсан саржевый (по утку)	17,5	18,2	3,19	325	101,9	86,3
	18,4	19,0	3,5	308	88,0	
	17,2	22,5	3,87	267	69,0	
Зашкуривание	18,8	20,6	3,87	317	81,9	79,6
	17,5	24,2	4,24	271	63,9	
	19,1	17,8	3,40	281	82,6	
	18,1	20,5	3,71	333	89,8	
Неподготовленная поверхность	18,0	20,0	3,60	306	85,0	65,6
	17,8	17,6	3,13	56	17,9	
	19,6	23,5	4,61	268	58,1	
	17,4	16,4	2,85	289	101,4	

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Проведенная работа показала эффективность подготовки поверхности углепластиков под склеивание с помощью удаляемого «жертвенного слоя».

2. Наилучшие результаты были получены при использовании в качестве «жертвенного слоя» стеклоткани, предварительно пропитанной кремнийорганическим лаком. Такой «жертвенный слой» позволяет использовать его при формовании ПКМ с высокотемпературным режимом отверждения. При удалении «жертвенного слоя» образуется качественная равномерная шероховатая поверхность, не требующая перед склеиванием дополнительной обработки.

3. Наформованный на поверхность углепластика удаляемый «жертвенный слой» предохраняет материал от механических повреждений в процессе проведения работ перед склеиванием.

4. Тиснение поверхности ПКМ «жертвенным слоем» практически не влияет на характеристики прочности при сжатии и растяжении листового углепластика используемого для изготовления НС трёхслойных сотовых конструкций.

5. Тиснение поверхности ПКМ эффективно в случае применения более жесткого клея и менее эффективно при склеивании эластичным клеем.

Были также проведены предварительные оценочные исследования влияния тиснения поверхности «жертвенным слоем» листового углепластика на основе углеродной ленты ЛУП-0,1 и связующего ЭТФ, используемого в качестве НС ТСК, на характеристики прочности клеевого соединения (плёночный клей ВК-36) при его равномерном отрыве от СЗ из алюминиевой фольги АМГ-2Н толщиной 0,03 мм с размером ячейки 2,5 мм.

Тиснение углепластика в процессе его формования проводили «жертвенным слоем» из ткани стеклянной ЭЗ-100 предварительно пропитанной раствором смолы элементоорганической КО-3 (удаление «жертвенного слоя» проводили не ранее чем за два часа до склеивания).

Испытания на равномерный отрыв [15] проводили на пяти образцах каждого вида.

Среднеарифметические значения характеристик прочности клеевых соединений НС с СЗ при равномерном отрыве представлены в таблице 8.

Таблица 8

Влияние способа подготовки НС на характеристики прочности при равномерном отрыве от СЗ

Способы подготовки	Среднеарифметическое значение	Преимущественный характер
--------------------	-------------------------------	---------------------------

поверхности под склеивание	характеристики прочности клеевого соединения НС с СЗ при равномерном отрыве, кгс/см ²	разрушения образцов
Обработка шлифовальной шкуркой	43,8	Расслоение углепластикового НС
Протирка хлопчатобумажной салфеткой смоченной в ацетоне	42,5	Комбинированное: частичное расслоение углепластикового НС, отслоение ткани стеклянной Э2-62 и разрушение СЗ
Тиснение «жертвенным слоем»	36,4	Комбинированное аналогичное выше указанному
Протирка сухой хлопчатобумажной салфеткой	40,5	Расслоение углепластикового НС с отслоением ткани стеклянной Э2-62 с углеродным волокном

На основании полученных результатов испытаний можно сделать следующие выводы:

- 1) когезионная характеристика прочности углепластика КМУ-1Л в большинстве случаев ниже адгезионной характеристики прочности клеевого соединения выполненного плёночным клеем ВК-36;
- 2) наименьшая характеристика прочности 36,4 кгс/см² клеевого соединения НС с СЗ при равномерном отрыве получена при подготовке поверхности первого тиснением удаляемым «жертвенным слоем», что может быть следствием не полного контакта (точечного) торцов ячеек СЗ с поверхностью НС которая после отслоения «жертвенного слоя» имеет регулярную макро шероховатость;
- 3) наиболее высокие характеристики прочности 43,8 кгс/см² и 42,5 кгс/см² клеевых соединений НС с СЗ получены при подготовке НС первым и вторым способами соответственно.

Исходя из этого для подготовки НС под склеивание с СЗ, при изготовлении крупногабаритных ТСК, целесообразно применять второй способ, протирка поверхности НС хлопчатобумажной салфеткой обильно смоченной ацетоном, как менее трудоемкий.

В настоящее время появилось много вспомогательных материалов, которые могут быть использованы в качестве «жертвенных слоёв» после их опробования.

Кроме этого необходимо исследовать различные способы подготовки НС ТСК под склеивание с СЗ из различных материалов (стеклоткани, полимерной бумаги, углепластика) и с разными размерами ячеек.

Литература

1. Филин В.М. «Орбиты жизни». – Шацк: ООО «Шацкая типография», 2013. 530 с.
2. ТУ 6-19-181-145-86 «Углепластик листовой слокарбон-10КП», 21 с.
3. ОСТ 1.00728 или ОСТ 1.00729 «Заполнители сотовые клееные. Технические условия», 1975. 14 с.
4. Технические условия ТУ 1-596-389-96 «Пленки клеевые», ОНПП «Технология».
5. Клей термостойкий холодного отверждения К-300-61 33У.0342.013, 1975. 14 с.
6. ТУ 6-02-1319-85 Клей-герметик кремнийорганический «Эласил 137-175 М», 1986. 18 с.
7. ОСТ 92-0949-2013 Клеи. Типовые технологические процессы склеивания материалов, 2013. 132 с.
8. Кардашов А.А. «Конструкционные клеи», М: «Химия», 1980. 288 с.
9. Ч. Кейгл «Клеевые соединения», Издательство «Мир», Москва, 1971. 296 с.
10. G. Lubin «Handbook of Composites» Van Nostrenb Peinhold, 1982, ISBN0-442-24897-0.
11. «Технология изготовления клееных конструкций» под ред. М. Боднара, М: «Мир», 1975. 445 с.

12. ОСТ 92-1477-78 Пластмассы теплозащитного и конструкционного назначения. Метод испытаний клеевых соединений на сдвиг, Стандартиформ, 1978. 46 с.

13. ГОСТ 25.601-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженных температурах, СПб, Стандартиформ, 2005. 14 с.

14. ГОСТ 25.602-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной и пониженной температурах. Москва, Изд. Стандартов, 1980. 18 с.

15. ОСТ 190069-72 Клеи. Метод определения прочности при отрыве клеевого соединения сотового заполнителя с обшивкой. Москва, ВИАМ, 1979. 9 с.

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ТРЕХСЛОЙНЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОВЫШЕННОЙ
УДАРОСТОЙКОСТЬЮ И ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ**

П.Г. Бабаевский¹, д.т.н.; А.Ю. Синицын²; А.В. Гайворонский²;
В.А. Шогенов²; А.А. Ширко²; С.В. Кузнецов²; А.Н. Корнейчук²

**IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF HONEYCOMB SANDWICH
STRUCTURES WITH INCREASED IMPACT RESISTANCE AND
RESIDUAL STRENGTH MANUFACTURING**

P.G. Babaevsky¹, D.Sc. in Engineering; A. Yu. Sinitsyn²; A.V. Gaivoronsky²;
V.A. Shogenov²; A.A. Shirko²; S.V. Kuznetsov²; A.N. Korneichuk²

artarea-web@yandex.ru

¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*

¹ *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

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

² *«JSE «Technologiya» named after A.G. Romashin», Obninsk, Kaluga Region, Russia*

Аннотация

Предложена усовершенствованная схема заправки и регулирования натяжении прошивочной нити, а также фиксации слоев ткани при прошивке на промышленной швейной машине с заданным типом прошивочной нити и стежков. Проведена оценка влияния плотности

прошивки по усовершенствованной технологии на изменение деформационно-прочностных свойств при изгибе обшивок с учетом направления укладки ткани и строчек прошивки, а также определены деформационно-прочностные свойства при продольном сжатии без и после удара и размеры зоны повреждения при ударе с различной энергией образцов ТСК с прошитыми и не прошитыми обшивками из УКМ.

Установлено, что стандартные модуль упругости и прочность при изгибе прошитых обшивок по усовершенствованной технологии, как и при продольном сжатии ТСК на их основе, снижаются, причем более резко – при приложении нагрузки перпендикулярно основе ткани и строчкам прошивки. При этом площадь повреждения образцов ТСК в составе с прошитыми обшивками в среднем на 40–45 % меньше, чем образцов без прошивки, а предел прочности при продольном сжатии после удара образцов ТСК с прошитыми обшивками в 1,5–2 раза больше, чем с непрошитыми при сохранении жесткости ТСК на одном уровне.

Ключевые слова:

трехслойные сотовые конструкции, слоистые УКМ, тонкослойные обшивки, деформационно-прочностные свойства, остаточная прочность и жесткость после удара

Abstract

An improved technology of threading and regulation of stitching thread tension as well as binding of fabric layers when stitching with a given type of stitching thread and stitches on an industrial sewing machine is proposed. The impact of density of stitching by the improved technology on stress-strain properties change in bending of skin with regard to the orientation of fabric laying and stitches has been evaluated, as also stress-strain properties at longitudinal compression without and after impact and the extent of damage area on impact with different energy of honeycomb sandwich structure samples with stitched and non-stitched skin made of carbon-fibre reinforced composite material have been determined.

It has been established that standard modulus of elasticity and flexural strength of skins stitched by the improved technology, as well as of honeycomb sandwich structures on their basis under longitudinal compression, decrease, and more sharply under the load applied perpendicular to the fabric warp and stitches. At that, the area of damage of honeycomb sandwich structure samples in combination with stitched skins is on average by 40-45 % less than of samples without stitching, and longitudinal compression-after-impact strength of honeycomb sandwich structure samples with stitched skins is 1,5-2 times more than with non-stitched ones at keeping the stiffness of samples at the same level.

Keywords:

honeycomb sandwich structures, laminated carbon-fibre reinforced composites, thin-layer skin, stress-strain properties, residual strength and impact resistance

Введение

В настоящее время в изделиях авиационной техники (ИАТ) широко применяются обладающие высокими удельными характеристиками трехслойные конструкции (ТСК) с тонкими обшивками и сотовыми заполнителями в качестве силовых элементов крыльев, фюзеляжа, оперения (обшивки, лонжероны, шпангоуты, нервюры, стенки), а также в агрегатах, воспринимающих местную нагрузку (закрылки, элероны, щитки, рули, различные обтекатели) [1]. Применение обшивок и заполнителей из тонколистовых полимерных композиционных материалов (ПКМ) и современных технологий их производства, в частности, безавтоклавных методов вакуумной инфузии и склеивания, позволяют достигать радикального снижения как весовых характеристик ТСК, так и производственных затрат. При этом основным недостатком ТСК на основе ПКМ, резко снижающим их несущую способность, является высокая подверженность обшивок из тонколистовых ПКМ, в том числе наиболее широко используемых слоистых углекомполитов на основе эпоксидных матриц и углеродных тканей (УКМ), к локальным, трудно

диагностируемым межслоевым повреждениям (расслоениям) различного масштаба в результате ударных воздействий при производстве, эксплуатации и ремонте ИАТ [2]. Наиболее простым и эффективным способом повышения устойчивости к таким повреждениям является межслоевое армирование обшивок путем поперечной прошивки высокопрочными нитями тканевых преформов. Процесс прошивки не требует дополнительного сложного оборудования или оснастки и осуществляется на простых и доступных швейных машинах.

Большое количество литературных данных, показывает, что при оптимальных условиях такой способ может приводить к значительному повышению межслоевой прочности и трещиностойкости, ударостойкости и остаточной прочности после удара как обшивок из слоистых УКМ, так и ТСК в целом [3–4]. При этом большинство систематических исследований эффективности прошивки посвящено выявлению влияния на нее материаловедческих и структурных факторов, таких как природа и свойства прошивочных нитей, тип стежков и плотность, характеризуемая расстоянием между смежными проколами (длиной стежка) и между прошивочными строчками (шагом прошивки) или количеством прошивок на единицу площади [5–9]. Практически не учитывается и систематически не исследуется влияние технологических параметров прошивки обшивок, в первую очередь натяжения нити и смещения листов ткани, на ее эффективность при формовании обшивок методом вакуумной инфузии.

В данной работе на основе анализа структурных повреждений армирующей углеродной ткани в слоистом УКМ, неизбежно возникающих при прокалывании иглой слоев ткани и изменяющих характер распределения матрицы в зоне прошивки, предложены усовершенствования в заправке и натяжении прошивочной нити и фиксации слоев ткани при прошивке на промышленной швейной машине с заданным типом прошивочной нити и стежка. Проведена оценка влияния

плотности прошивки на изменение деформационно-прочностных свойств при изгибе обшивок, прошитых по усовершенствованной технологии, с учетом направления укладки ткани и строчек прошивки, а также определены деформационно-прочностные свойства при продольном сжатии без и после удара и размеры зоны повреждения при ударе образцов ТСК с прошитыми и не прошитыми обшивками из УКМ.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали тонколистовые обшивки из слоистого УКМ и ТСК на их основе со стеклосотопластовым наполнителем. Обшивки изготавливали из УКМ на основе пакета слоев углеродной ткани саржевого переплетения, пропитываемого под вакуумом эпоксидным связующим. В качестве наполнителя использовали стеклосотопласт ССП-1-2,5 на основе стеклоткани и бакелитового лака с шестигранной формой ячеек и шириной стенки 2,5 мм. Для склеивания обшивки и наполнителя использовали эпоксидный пленочный клей.

Для формования обшивок углеродную ткань раскраивали на заготовки размером 650×450 мм и выкладывали в нулевом направлении по ее основе. После выкладки пакеты слоев углеродной ткани прошивали по штатной технологии стеклянной нитью диаметром 0,30 мм на промышленной швейной машине марки с использованием челночного стежка типа 301, который для прямых строчек является одним из самых прочных и формируется из двух ниток – игольной и челночной, которые переплетаются, как правило, в середине толщины прошиваемого сухого пакета ткани (рис. 1).

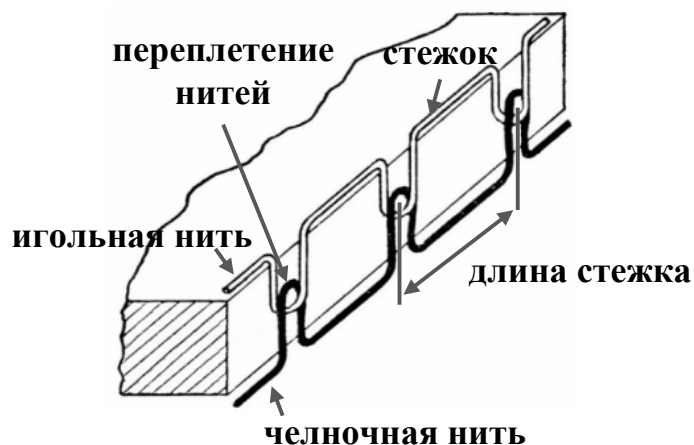


Рис. 1 – Схема двухниточного челночного стежка 301

В качестве контрольных использовали непрошитые пакеты ткани.

Полученные прошитые и не прошитые преформы упаковывали в вакуумный мешок между двумя технологическими слоями фильтровальной ткани с укладкой сетки распределения связующего поверх преформ для обеспечения равномерного распределения связующего. Пропитывали прошитые и непрошитые преформы методом вакуумной инфузии при комнатной температуре с подачей связующего по всей ширине преформы через инфузионный порт. Перед пропиткой, с целью предотвращения образования дополнительных пор в УКМ, связующее дегазировали в течение 30 минут. Отверждение заготовок обшивок проводили в промышленной печи по режиму, рекомендованному производителем связующего.

Технология изготовления ТСК включает операции по сборке технологического пакета, состоящего из предварительно отформованных обшивок (внутренней и наружной), сотового наполнителя и пленочного клея между обшивками и наполнителем. Окончательное формование ТСК проводили в оснастке в промышленной печи по режиму отверждения клея.

Структурные изменения (смещения и повреждения нитей ткани и распределения связующего) образцов обшивки из УКМ оценивали по

шлифам поверхности поперечных срезов в зоне прошивки с помощью стереомикроскопа.

Механические испытания обшивок для определения модуля упругости и разрушающего напряжения при изгибе вдоль и поперек основы ткани и направлений строчек при заданной плотности прошивки проводили в соответствии с ГОСТ 25.604-82 с использованием образцов 50×12 мм, вырезанных из отформованных пластин.

Сравнительную оценку прочности при продольном сжатии без и после удара с заданной энергией ТСК на основе тонколистовых обшивок из УКМ с прошивкой и без нее проводили на образцах размерами 150×75 мм с толщиной стеклосотопласта 12 мм и толщиной обшивок 1–1,5 мм. Нагрузку прикладывали с постоянной скоростью деформации 5 мм/мин. Для предотвращения смятия образцов при сжатии торцы ТСК усиливали накладками из КАСТа. Перед испытанием на сжатие образцы ТСК подвергали удару перпендикулярно плоскости обшивки падающим грузом с ударником полусферической формы и энергией 15 и 30 Дж.

Нарушения структуры тонкослойного УКМ в процессе прошивки и его усовершенствование

На рис. 2 приведены типичные микрофотографии шлифов поверхности поперечного среза прошитой пластины из УКМ в зоне прошивки.

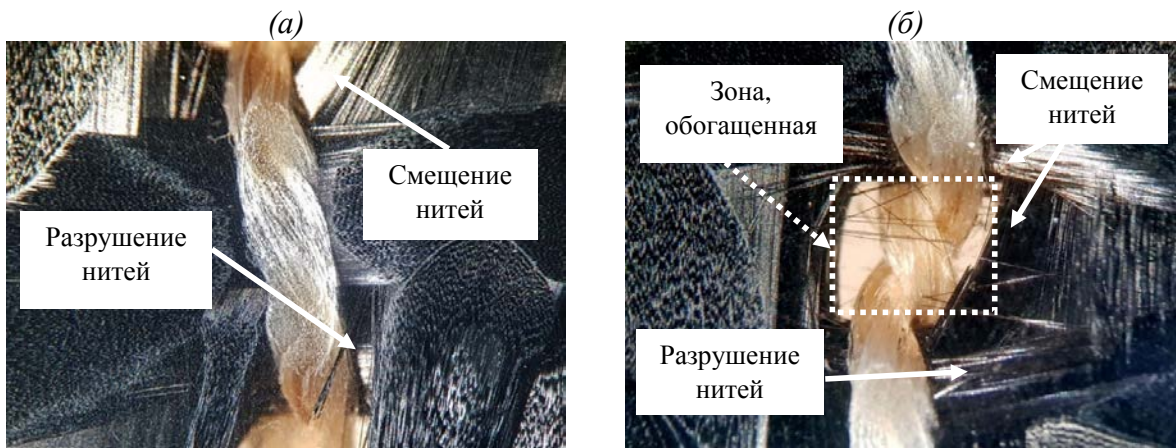


Рис. 2 – Стереомикрофотографии шлифа поверхности поперечного среза прошитых пластин из УКМ в зоне прошивки: (а) – в зоне стежка; (б) – в зоне переплетения нитей (см. рис.1)

В результате больших истирающих действий прошивочной нити об ушко иглы и в других местах ее оборота вокруг направляющих элементов швейной машины при прошивке довольно часто происходит пушение или даже обрыв нити. С целью снижения этих эффектов и регулирования натяжения нами предложена модифицированная схема заправки швейной машины перед прошивкой, показанная на рис .3.

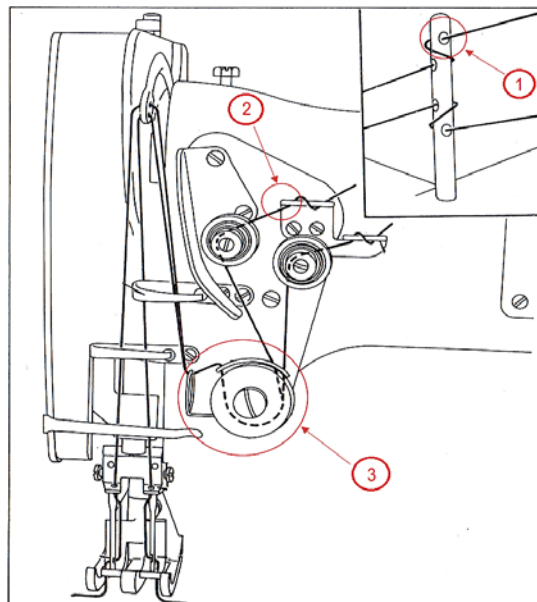


Рис. 3 – Схема модифицированной заправки прошивочной нити в швейной машине Juki LG-158-1: прошивочная нить пропускается через верхнее отверстие вертикального направляющего элемента (1) и далее направляется в крайнее левое отверстие горизонтального направляющего элемента (2) и для обеспечения оптимального натяжения нить дважды оборачивается вокруг направляющего диска (3).

Модифицированная схема заправки машины позволяет ослабить натяжение нити в зонах наиболее высокого трения и резкого изгиба. При этом необходимое натяжение нити обеспечивается за счет ее двойного оборота вокруг направляющего диска, где трение значительно ниже, чем в других направляющих элементах вследствие более плавного профиля изгиба.

В дополнение к этому для предотвращения обрыва прошивочной нити экспериментальным путем подобрана прошивочная игла диаметром 1.6 мм для прошивки стеклянной нитью. Иглы меньшего диаметра вследствие высокого трения нити об ушко иглы приводят к их обрыву, а большего приводят к увеличению зон, обогащенных связующим.

Распространенным структурным повреждением прошитых углеродных преформ является смещение слоев ткани относительно друг друга и их деформация при механическом воздействии на них в процессе прошивки. Для предотвращения этих деформаций необходима жесткая фиксация слоев в пакете при проведении технологических операций.

Для предотвращения смещения слоев ткани относительно друг друга предложено специальное приспособление – сборная накладка (рис. 4), состоящая из крепежных скоб, направляющих реек и подвижных ограничителей.

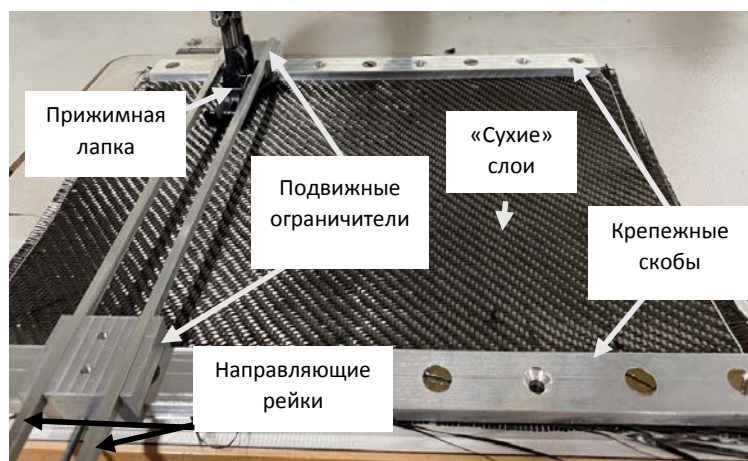


Рис. 4 – Сборная накладка для прошивки углеродных преформ

Прижимная лапка швейной машины помещается на линию прошивки между направляющими рейками, установленными на подвижных ограничителях и предназначенными для обеспечения точности швов и расстояния между ними. Затем по линии прошивки выполняется шов, после чего прижимная лапка помещается на следующую линию прошивки. При выполнении требуемого количества швов накладка удаляется.

Применение сборной накладки при одновременном предотвращении смещения слоев ткани относительно друг друга в процессе прошивки обеспечивает ровные строчки и точность шага (расстояние между строчками) вследствие сохранения подвижности пакета слоев ткани вдоль линии прошивки.

Оптимальные параметры прошивочного шва, такие как натяжение нитей стежка, его длина и т.д., задавали непосредственно перед прошивкой при выполнении операций по регулировке оборудования.

Деформационно-прочностные свойства тонколистовых обшивок из УКМ при изгибе и ТСК на их основе при продольном сжатии без и после удара

На рис. 5 приведены относительные данные об изменении стандартной прочности и модуля упругости при изгибе образцов тонколистовых обшивок из УКМ, вырезанных из прошитых пластин, полученных по технологии вакуумной инфузии и прошитых по усовершенствованному методу стеклонитью с различной плотностью стежков (1,7, 2,4, 3,3 и 5,6 стеж/см²), при приложении нагрузки в продольном и поперечном направлении к укладке ткани по ее основе и к строчкам прошивки.

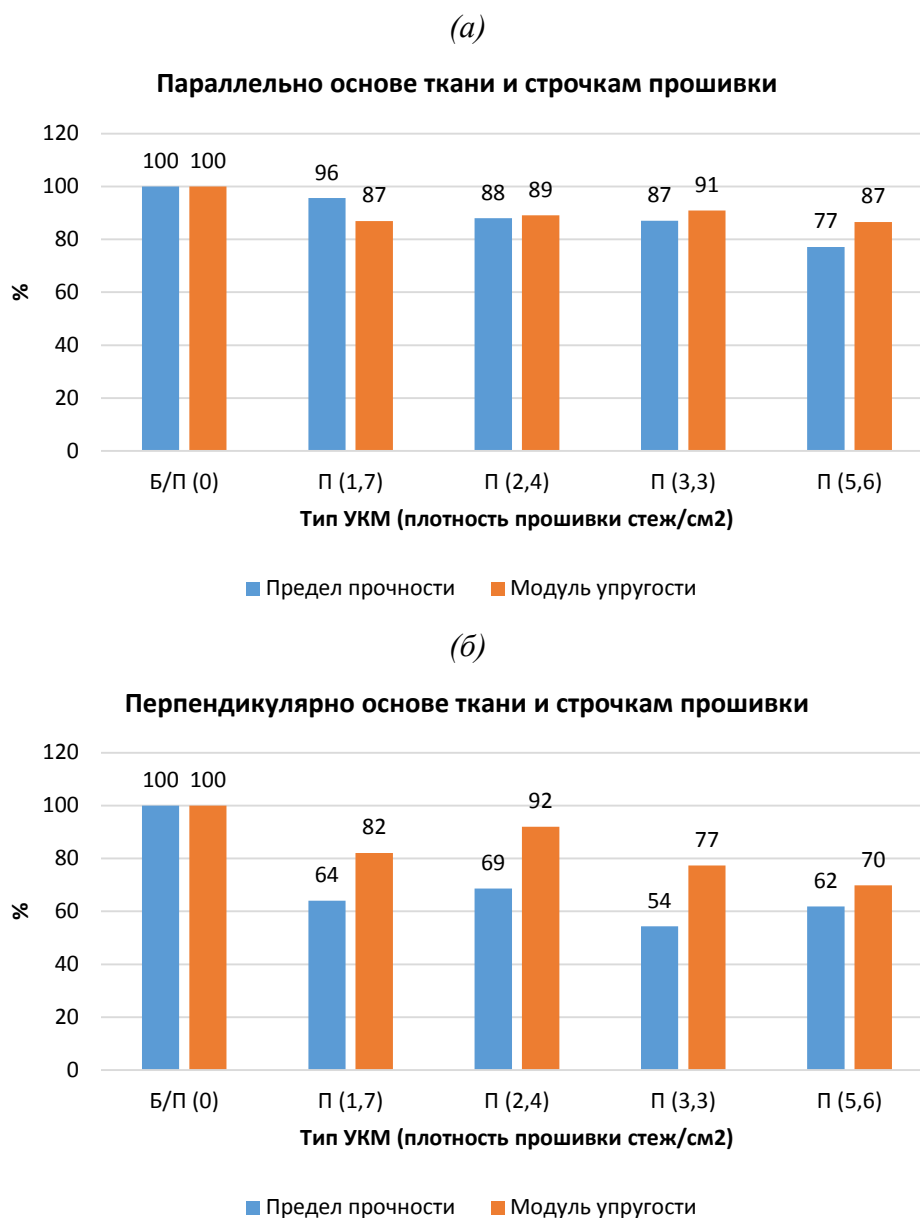


Рис. 5 – Изменения деформационно-прочностных свойств прошитых с различной плотностью стежков обшивок из УКМ по отношению к непрошитым (в %) при нагрузке параллельно (а) и перпендикулярно (б) основе ткани и строчкам прошивки

Как видно из приведенных данных структурные повреждения, обусловленные прошивкой, при заданной технологии производства (вакуумной инфузии) в целом, с увеличением плотности прошивки, приводят к снижению уровня стандартных деформационно-прочностных свойств тонкослойных обшивок. При этом снижение свойств проявляется в существенно большей степени, особенно предела прочности, при нагрузке, перпендикулярной основе ткани и строчкам прошивки. При нагрузке,

параллельной основе ткани и строчкам прошивки, эти эффекты проявляются в меньшей степени, что может быть связано с тем, что прошивка вдоль оси, при прочих равных условиях, повышает содержание несущих нагрузку волокон и блокирует развитие трещин и расслоений между слоями ткани.

Относительные данные о влиянии прошивки стеклонитью плотностью 2,4 стеж/мм² обшивок из тонокослойного УКМ на деформационно-прочностные свойства ТСК на их основе при продольном сжатии без и после удара с различной энергией представлены на рисунке 6.

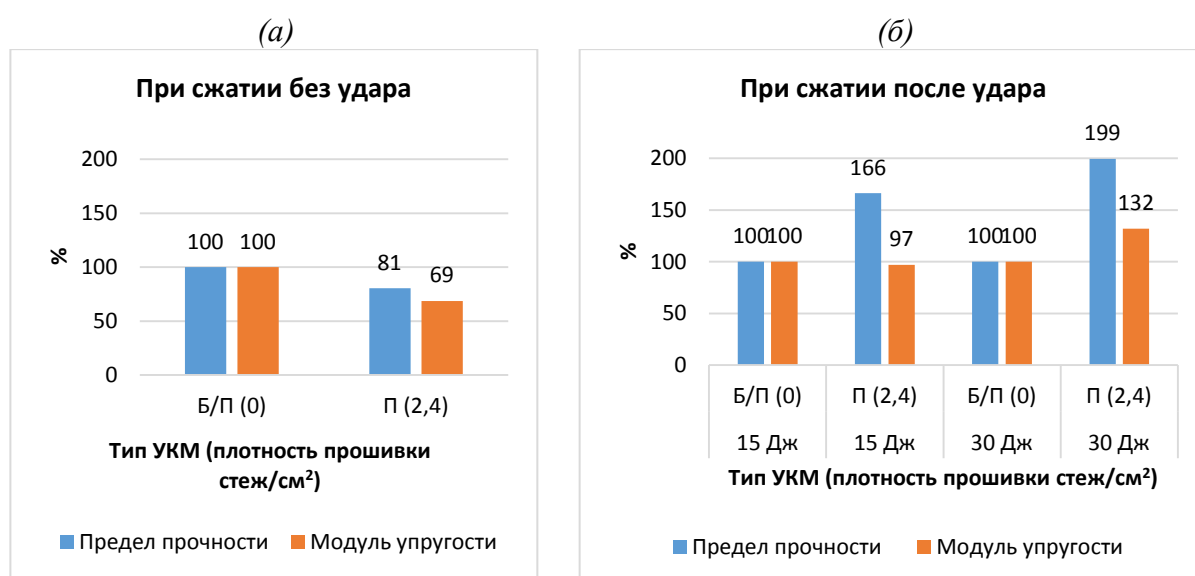


Рис. 6 – Деформационно-прочностные свойства образцов ТСК при продольном сжатии с прошитыми стеклянной нитью обшивками по отношению к образцам с непрошитыми обшивками (в %): (а) – без удара; (б) – после удара энергией 15 и 30 Дж

Фотографии областей повреждения образцов ТСК с непрошитыми и прошитыми обшивками после удара падающим перпендикулярно плоскости обшивки грузом с заданной энергией показаны на рис. 7.

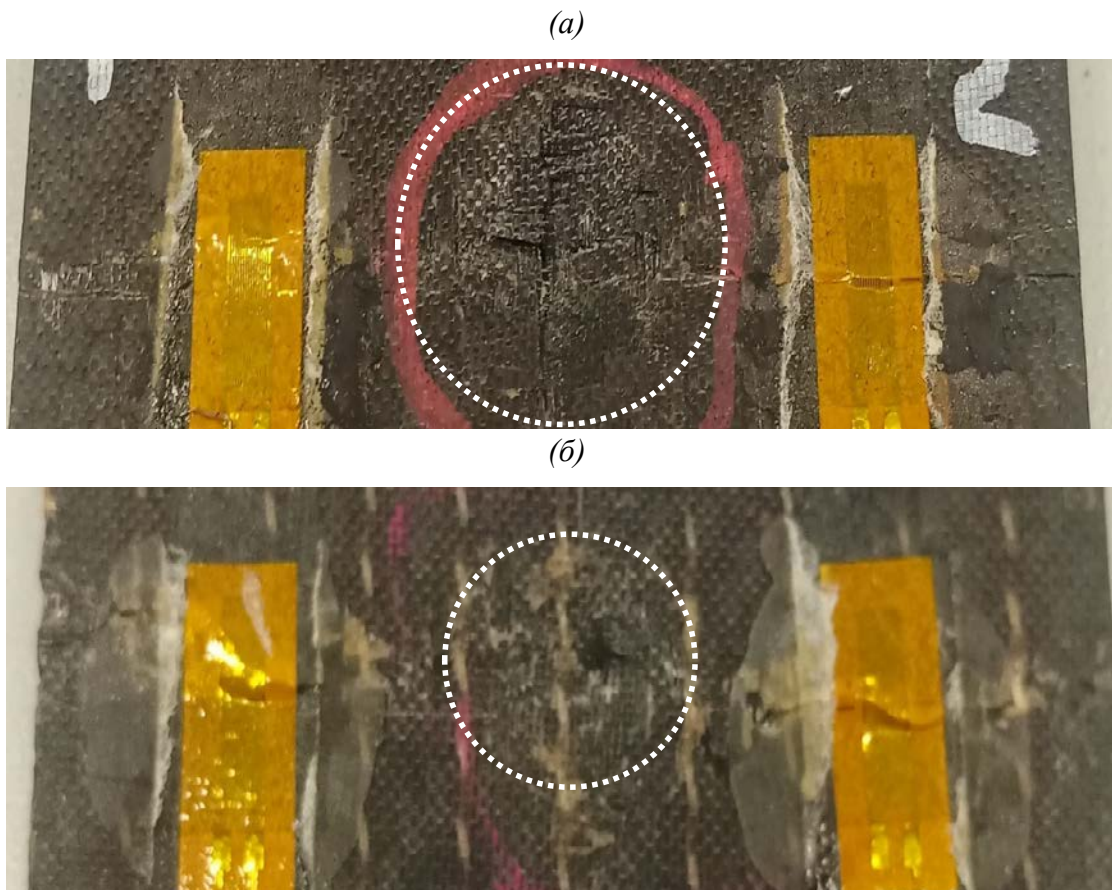


Рис. 7 – Области повреждения образцов ТСК после удара падающим перпендикулярно плоскости обшивки грузом с ударником полусферической формы и энергией 15 Дж с непрошитыми (а) и прошитыми (б) обшивками

Полученные данные свидетельствуют о том, что площадь повреждения образцов ТСК в составе с прошитыми обшивками значительно меньше образцов с обшивками без прошивки (в среднем на 40–45 %) (см. рис. 7). С уменьшением площади повреждения при наличии армирующих стежков прошивки значительно увеличивается остаточная прочность при сжатии. Так, предел прочности при сжатии после удара образцов ТСК с прошитыми обшивками более чем в 1,5 раза больше при энергии удара 15 Дж, и почти в 2 раза – при энергии удара 30 Дж (см. рис. 6, б). Жесткость ТСК, т. е. модуль упругости при этом изменяется меньше. При испытании на продольное сжатие без удара уровень деформационно-прочностных свойств образцов ТСК с прошитыми

обшивками ниже на 20–30 %, чем с непрошитыми (см. рис. 6, *a*), вероятнее всего из-за снижения этих свойств у обшивок из УКМ при прошивке.

Заключение

Таким образом, применение усовершенствованной схемы заправки и регулирования натяжения прошивочной нити в швейной машине, а также сборной накладки для фиксации слоев ткани при прошивке преформ из углеродной ткани в технологии изготовления тонкостенных обшивок из УКМ методом вакуумной инфузии и ТСК на их основе позволили улучшить локальную ударостойкость ТСК (уменьшить площадь повреждения) и увеличить остаточную прочность при сжатии после удара более чем на 60 % при энергии удара 15 Дж и до 100 % при энергии удара 30 Дж с сохранением жесткости после удара на уровне непрошитых обшивок. До удара снижение предела прочности при сжатии ТСК при прошивке обшивок в основном направлении составляет до 20 %, а модуля упругости – до 30 %.

Литература

1. Корнейчук А.Н., Волков В.С., Шуль Г.С. Денисова Е.В., Кулагина И.В., Чугунов С.А. Стеклопластиковые сотовые заполнители: достижения и пути развития / сборник докладов 5-й Всероссийская н-т конференция «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». 2021 г.

2. Вешкин Е.А., Старцев В.О., Постнов В.И., Баранников А.А. Климатические воздействия как оценка ремонтпригодности изделий из углепластика / Труды ВИАМ. 2019. № 8 (80). С. 98–108. URL: <http://www.viam-works.ru>.

3. Бабаевский П.Г., Сеницын А.Ю., Сеницына А.В. Влияние трансверсальной прошивки на деформационно-прочностные

характеристики и остаточную прочность после удара слоистого ПКМ на основе равнопрочной углеродной ткани и эпоксидного связующего / Конструкции из композиционных материалов. 2019. № 4. С. 39–44.

4. Бабаевский П.Г., Сеницын А.Ю., Матюшевский Н.В., Попов А.Г., Мазур В.В., Свиридов А.Г. Определения межслоевой трещиностойкости прошитых тонколистовых эпоксидных углекомполитов методом расслоения клином (расклинивания) / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 1.

5. Shiino M.Y., Pelosi T.S., Cioffi M.O. H. The role of stitch yarn on the delamination resistance in Non-crimp fabric: chemical and physical interpretation / Materials engineering and performance. 2017. Vol. 26(3). P. 978–986.

6. Dransfield K.A., Jain L.K., Mai Y.W. On the effects of stitching in CFRPs-I. mode I delamination toughness / Composites science and technology. 1998. Vol. 58. P. 815–827.

7. Jain L.K., Mai Y.W. On the effect of stitching on mode I delamination toughness of laminated composites / Composites science and technology. 1994. Vol. 51. P. 331–345.

8. Ravandi M., Teo W.S., Tran L.Q.N., Yong M.S., Tay T.E. The effects of through-the-thickness stitching on the Mode I interlaminar fracture toughness of flax/epoxy composite laminates / Materials and design. 2016. Vol. 109. P. 659–669.

9. Goktas D., Kennon W.R., Potluri P. Improvement of mode I interlaminar fracture toughness of stitched glass/epoxy composites / Composite materials. 2017. Vol. 24. P. 351–375.

УДК 666.3/.7

ПОВЕРХНОСТНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СПЕЧЕННОГО КОРУНДОВОГО ПОРОШКА

И.К. Некрасов¹, И.Ш. Абдуллин²

SURFACE TREATMENT OF MATERIALS BASED ON SINTERED CORUNDUM POWDER

I.K. Nekrasov¹, I.Sh. Abdullin²

Email: igor05071997@mail.ru

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Казанский (Приволжский) федеральный университет" (ФГАОУ ВО КФУ), Казань, Россия

¹Federal state autonomous educational institution of higher education "Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

²ООО "Плазма-ВСТ"

²Open Joint Stock Company "Plasma VST"

Аннотация

Корундовая керамика все больше и больше применяется в составе композиционных материалов за счет своих уникальных свойств, таких как высокая твердость, огнестойкость и ударостойкость. Повышение этих характеристик позволит расширить спектр применения керамических материалов в различных отраслях промышленности, в частности, где применяются композиционные материалы.

Ключевые слова:

керамика, композиционные материалы, поток низкоэнергетических ионов

Annotation

Corundum ceramics are increasingly used in composite materials due to their unique properties such as high hardness, fire and impact resistance. Increasing these characteristics will allow for a wider range of applications for ceramic materials in various industries, in particular where composite materials are used.

Keywords:

ceramics, composite materials, low-energy ion flow

Abstract

The paper presents the results obtained in the study of the effect of low-energy ion flow generated from high-frequency capacitive discharge of low-pressure plasma on the adhesion properties of alumina ceramics. It has been found out that treatment by low-energy ion flow in air medium allows to increase the wettability of alumina ceramics. The angle of wettability before treatment was 80° , after treatment 28° . High content of amorphous phase in corundum ceramics samples was found. The hardness of corundum samples was increased by treatment with a stream of low-energy ions generated from a high-frequency discharge of reduced pressure.

Введение

Керамические материалы все более и более находят свое применение в композиционных материалах (КМ) ввиду уникальности своих свойств: твердости, огнестойкости, ударостойкости.

Помимо КМ керамические (корундовые) материалы применяются при изготовлении фрез для обработки твердых материалов. Чаще всего используются следующие разновидности керамики:

– оксидно-гибридная: для чистовой, получистовой или прерывистой обработки высокопрочным, обеленных, модифицированных чугунов или сталей, закаленных до 30...60 HRC.

– оксидная (на алюминиево-оксидной основе): для точения не обработанных термически сталей на высоких скоростях. Она способна справиться с материалами твердостью 160–380 НВ (сталь) и 143-289 НВ (чугун).

– кремниевая (в основе - Si_3N_4): используется для получистовой обработки чугунов и сплавов в основе которых Ni (никель), Co (кобальт), Al (алюминий) с кремнием.

– композит на основе алюминия, укрепленный карбидом кремния: для быстрой обработки сталей и чугунов твердостью свыше 250 НВ.

Основными направлениями модификациями керамических материалов являются увеличение твердости, смачиваемости (для создания КМ), износостойкости и т. п.

Однако проблема разрушения керамики требует новых подходов к материаловедению керамических изделий, способов модификации и обработки поверхности.

Механизмы деформирования и разрушения керамики имеют ряд существенных особенностей. В отличие от металлов в оксидах, карбидах, нитридах и других соединениях, являющихся основой керамических изделий, высока энергия образования носителей пластической деформации – дислокаций. По этой причине подобные материалы под действием сдвиговых напряжений растрескиваются практически без пластической деформации. Большие сдвиговые деформации сопровождаются

увеличением объема в результате растрескивания материала и разворота образовавшихся сегментов [1–3].

Одним из методов модификации керамических материалов является метод обработки потоком низкоэнергетических или высокоэнергетических ионов. Высокоэнергетические ионы, согласно данным работы [4], позволяют увеличить нанотвердость корундовой керамики в 1,5 раза. Однако в данном методе есть недостаток, связанный с травлением аморфной фазы корунда. С помощью метода обработки потоком низкоэнергетических ионов (50–100 эВ), генерируемых из высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления, удалось повысить смачиваемость различных материалов, таких как ткани на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (рис. 1), стекловолокна, углеродного волокна, щебня, мрамора и многих других [5–7].



Рис. 1 – Растекание капли по СВМПЭ поверхности до (а) и после (б) обработки потоком низкоэнергетических ионов [4]

Методика обработки образцов и проведения исследований

В качестве образцов использовалась корундовые керамические шестигранники.

Обработка произведена на ВЧ плазменной установке пониженного давления, состоящей из ВЧ генератора, ВЧ электродов, вакуумной системы, системы подачи газа и системы охлаждения.

Исследования проведены при следующих выходных параметрах экспериментальной установки: энергия ионов E_i от 50 до 100 эВ, плотность тока на поверхность волокна j_i от 0.5 до 1,5 А/м², рабочее давление P до 120 Па, плазмообразующий газ – воздух, аргон, вносимая в разряд мощность от 1 до 2 кВт, частота генерации ВЧ электромагнитного поля – 13,56 МГц.

Смачиваемость образцов определялся на приборе для измерения краевого угла смачивания DSA30.

Микротвердость образцов определялась с помощью микротвердометра ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76.

Экспериментальная часть

Образцы керамических дисков без предварительной очистки обрабатывались потоком низкоэнергетических ионов с целью повышения смачиваемости. На рис. 2 приведены фотографии по определению угла смачиваемости для необработанного и обработанного образцов.

Измерения краевого угла смачиваемости показали, что до обработки угол составляет 80° , а после обработки – 28° .

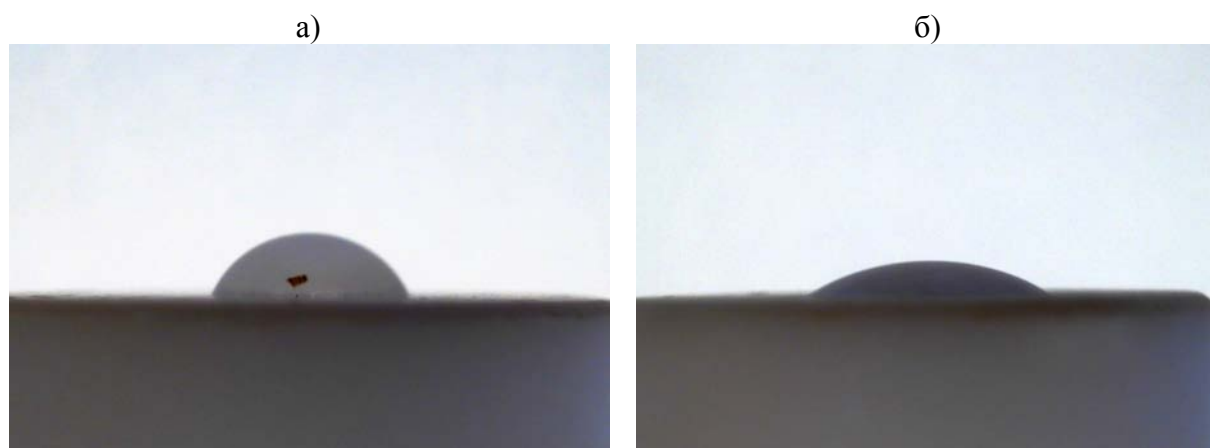


Рис. 2 – Определение угла смачиваемости у необработанного образца (а) и обработанного образца (б)

Большим недостатком других плазменных методов обработки является недолговечность полученных результатов. Согласно полученным ранее результатам [8], смачиваемость керамики не ухудшается с течением длительного промежутка времени.

Измерения микротвердости продемонстрировали следующее. Обнаружено, что аморфная фаза в спеченном порошке превышает 10 %, заявленных производителем. В результате этого при измерении микротвердости пирамидой по методу Виккерса необработанные плазмой образцы растрескивались в области воздействия индентора (см. рис.3). Это говорит о низкой твердости материала.

На обработанных плазмой образцах увеличена как микротвердость, так и трещиностойкость. Это видно по наличию отпечатка от пирамиды на поверхности материала (см. рис.4).



Рис. 3 – Отпечаток от четырехгранной пирамиды на контрольном образце.

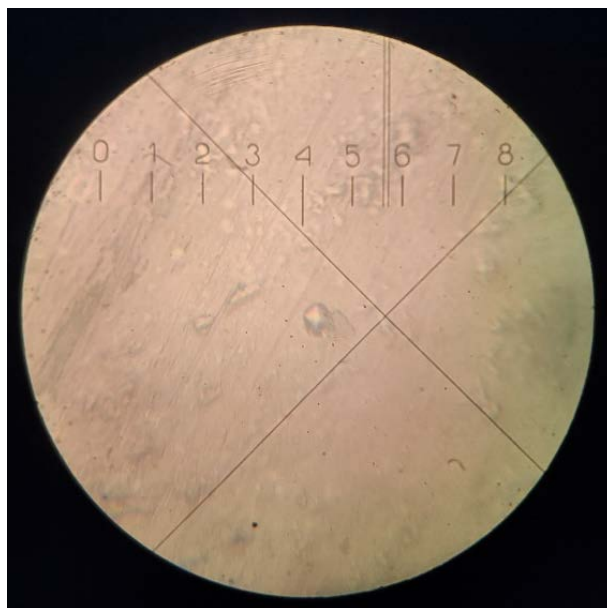


Рис. 4 – Отпечаток от четырехгранной пирамиды на обработанном потоком низкоэнергетических ионов образце

Выводы

Обработка потоком низкоэнергетических ионов позволяет повысить смачиваемость корундовой керамики. Стоит отметить, что данный эффект не исчезает спустя время, что свидетельствует о возможности длительного хранения обработанной керамики и, соответственно, об отсутствии необходимости «немедленного» применения после обработки.

Установлен большой процент содержания аморфной фазы в спеченном корундовом порошке. Обработка потоком низкоэнергетических ионов, генерируемых из ВЧ разряда пониженного давления, позволяет значительно улучшить характеристики корундовой керамики, таких как твердость и трещиностойкость.

Литература

1. Григорян В.А. и др. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования // М.: РадиоСофт. 2008.406 с.
2. Никифоровский В.С., Шемякин Е.И. Динамическое разрушение твердых тел. Новосибирск: Наука, 1979. 272 с.

3. Гаршин А.П., Гропянов В.М. Зайцев Г.П., Семенов С.С. Керамика для машиностроения. М.: Научтехлитиздат. 2003. 380 с.

4. Гынгазов С.А. и др. Поверхностная модификация корундовой керамики ионным пучком аргона // Перспективные материалы. 2018. №. 8. С. 61–71.

5. Модификация синтетических волокнистых материалов и изделий неравновесной низкотемпературной плазмой. Часть. 2. Свойства, структура, технологии / Корнеева Н.В. [и др.]. // Казань: Казанский государственный технологический университет (КГТУ), 2011. 256 с.

6. Исследование взаимного влияния и свойств волокон на прочность их соединения с полимерной матрицей методом full pull-out при получении композиционных материалов / В.В. Кудинов, И.К. Крылов, И.Ш. Абдуллин, Н.В. Корнеева, В.И. Мамонов // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 6. С. 77–80.

7. Абдуллин И.Ш., Некрасов И.К. и др. Влияние низкоэнергетических ионов неравновесной низкотемпературной плазмы на формирование полимерных композитов на основе СВМПЭ-волокнистого материала / Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России: материалы III Международной научно-технической конференции // НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2022. С. 498–510.

8. Некрасов И.К., Абдуллин И.Ш., Сагитова Ф.Р. Характер воздействия потока низкоэнергетических ионов на свойства глиноземной керамики / Высокотемпературные керамические композиционные материалы и защитные покрытия: материалы V Всероссийской научно-технической конференции // НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2022. 227 с.

УДК 629.7.023.222

**НОВАЯ ПОЛИУРЕТАНОВАЯ СИСТЕМА ПОКРЫТИЯ
ДЛЯ ОКРАСКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

А.С. Сердцелюбова¹, к.т.н.; Ю.К. Зверевич¹;

Ю.И. Меркулова¹, к.т.н.

**NEW POLYURETHANE COATING SYSTEM
FOR PAINTING PRODUCTS FROM POLYMER COMPOSITE
MATERIALS**

A.S. Serdcelyubova¹, PhD; Yu.K. Zverevich¹;

Yu.I. Merkulova¹, PhD

serdcelubova.a@icloud.com, Yulyazverevich@mail.ru, yuliya-merkulova@inbox.ru

¹*Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ), Москва, Россия*

¹*Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM), Moscow, Russia*

Аннотация

Статья посвящена разработанной отечественной системе лакокрасочных покрытий типа «база/лак», предназначенной для защитно-декоративной окраски внешней поверхности воздушных судов.

Ключевые слова:

лакокрасочные покрытия, внешняя окраска, защита от коррозии, атмосферостойкие покрытия, авиационные лакокрасочные материалы

Abstract

The article is devoted to the developed domestic system of paint and varnish coatings of the «base coat/clear coat» type, intended for protective and decorative painting of the external surface of aircraft.

Keywords:

coatings, exterior painting, corrosion protection, weather-resistant coatings, aviation paints and varnishes

Реферат

Сегодня условия активного импортозамещения, а вместе с тем, и повышения независимости от иностранных поставщиков, обеспечения конкурентоспособности отечественной авиатехники, объясняют повышенную значимость аналогичной разработки в России. В связи с этим, в НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ разработана новая лакокрасочная система «база – лак».

В работе применены современные методы исследования свойств полимерных покрытий: дифференциально-сканирующая калориметрия, термогравиметрия, микроструктурный и топографический анализ, измерение электрохимических параметров. Кроме того, проведена оценка изменения декоративного состояния покрытия после ускоренных испытаний, дано представление об изолирующей способности покрытия, его адгезии к подложкам из металлического сплава и полимерным композиционным материалам.

Abstract

Today, the conditions of active import substitution, and at the same time increasing independence from foreign suppliers and ensuring the competitiveness of domestic aircraft, explain the increased importance of similar developments in Russia. In this regard, the National Research Center

“Kurchatov Institute” - VIAM has developed a new paint and varnish system “base - varnish”.

The work uses modern methods for studying the properties of polymer coatings: differential scanning calorimetry, thermogravimetry, microstructural and topographic analysis, measurement of electrochemical parameters. In addition, an assessment was made of the change in the decorative state of the coating after accelerated tests, and an idea was given of the insulating ability of the coating, its adhesion to metal alloy substrates and polymer composite materials.

Вводная часть

Несомненно, сегодня авиастроение является одной из отраслей, наиболее активно стимулирующих разработку новых материалов [1–3]. Зачастую основная задача авиационного материаловедения – повышение срока службы воздушного судна (ВС), что определяет и экономическую целесообразность эксплуатации летательных аппаратов (ЛА) [4]. Кроме того, внедрение в конструкцию ВС новых материалов, в свою очередь, требует обеспечения их эффективной защиты от всевозможных взаимодействующих внешних факторов [5].

Длительная эксплуатация практически всех деталей изделий авиационной техники (АТ) предполагает применение лакокрасочных покрытий (ЛКП). Это обусловлено необходимостью защиты материалов различной природы: металлов, многообразных сплавов, сталей, полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе различных связующих [6–7]. Кроме того, велика роль лакокрасочных покрытий как средства электроизоляции, защиты от солнечной радиации, излучения и воздействия влажной среды.

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) для внешней окраски самолета наделены, не менее важной, декоративной функцией. Это вполне объяснимо, ведь современные самолеты и вертолеты имеют достаточно

узнаваемое, яркое оформление, в том числе, характерное для того или иного корпоративного стиля. В этой связи, НИЦ «Курчатовский Институт» - ВИАМ уделяет внимание разработке новых систем покрытий для окраски внешней поверхности ВС [8].

Накопленный научно-технический задел в области разработки уникальных материалов авиационного назначения, сегодня дает возможность специалистам создавать высококачественную продукцию, которая соответствует современным требованиям авиационной промышленности и обеспечивает потребности в импортозамещении [9–10]. В течение последнего года ряд авиастроительных предприятий, а также авиаремонтных заводов испытывает ограничения в поставках продукции зарубежного производства – компаний PPG, AkzoNobel, Henkel, Sherwin-Williams, DuPont, Mankiewicz, Mараero. Данное обстоятельство ставит перед российскими разработчиками задачу поиска новых решений, которые позволят создать новые материалы, превосходящие зарубежные аналоги.

В последние годы развивается новое поколение лакокрасочных систем на полиуретановой основе. Данные материалы проявляют высокую эффективность и работоспособность [11–13]. Работа в условиях температурных перепадов, защита от эрозионного износа, устойчивость к УФ-излучению, превосходная адгезия к субстратам из металлов и пластиков – далеко не полный перечень преимуществ данного класса ЛКП. Применение специальных модифицирующих добавок для полиуретановых систем позволяет направленно регулировать время высыхания ЛКМ и другие технологические и эксплуатационные свойства.

Методы исследования

Объектами исследования работы являются двухкомпонентные фторполиуретановые материалы лакокрасочной системы типа «база/лак».

В качестве пленкообразующей основы при разработке материалов использовали фторированный гидроксилсодержащий сополимер отечественного производства, отверждаемый изоцианатным отвердителем. Свойства пленкообразующей основы и отвердителя представлены в таблицах 1 и 2.

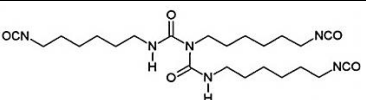
Таблица 1

Свойства пленкообразующей основы

Химическая структура	Описание	Содержание гидроксильных групп, % масс.	Содержание нелетучих веществ, % масс.
$R^3 \left[\begin{array}{c} F \\ \\ C \\ \\ F \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} F \\ \\ C \\ \\ Cl \end{array} \right]_m \left[CH_2 - \underset{\substack{ \\ OR^1}}{HC} \right]_n \left[CH_2 - \overset{\substack{ \\ R^1 \\ \\ O}}{CH} \right]_x R^3$	Сополимер трифторхлорэтилена с гидроксилвиниловыми эфирами (в форме раствора)	1,3	40

Таблица 2

Свойства отвердителя

Химическая структура	Описание	Содержание изоцианатных групп, % масс.	Содержание нелетучих веществ, % масс.
	Раствор полиизоцианатов в смеси растворителей	16,5	74

Для разбавления использовали смесь органических растворителей с различной скоростью испарения, содержащую этиленгликоляцетат, метилэтилкетон, ксилол, бутилацетат.

Для получения образцов материалы при рабочей вязкости наносили методом пневматического распыления на предварительно подготовленные подложки из металлического сплава и полимерных композиционных материалов (ПКМ): стекло- и углепластик.

Отверждение покрытий проводили при условиях температуры и влажности помещения. Перед проведением ускоренных испытаний образцы выдержаны в данных условиях в течение 7 суток.

Для исследования свойств покрытий, в том числе, после воздействующих факторов, применяли комплексные методы.

Ускоренные испытания проводили в аппарате искусственной погоды Atlas–UVCON, предусматривающем одновременное воздействие УФ-излучения в сочетании с 100 % влажностью и повышенной температурой. Образцы подвергали многоциклового воздействию по следующему режиму: 4 ч – облучение лампой UVB-313 при температуре 70 °С; 4 ч – конденсация влаги при температуре 40 °С. Время испытания – 500 ч.

Испытания циклических температурных перепадов от –60 до +100 °С проводили в камере термоциклирования, чередуя с выдержкой в камере влажности при $\phi = 98 \%$.

Режим термического старения образцов покрытий предусматривал экспозицию при температуре 100 °С в течение 100 ч в сушильном шкафу с конвекцией.

Микроструктурные исследования поверхности покрытий проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 XMU в режиме вторичных электронов при увеличении при увеличениях от $\times 10000$ до $\times 60000$.

Для подготовки к микроструктурным исследованиям экспериментальные образцы фиксировали с помощью двухстороннего скотча и клея на основе углерода к специальным держателям образцов для сканирующего электронного микроскопа. Затем при комнатной температуре в течение 24 часов образцы подвергали ионно-плазменному травлению в вакуумной установке JFC-1100 (JEOL). Далее поверхность образцов металлизировали в установке вакуумной металлизации «Q150R ES» производства «QUORUM TECHNOLOGIES».

Топографический анализ покрытий выполняли с помощью многофункционального атомно-силового микроскопа «Интегра Прима» при резонансной частоте кантиливера 135,500 kHz и скорости сканирования – 1 мкм/с.

Определение потери массы образцов пленок выполняли при динамическом нагреве в диапазоне температур от 25 до 460 °С со скоростью нагрева 10 °С/ мин в среде азота. Для проведения испытания использовали прибор модели типа TGA/DSC.

Определение степени отверждения покрытий проводили методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с помощью дифференциального сканирующего калориметра теплового потока DSC 204 F1 фирмы Netzsch (Германия) в сканирующем режиме со скоростью нагревания 10 °С/мин в динамической атмосфере азота (скорость потока газа 100 мл/мин). Перед проведением испытаний композиции экспонировали при комнатной температуре. Предварительно композиции были вакуумированы для снижения влияния среды летучего разбавителя на результаты анализа.

Определение адгезии покрытий к алюминиевому сплаву и ПКМ выполняли в соответствии с ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013), методом решетчатого надреза с применением липкой ленты для удаления отслоившегося покрытия.

Блеск покрытий определяли используя фотоэлектрический метод прибором типа Micro-gloss.

Определение электрохимических свойств лакокрасочных покрытий выполняли с использованием метода электрохимической импедансной спектроскопии, согласно ASTM G106. Измерения проводили в ячейке потенциостата с трехэлектродной схемой подключения, заполненной нейтральным раствором 3 % NaCl. Площадь рабочего электрода составляла 10 см², в качестве противоэлектрода использовали платиновую

сетку. Использовали каломельный электрод сравнения, наполненный насыщенным раствором КСl. Перед началом измерений образец выдерживали в электролите в течение не менее 30 минут. Снятие спектров импеданса проводили в диапазоне частот от 0,01 до 1 МГц посредством приложения синусоидального сигнала амплитудой 10 мВ.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

Экспериментальная часть

Уровень эксплуатационных свойства покрытий, в том, числе, их атмосферостойкость, в большей степени, определяются интенсивностью и глубиной полимеризационных процессов, протекающих в пленке. Для оценки эффективности межмолекулярного взаимодействия гидроксилсодержащего сополимера и изоцианатного отвердителя были проведены исследования степени отверждения образцов пленок методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

На рисунках 1 и 2 представлены термограммы процесса отверждения пленки на основе фторполиуретанового лака.

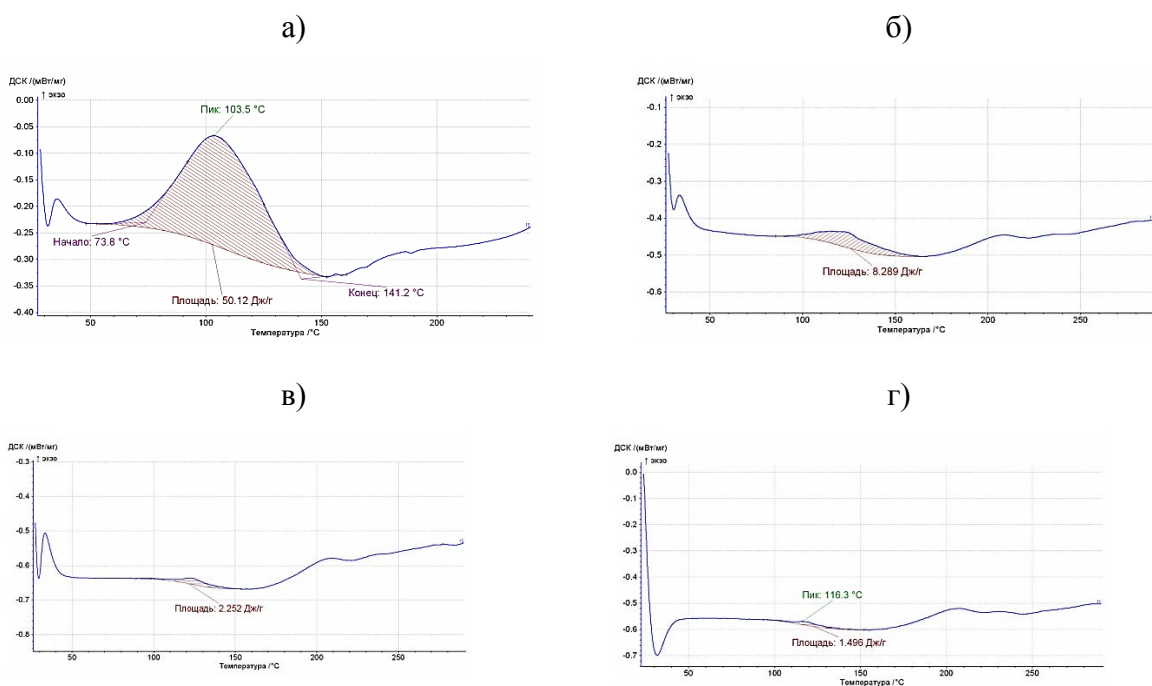


Рис. 1 – Термограммы процесса отверждения пленки на основе фторполиуретанового лака: а) в исходном состоянии; б) после 1 суток выдержки; в) после 3 суток выдержки; г) после 7 суток выдержки

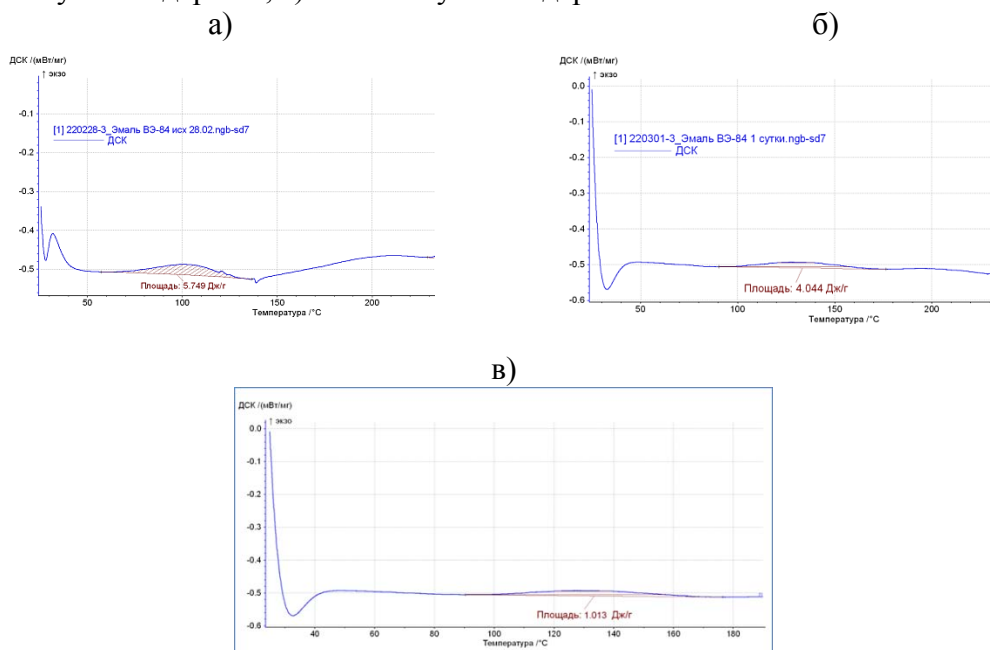


Рис. 2 – Термограммы процесса отверждения пленки на основе фторполиуретановой базовой эмали: а) в исходном состоянии; б) после 1 суток выдержки; в) после 2 суток выдержки

На кривой ДСК образца в исходном состоянии (рис. 1, а) отчетливо виден экзотермический пик в интервале температур от 73,8 до 141,2 °С с максимумом при температуре 103,5 °С и тепловым эффектом 50,12 Дж/г,

который обусловлен процессом отверждения фторполиуретанового олигомера. Тепловой эффект реакции отверждения закономерно снижается в процессе хранения образца пленки при комнатной температуре, степень конверсии при этом повышается.

С использованием термограмм процесса отверждения произведен расчет степени конверсии полимера, в данном случае, выражающую степень отверждения исследуемых образцов (табл. 3).

Таблица 3

Степень отверждения образцов покрытий в процессе их выдержки при комнатной температуре

Образец	Степень отверждения, %			
	1 сутки	2 суток	3 суток	7 суток
Лак	83,5	89,9	95,5	97,0
Эмаль	29,7	82,4	Более 99	–

Данные рисунков 1 и 2 и таблицы 3 позволяют сделать вывод о том, что процесс пленкообразования лака и эмали в условиях температуры помещения характеризуется высокой степенью отверждения (97–99 %). При этом, пленка на основе эмали достигает завершенной степени отверждения с высокой интенсивностью на 3 сутки выдержки.

Под влиянием факторов внешней среды в процессе эксплуатации покрытий неизбежно происходит их разрушение, связанное с протеканием в пленках необратимых физических и химических процессов. Для покрытий авиационного назначения наиболее свойственно разрушение вследствие термического воздействия [11, 12]. В этой связи, были проведены исследования изменения массы образцов полимерных пленок методом термогравиметрического анализа.

На рисунках 3 и 4 представлены результаты термогравиметрического анализа образцов в зависимости от температуры в исходном состоянии, а также после воздействия факторов старения.

Следует упомянуть, что разрушение полимерных покрытий включает две стадии. На первой стадии проявляются изменения декоративных свойств: изменение цвета, снижение блеска, меление. Вторая стадия процесса возникает с необратимыми химическими изменениями, обусловленными разрывом молекулярных связей пленкообразующего вещества. При этом, покрытие характеризуется появлением дефектов: растрескиванием, появлением пузырей, отслаиванием. Первая стадия процесса деструкции образцов покрытий в исходном состоянии наступает с температурными значениями свыше 150 °С, при чем дополнительные воздействующие факторы, связанные с длительным нагревом образцов, усиливают стойкость покрытий к термовоздействию – значения температуры начала деструктивных процессов возрастают до 240 °С (рис. 3).

Положительный эффект является закономерным для покрытий на основе терморезистивных полимеров и позволяет определить максимальную рабочую температуру покрытий.

Стоит отметить, что образцы на основе лака характеризуются более высокими значениями потери массы, как в исходном состоянии, так и после воздействия искусственных факторов, по сравнению с покрытием на основе эмали. Данный эффект, по всей видимости, связан с присутствием в составе наполненных покрытий минеральной фазы, наиболее устойчивой к термоокислительной деструкции по сравнению с полимером.

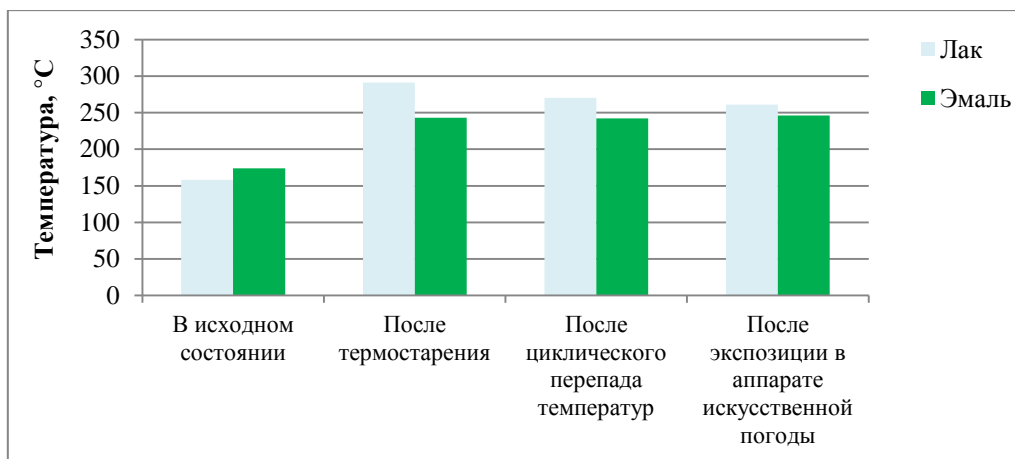


Рис. 3 – Температурные значения первой стадии процесса деструкции полимерных покрытий в зависимости от воздействующего фактора

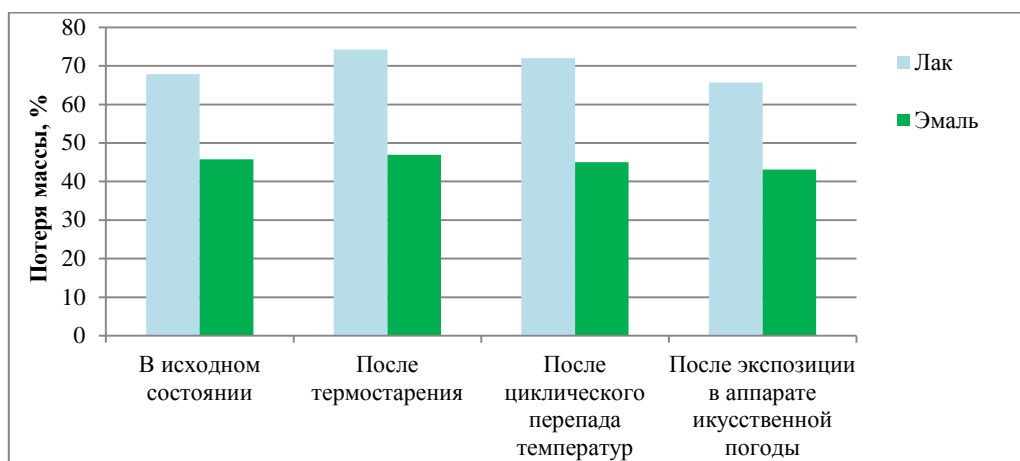


Рис. 4 – Потеря массы полимерных покрытий при нагреве до 460 °С

Поскольку металлические сплавы сегодня остаются основным конструкционным материалом изделий авиационной техники, несмотря на ощутимый прогресс в сфере ПКМ, немаловажным направлением развития лакокрасочных материалов является защита от процессов коррозии [13, 14]. С учетом происходящих структурных изменений в покрытии при работе изделий, в том числе, после длительных эксплуатационных нагревов, детали самолета сильно подвержены возникновению коррозионных поражений [15–17].

В этой связи, проведены исследования электрохимических свойств лакокрасочных покрытий методом электронной импедансной

спектроскопии. Измерения образцов выполняли в исходном состоянии, а также после воздействующих факторов в области частоты $|Z|_{f=0,01}$.

Таблица 4

Значения модуля импеданса образцов ЛКП, Ом·см²

Образец ЛКП	В исходном состоянии	После теплового воздействия	После термоциклирования от -60 до +100 °С	После экспозиции в аппарате искусственной
Эмаль красной цветовой гаммы	$4,26 \cdot 10^9$	$4,87 \cdot 10^9$	$5,85 \cdot 10^9$	$5,80 \cdot 10^8$
Эмаль желто-зеленой цветовой гаммы	$6,89 \cdot 10^9$	$2,68 \cdot 10^9$	$3,65 \cdot 10^9$	$5,44 \cdot 10^8$
Эмаль синей цветовой гаммы	$3,84 \cdot 10^9$	$3,55 \cdot 10^9$	$1,56 \cdot 10^9$	$6,94 \cdot 10^8$
Эмаль серой цветовой гаммы	$3,81 \cdot 10^8$	$3,24 \cdot 10^7$	$1,39 \cdot 10^8$	$8,68 \cdot 10^7$
Эмаль белой цветовой гаммы	$1,76 \cdot 10^9$	$7,02 \cdot 10^9$	$6,03 \cdot 10^9$	$3,84 \cdot 10^8$
Лак	$8,09 \cdot 10^9$	$6,48 \cdot 10^9$	$1,60 \cdot 10^{10}$	$1,11 \cdot 10^{10}$

Электрохимические исследования позволили установить, что для покрытия на основе эмали серой цветовой гаммы характерен несколько пониженный показатель модуля импеданса, по сравнению с образцами других цветов. Подобный результат определен наличием в составе эмали серых оттенков углерода, который, как известно, является эффективным проводником электрического тока, повышая при этом электропроводность пленки. Таким образом, сопротивление данных покрытий снижается.

Экспозиция образцов в аппарате искусственной погоды приводит к снижению электрического сопротивления всех пигментированных покрытий в равной степени. Данный эффект, скорее всего, обусловлен негативным воздействием УФ-излучения, усугубляемым активной сорбцией влаги поверхностью пленки. Для иллюстрации данного эффекта на рисунке 5 представлены профилограммы участков поверхности покрытий на основе эмали в исходном состоянии и после экспозиции в аппарате искусственной погоды.

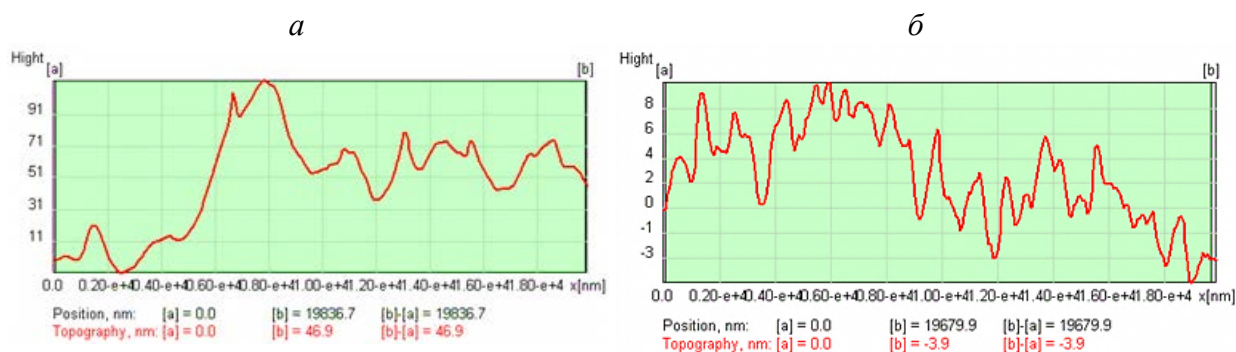


Рис. 5 – Профилограммы поверхности ЛКП в исходном состоянии (а) и после испытаний в аппарате искусственной погоды (б)

Очевидно, что после проведения испытаний образца на наноструктурном уровне покрытия проявляется возрастание интенсивности перепада высот профиля поверхности.

Вместе с тем, тепловое старение и циклические температурные перепады не оказывают отрицательного влияния на значения модуля импеданса ЛКП, а в случае ЛКП на основе лака, значения модуля импеданса образцов после термоциклирования и экспозиции в аппарате искусственной погоды повышаются.

В аспекте защитной и изолирующей способности разработанных покрытий следует так же отметить, что система характеризуется наивысшим баллом адгезии к подложкам из металла и ПКМ.

На рисунках 6–9 представлены результаты микроструктурных исследований.

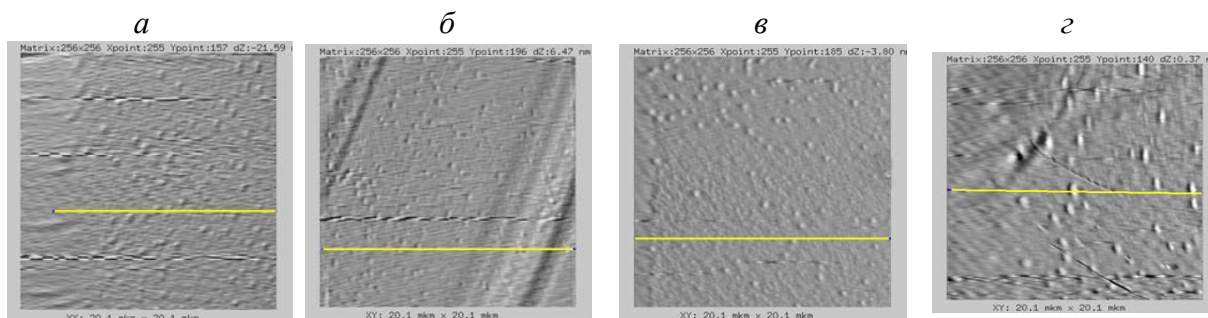


Рис. 6 – Изображения топографии участков поверхности образцов ЛКП на основе лака в исходном состоянии (а), после термостарения (б) после термоциклирования (в), после экспозиции в аппарате искусственной погоды (г)

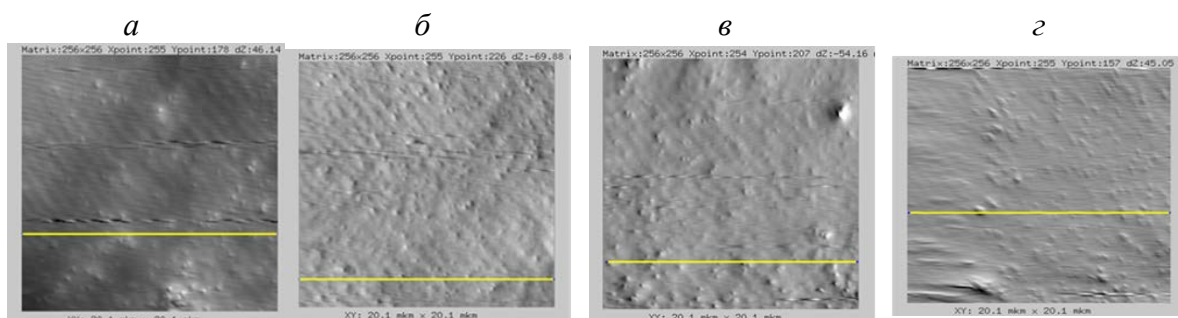


Рис. 7 – Изображения топографии участков поверхности образцов ЛКП на основе эмали в исходном состоянии (а), после термостарения (б) после термоциклирования (в), после экспозиции в аппарате искусственной погоды (г)

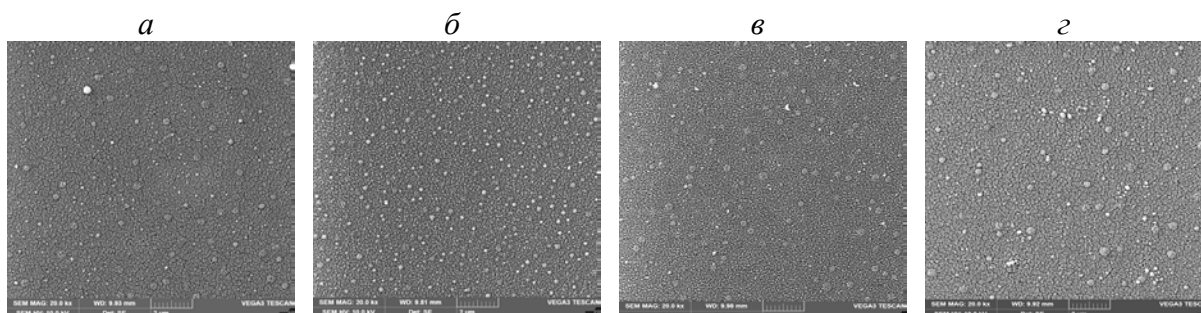


Рис. 8 – Электронные микроснимки ЛКП на основе фторполиуретанового лака при увеличении $\times 20000$ в исходном состоянии (а), после термостарения (б) после термоциклирования (в), после экспозиции в аппарате искусственной погоды (г)

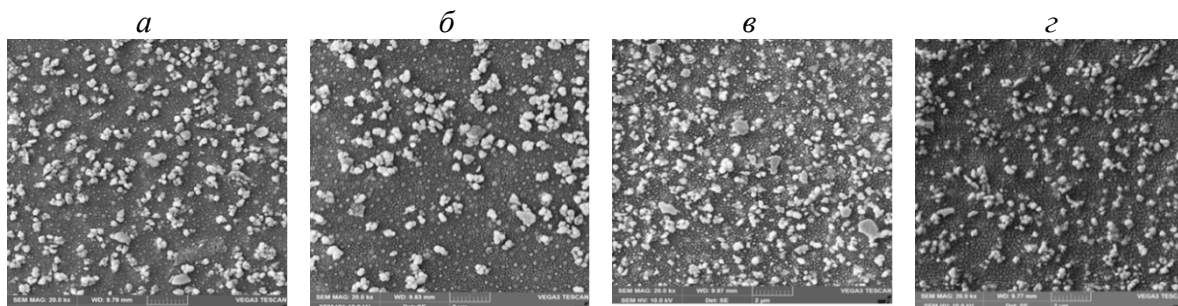


Рис. 9 – Электронные микроснимки ЛКП на основе фторполиуретановой эмали при увеличении $\times 20000$ в исходном состоянии (а), после термостарения (б) после термоциклирования (в), после экспозиции в аппарате искусственной погоды (г)

Результаты исследований иллюстрируют многофазную структуру исследуемых покрытий. Установлено, что в структуре покрытий на основе лака присутствуют наноразмерные включения округлой формы (не более 425 нм), которые представляют собой частицы фторполимера в растворе пленкообразующей среды.

Микроструктура пигментированных покрытий также характеризуется гетерогенностью. Дисперсная фаза (частицы пигментов и наполнителей) на микроснимках проявляется как включения неправильной формы нано- и микро размера (не более 3,5 мкм), распределенные в объеме дисперсионной среды (раствор фторполимера).

Изображения топографии позволяют установить, что дефекты в покрытиях проявлены слабо. Отсутствуют трещины и крупные неровности рельефа, как в исходном состоянии, так и после факторов старения.

Как известно, характеристикой однородности и чистоты поверхности покрытия является степень отражающей способности, определяющая величину блеска и его сохранение на протяжении эксплуатации. Таблица 5 позволяет получить представление об изменении блеска покрытия после ускоренных испытаний.

Таблица 5

Изменение блеска покрытия после ускоренных испытаний

Воздействующий фактор	Снижение блеска, %
Термическое старение	1,5
Циклические перепады температур и влажность 98 %	4,3
Длительное УФ-излучение в сочетании с конденсацией влаги	4,8

Как видно, после ускоренных испытаний изменения блеска менее 5 %, данная величина позволяет говорить об отсутствии ощутимых изменений и поматовении покрытия.

Анализ декоративных свойств покрытий проводили по изменению степени блеска и цвета покрытий по мере экспозиции в аппарате искусственной погоды. Результаты представлены на рисунке 10.

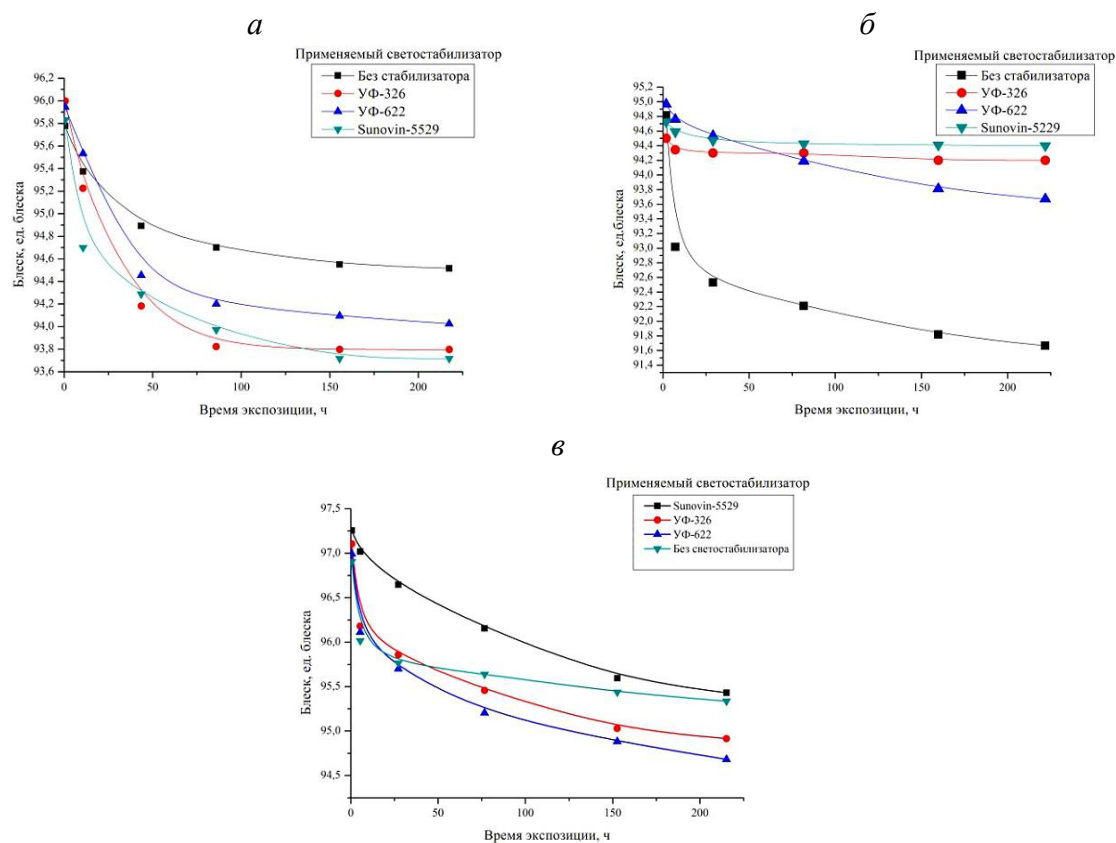


Рис. 10 – Изменение блеска лаковых покрытий при экспозиции в аппарате искусственной погоды «Atlas» а) на основе полиуретан-акрилата с массовой долей ОН-групп 4,2 %; б) на основе полиуретан-акрилата с массовой долей ОН-групп 3,0 %; в) на основе фторированного полиуретана

Установлено, что максимальную эффективность защиты от фотодеструкции лакокрасочного покрытия на основе фторированного полиуретана проявляет светостабилизатор марки Sunovin-5529, обеспечивая минимальное снижение блеска покрытия в течение 200 ч экспозиции в аппарате искусственной погоды. В случае же с покрытиями на основе акрилат-полиуретана, УФ-стабилизаторы проявили ожидаемое воздействие в составе композиции с более плотной сшитой структурой (рис. 10, б), что объясняется меньшей сорбционной активностью лакокрасочной пленки.

Поскольку сплавы металлов сегодня остаются основным конструкционным материалом изделий АТ, несмотря на ощутимый прогресс в сфере разработки композитов, немаловажным направлением развития лакокрасочных материалов является их эффективность защиты от процессов коррозии [18]. С учетом происходящих структурных изменений в покрытии при работе изделий, в том числе при воздействии атмосферных факторов, детали самолета сильно подвержены коррозионным разрушениям [19].

В этой связи проведены исследования изолирующих свойств лакокрасочных покрытий методом электронной импедансной спектроскопии. Данный метод оценки изолирующей способности покрытий получил сейчас широкое распространение и заключается в наложении на металлический образец с ЛКП переменного тока различной частоты.

На рисунке 11 представлены значения модуля импеданса покрытий на основе различных композиций.

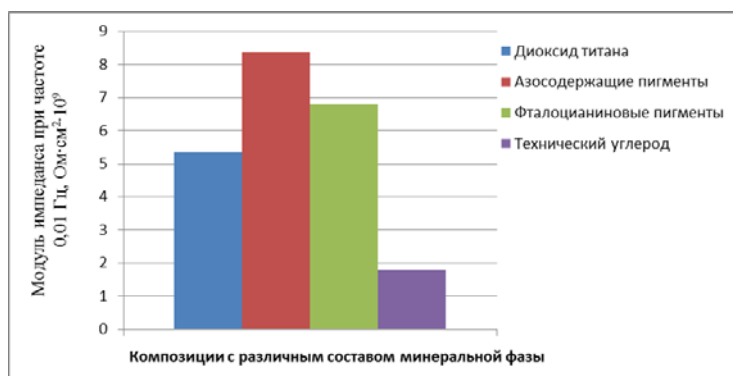


Рис. 11 – Модуль импеданса покрытий на основе композиций с различным составом дисперсной фазы в области частоты $|Z|_{f=0,01}$

В данном случае, лакокрасочная пленка и платиновый противоэлектрод создают два узла цепи, между которыми определяют комплексное сопротивление.

Наименьший модуль импеданса соответствует ЛКП с техническим углеродом в составе. Подобный результат обусловлен высокими

токопроводящими свойствами материала, содержащего углерод. Таким образом, сопротивление покрытий снижается. Модуль импеданса покрытий на основе композиций, содержащих органические пигменты (азосодержащие и фталоцианиновые), примерно на одном уровне, что обусловлено одинаковым значением электропроводности, определяющейся наличием диполей или полярных групп, содержащих атомы азота в составе хромофорных групп данных пигментов.

Наглядно уровень защитной способности покрытий проиллюстрирован на рисунке 12.



Рис. 12 – Внешний вид образцов ЛКП: а) в исходном состоянии; б) после экспозиции в камере солевого тумана с постоянным распылением 5%-го раствора NaCl при температуре 35 °С в течение 30 суток

После ускоренных коррозионных испытаний защитно-декоративные покрытия на основе модельных композиций характеризуются отсутствием коррозионных разрушений. Данный результат относится ко всем исследуемым составам и позволяет сделать вывод о высокой барьерной способности исследуемых лакокрасочных покрытий.

Заключение и выводы

Анализ методом ДСК показал, что процесс пленкообразования лака и эмали протекает с высокой интенсивностью в условиях температуры помещения. При этом пленка на основе эмали достигает завершенной степени отверждения на 3 сут выдержки при комнатной температуре.

С помощью термогравиметрического анализа образцов ЛКП установлено, что деструкция полимера в пленках начинается при

температуре >150 °С. При этом в результате деструкции потеря массы пленки на основе лака достигает 65–70 %, а на основе эмали: 42–46 %.

Испытания в аппарате искусственной погоды приводят к снижению модуля импеданса покрытий, что связано со структурными изменениями в них вследствие одновременного воздействия влажности и УФ-излучения.

Перечисленные воздействующие факторы не приводят к нарушению целостности лакокрасочной пленки и нарушению ее изолирующей способности.

Микроструктурные исследования показывают, что поверхность разработанной системы покрытия характеризуется однородностью и высокой отражательной способностью.

Применение стабилизаторов УФ-излучения аминного типа не оказывает выраженного влияния на микроструктурные параметры лакокрасочных покрытий.

Наибольшую эффективность защиты от фотодеструкции проявляют УФ-стабилизаторы в составе на основе полиуретан-акрилата, что характеризуется изменением декоративных свойств покрытий после ускоренных испытаний в аппарате искусственной погоды.

Распределение органического пигмента в среде раствора пленкообразователя происходит более равномерно, по сравнению с пигментами натурального происхождения.

ЛКП на основе углеродсодержащих модельных композиций обладает наиболее низким электрическим сопротивлением.

Литература

1. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 12. С. 7–16.

2. Каблов Е.Н., Старцев В.О Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии, 2018. № 2. С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.

3. Каблов Е.Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // Перспективные материалы. 2000. № 3. С. 27–36.

4. Железняк В.Г. Современные лакокрасочные материалы для применения в изделиях авиационной техники // Труды ВИАМ. 2019. № 5. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 17.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-62-67.

5. Беспалов А.С., Нефедов Н.И., Деев И.С., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Бузник В.М. Особенности гидрофобизации высокопористых керамических материалов с помощью фторолигомеров // Труды ВИАМ. 2019. № 5. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 17.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-41-51.

6. Павлов А.В., Андреева Н.П., Павлов М.Р., Меркулова Ю.И. Климатические испытания лакокрасочного покрытия на основе фторопласта и особенности его деструкции // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 12 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 17.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-103-110.

7. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Лебедева Т.А., Семенова Л.В. Основные направления повышения эксплуатационных, технологических и экологических характеристик лакокрасочных покрытий для авиационной техники // Российский химический Журнал, 2010. Т. LIV, № 1. С. 96–102.

8. Меркулова Ю.И., Кузнецова В.А., Новикова Т.А. Исследование свойств системы лакокрасочного покрытия на основе фторполиуретановой эмали и грунтовки с пониженным содержанием токсичных пигментов //

Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 08 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 17.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-68-75.

9. Нефедов Н.И., Салихов Т.Р., Мельников Д.А. Исследование процесса отверждения фторсодержащих олигомеров и конформных покрытий на их основе // Лакокрасочные материалы и их применение, 2015. № 1–2. С. 62–65.

10. Нефедов Н.И., Алексагин В.М., Семенова Л.В., Дерьков Д.С. Исследование кинетики отверждения и паропроницаемости модифицированных фторсодержащих олигомеров и конформных покрытий на их основе // Новости материаловедения. Наука и техника. 2017. № 2 (26). <http://www.materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/249.pdf> (дата обращения: 19.06.2022).

11. Козлова А.А., Кузнецова В.А., Козлов И.А., Наприенко С.А., Силаева А.А. Влияние длительных нагревов на свойства защитных покрытий для алюминиевого сплава системы Al-Si-Mg // Авиационные материалы и технологии, 2019. № 2. С. 74–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-74-80.

12. Краев И.Д., Попков О.В., Шульдешов Е.М., Сорокин А.Е., Юрков Г.Ю. Перспективы использования кремнийорганических полимеров при создании современных материалов и покрытий различных назначений // Труды ВИАМ. 2017. № 12 (60). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-5-5.

13. Яковлев А.Д., Яковлев С.А. Лакокрасочные покрытия функционального назначения. СПб.: Химиздат, 2016. 272 с.

14. Фомина М.А., Каримова С.А. Анализ коррозионного состояния материалов планера самолетов типа «Су» после длительных сроков эксплуатации // Коррозия: материалы, защита. 2014. № 9. С. 20–24.

15. Чеботаревский В.В., Кондрашов Э.К. Технология лакокрасочных покрытий в машиностроении. М.: Машиностроение, 1978. С. 214–220.

16. Кузнецова В.А., Куршев Е.В., Силаева А.А., Марченко С.А. Влияние фазовой структуры полимерного пленкообразующего на физико-механические и влагозащитные свойства покрытий // Труды ВИАМ. 2021. № 10. Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-87-96.

17. Кондрашов Э.К. Лакокрасочные материалы и покрытия на их основе в машиностроении. М.: Пэйнт-Медиа, 2021. 256 с.

18. Козлова А.А., Кузнецова В.А., Козлов И.А., Наприенко С.А., Силаева А.А. Влияние длительных нагревов на свойства защитных покрытий для алюминиевого сплава системы Al–Si–Mg // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2 (55). С. 74–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-74-80.

19. Фомина М.А., Каримова С.А. Анализ коррозионного состояния материалов планера самолетов типа «Су» после длительных сроков эксплуатации // Коррозия: материалы, защита. 2014. № 9. С. 20–24.

УДК 691.175:536.4

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ
НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА
ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ С УЧЕТОМ
НАТУРНОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ**

Д.Р. Низин¹, к.т.н.; Т.А. Низина¹, д.т.н.;

В.П. Селяев¹, академик РААСН, д.т.н.; И.П. Спирин¹

**MODELING THE EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON THE
PERFORMANCE PROPERTIES OF EPOXY POLYMERS TAKING
INTO ACCOUNT NATURAL CLIMATIC AGING**

D.R. Nizin¹, candidate of technical Sciences;

T.A. Nizina¹, doctor of technical Sciences;

V.P. Selyaev¹, RAASN academician; I.P. Spirin¹

nizindi@yandex.ru

*¹Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет имени Н.П. Огарёва, Саранск, Россия*

¹National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

Аннотация

Представлены результаты моделирования зависимости предела прочности при разрушении образцов ненаполненных эпоксидных полимеров в зависимости от их влагосодержания в контрольном состоянии и после длительного натурального климатического старения (4,2 года) в умеренном климате. Выявлены и проанализированы увеличение предельного влагосодержания исследуемых образцов, возникновение

точки «оптимального» влагосодержания, а также снижение предела прочности при растяжении и изменение характера его зависимости от влагосодержания под действием факторов окружающей среды.

Ключевые слова:

эпоксидные полимеры, климатическое старение, влагосодержание, предельные влажностные состояния.

Annotation

The paper presents the results of modeling the dependence of tensile strength during the failure of unfilled epoxy polymer specimens on their moisture content in the control state and after long-term field climatic aging (4.2 years) in a temperate climate. We revealed and analyzed the increase in the limiting moisture content of the specimens under study, the occurrence of the "optimal" moisture content point, as well as the decrease in tensile strength and the change in its dependence on moisture content subject to environmental factors.

Keywords:

epoxy polymers, climate aging, moisture content, extreme moisture states

Введение

Полимеры представляют собой уникальный класс материалов, поскольку позволяют получать на своей основе композиты, эксплуатационные характеристики которых варьируются в широчайшем диапазоне. При этом, безусловно, без внимания невозможно оставить вопросы долговечности полимерных композитов. Установлено, что изменение свойств материалов на основе полимерных связующих происходит преимущественно в ходе т.н. «старения» – широкой группы процессов и механизмов, инициируемых, поддерживаемых и ускоряемых воздействием окружающей среды [1–9]. Перечень факторов так или иначе

участвующих в процессе деградации полимерных материалов также крайне широк – температура и влажность воздуха, солнечное и ультрафиолетовое излучение, ветровые и пылевые нагрузки, кислород и озон, микробиологическое воздействие и т. д. С этой точки зрения наиболее сложным к прогнозированию изменения эксплуатационных характеристик полимерных материалов становится климатическое воздействие, как объединяющее практически все описанные выше действующие факторы, в сочетании с их непрерывным изменением в широком диапазоне и возникновением синергетических и нейтрализующих эффектов. Дополнительную комплексность в вопрос прогнозирования изменения свойств полимерных материалов в ходе натурального климатического старения вносит различие в интенсивности и сочетаниях действующих факторов в зависимости от климатической зоны. В совокупности это свидетельствует об актуальности разработки методик прогнозирования климатической стойкости полимерных материалов в зависимости от количественных значений факторов окружающей среды.

Одним из главных феноменов старения эпоксидных полимеров принято считать разделение изменения эксплуатационных физико-механических характеристик на обратимую и необратимую составляющие [1–3]. Последнюю, как правило, связывают с релаксационными процессами, протекающими на ранних этапах старения полимерных композитов, разрушением поверхностного слоя вследствие совместного действия эрозионных нагрузок, ультрафиолетового излучения и озонового старения и т. д. [2]. Обратимое же изменение свойств эпоксидных полимеров и композитов обусловлено изменением их влажностного состояния. Разброс прочностных показателей в предельных равновесно-влажностных состояниях достигает 30 % для авиационных композитов и 50 % для ненаполненных эпоксидных полимеров [1, 10–12]. В обоих случаях изменение механической прочности образцов в зависимости от их

влажностного содержания носит монотонный характер. При этом максимальному значению предела прочности при растяжении соответствовало состояние минимального содержания сорбированной влаги, достигаемое посредством методик, регламентированных ГОСТ Р 56762–2015 «Композиты полимерные. Метод определения влагопоглощения и равновесного состояния».

Длительное натурное климатическое старение, безусловно, сопровождается снижением механической прочности полимерных материалов и композитов. Однако, для полимерных композитов в процессе климатического воздействия форма зависимости прочности от влагосодержания сохраняется – «высушенному» состоянию по-прежнему соответствует максимальная прочность образцов при растяжении [13]. Отличная ситуация наблюдается для образцов ненаполненных эпоксидных полимеров. Наряду со снижением механических характеристик для исследуемых составов отмечается кратное падение предела прочности в «высушенном» состоянии. Учитывая монотонный характер изменений в контрольном состоянии, можно утверждать, что в процессе климатического старения ненаполненных эпоксидных полимеров точка, соответствующая максимальной механической прочности, смещается из окрестности состояния, преимущественно свободного от сорбированной влаги, в сторону некоторого «оптимального» влагосодержания [13].

В работе представлены результаты исследования зависимости механической прочности образцов ненаполненных эпоксидных полимеров от их влагосодержания в контрольном состоянии и после 4,2 лет (1533 дня) натурального экспонирования в условиях умеренного климата (г. Саранск). Сформулированы особенности изменения зависимости механической прочности ненаполненных эпоксидных полимеров от влагосодержания в процессе натурального климатического старения. Предложены возможные пути установления реального диапазона варьирования механической

прочности полимерных материалов в зависимости от их влагосодержания с учетом натурального климатического старения.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования выступили образцы типа 2 (ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение»), изготовленные из эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителей 4 марок – Этал-1460, Этал-1472, Этал-45М и Этал-45TZ2 (все компоненты – производства АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ»). Эпоксидная смола Этал-247 представляет собой модифицированную эпоксидную смолу с массовой долей эпоксидных групп не менее 21,4÷22,8 % и вязкостью по Брукфильду при 25 °С в диапазоне 650÷750 СПз. Этал-1460 и Этал-1472 представляют собой отвердители аминного типа; Этал-45М – смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов, модифицированную салициловой кислотой; Этал-45TZ2 – отвердитель полиамидного типа.

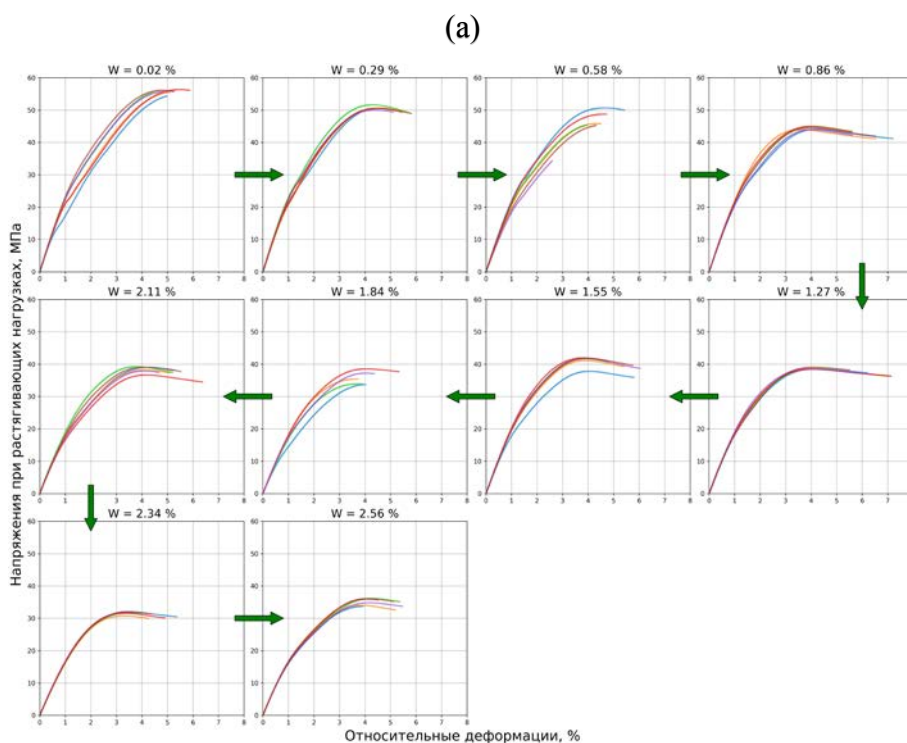
Образцы экспонировались на испытательной площадке научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз НИ МГУ им. Н.П. Огарёва (г. Саранск, умеренный климат). Доведение образцов до состояния, преимущественно свободного от сорбированной влаги, осуществлялось путем сушки при 60 °С до постоянной массы. Приведение образцов к целевым уровням влагосодержания осуществлялось путем полного погружения в дистиллированную воду при 60 °С. Перед проведением механических испытаний образцы кондиционировали в эксикаторе при нормальных условиях в течение не менее чем 24 часов (ГОСТ Р 56762-2015 «Композиты полимерные. Метод определения влагопоглощения и равновесного состояния»). В каждой экспериментальной точке (соответствующей некоторому среднему арифметическому значению влагосодержания серии образцов) как для

контрольной серии, так и для образцов после натурального климатического старения испытывалось не менее 6 образцов.

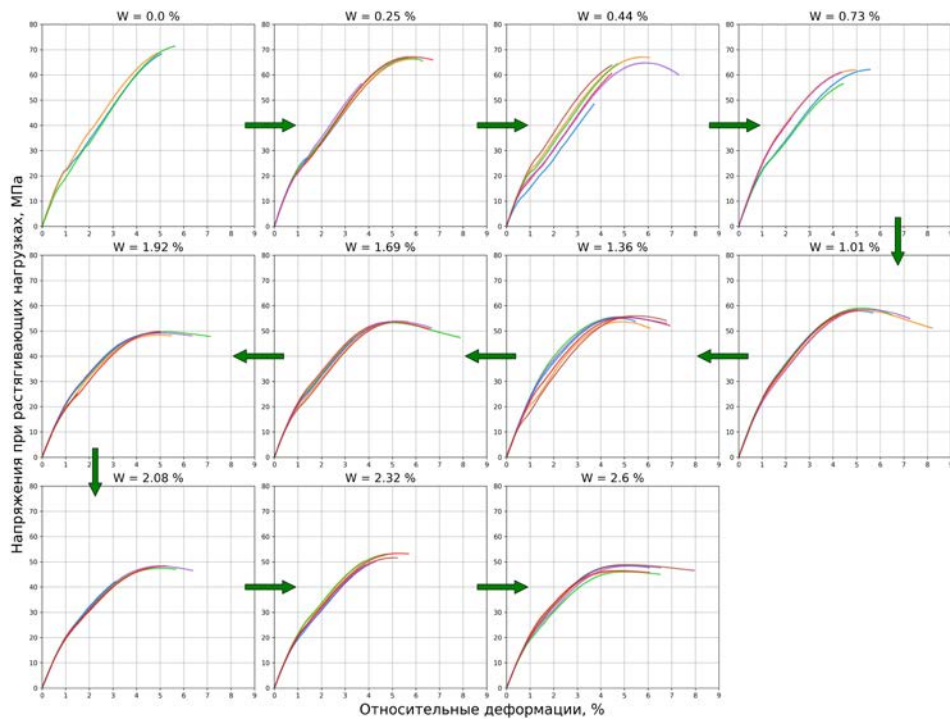
Механические испытания образцов на растяжение осуществлялись на разрывной машине серии AGS-X с программным обеспечением TRAPEZIUM X при нормальных условиях. Скорость перемещения зажимов испытательной машины составляла 2 мм/мин.

Результаты и обсуждение

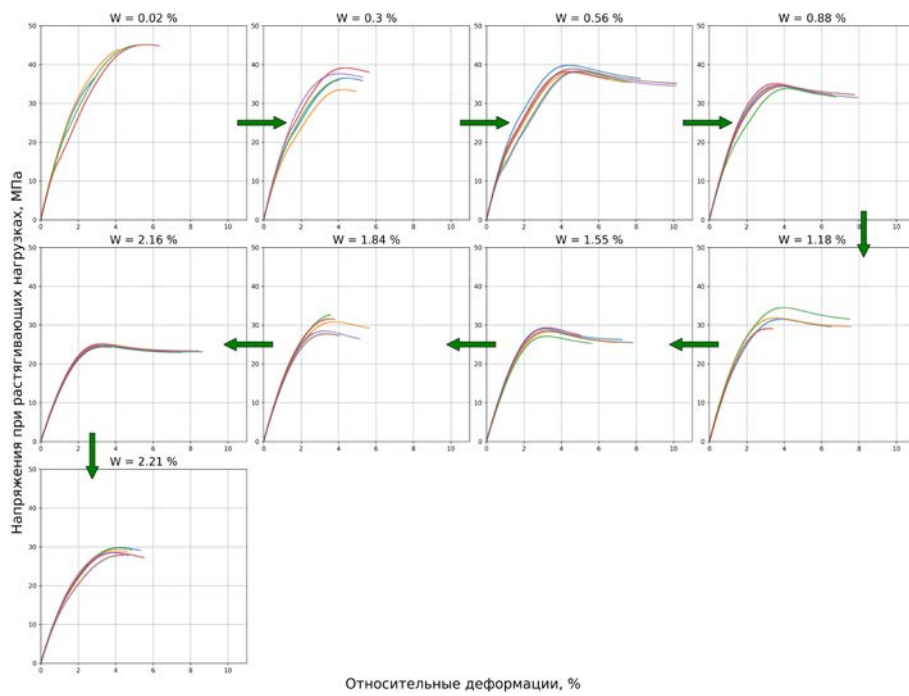
На рисунке 1 представлены наборы кривых «Напряжения – относительные деформации» для последовательно увеличивающегося влагосодержания серий образцов 4 исследуемых составов в контрольном состоянии. Подобное представление данных позволяет, с одной стороны, подтвердить монотонный характер изменения предела прочности при растяжении образцов в зависимости от их влагосодержания. С другой стороны – количественно локализовать переходы, связанные с изменением характера разрушения образцов – от хрупкого к высокоэластическому (рис. 1, а–в) и вязкотекучему (рис. 1, г).



(б)



(в)



(г)

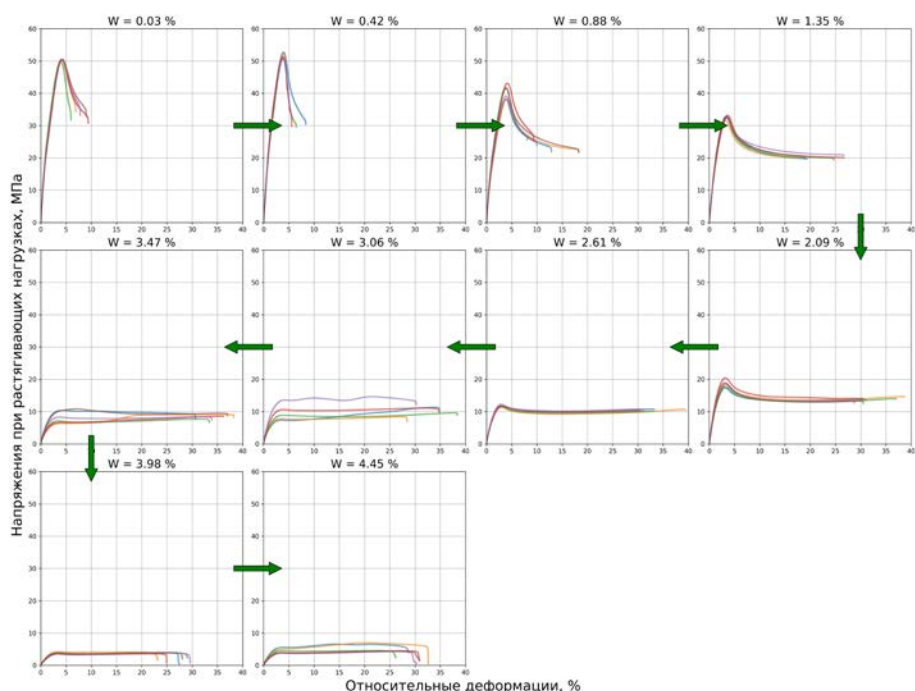
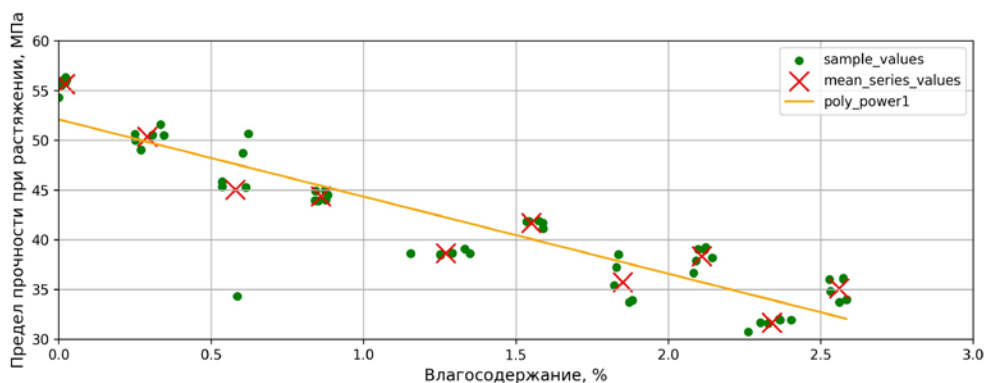


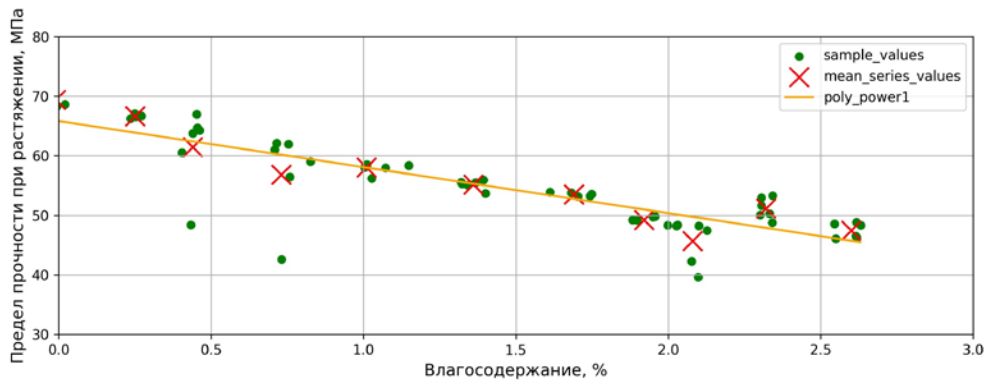
Рис. 1 – Изменение кривых «Напряжение – относительные деформации» в зависимости от влагосодержания серий образцов на основе Этал-247 и Этал-1460 (а), Этал-1472 (б), Этал-45М (в) и Этал-45TZ2 (г) в контрольном состоянии

Полученные наборы точек в координатах «предел прочности при растяжении – влагосодержание» позволяют перейти к расчетному определению данных показателей на всем диапазоне варьирования значений влагосодержания. На рисунках 2 и 3 приведены варианты аппроксимации представленных данных полиномами первого и второго порядков соответственно.

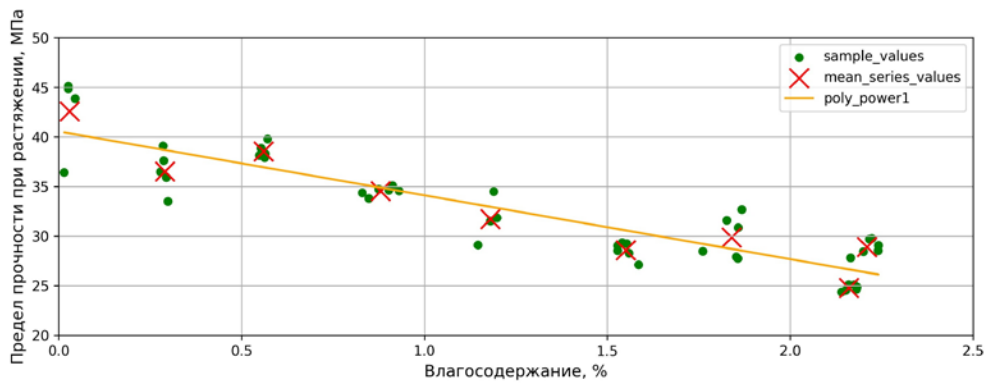
(а)



(б)



(в)



(г)

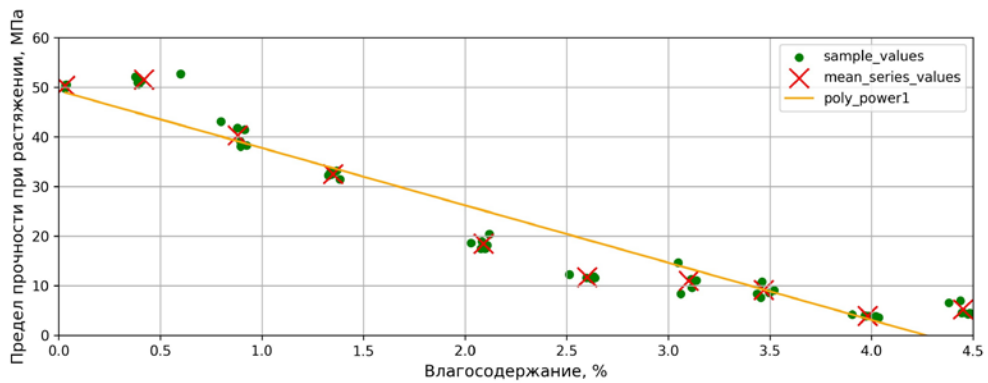


Рис. 2 – Аппроксимация зависимости предела прочности при растяжении образцов ненаполненных эпоксидных полимеров от их влагосодержания с помощью полинома первого порядка для отвердителей Этал-1460 (а), Этал-1472 (б), Этал-45М (в) и Этал-45TZ2 (г)

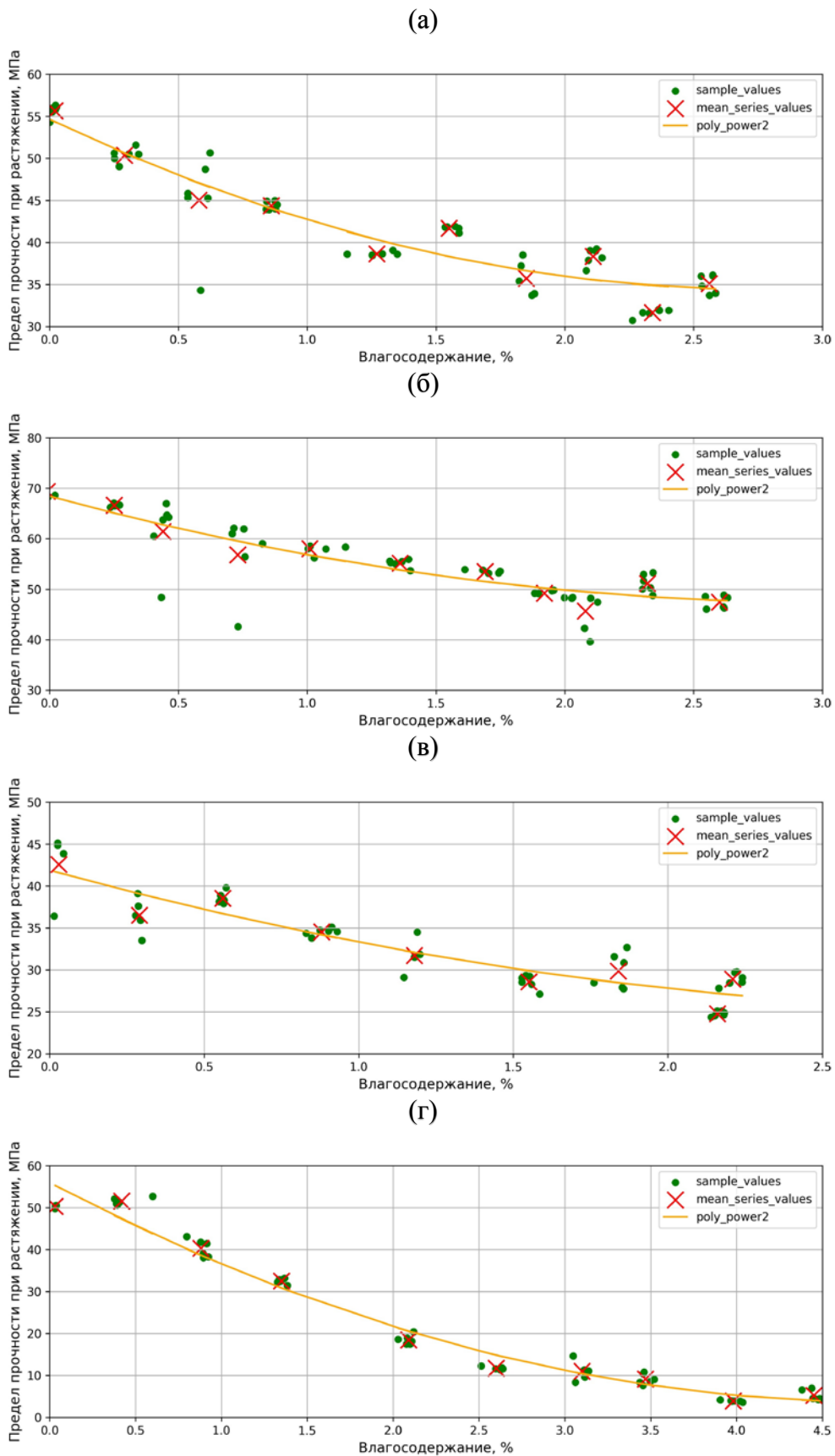


Рис. 3 – Аппроксимация зависимости предела прочности при растяжении образцов ненаполненных эпоксидных полимеров от их влагосодержания с помощью полинома второго порядка для отвердителей Этал-1460 (а), Этал-1472 (б), Этал-45М (в) и Этал-45TZ2 (г)

Коэффициенты полиномиального уравнения первого (рис. 2) и второго порядка (рис. 3), а также метрики качества прогнозирования с использованием предложенных уравнений представлены в таблицах 1 и 2 соответственно. Полученные значения позволяют утверждать наличие сильной корреляционной связи между исследуемым показателем в обоих случаях. При этом, несмотря на формальное повышение точности прогнозирования при переходе к полиному второго порядка, использование полинома первого порядка позволяет получать коэффициенты прямой на основе результатов испытаний всего 2 серий образцов – в состоянии, преимущественно свободном от сорбированной влаги, и любом другом – с отличным значением влагосодержания. Данный факт косвенным образом указывает на существование различия в изменении механической прочности на единицу прироста влагосодержания в зависимости от локализации относительно «высушенного» состояния. Т.е. на единицу прироста влагосодержания в окрестностях $W = 0\%$ приходится большее изменение механической прочности, чем в окрестностях $W = W_{max}^0$.

Таблица 1

Коэффициенты полиномиального уравнения первого порядка и метрики качества (контрольное состояние) зависимости предела прочности образцов при растяжении от их влагосодержания

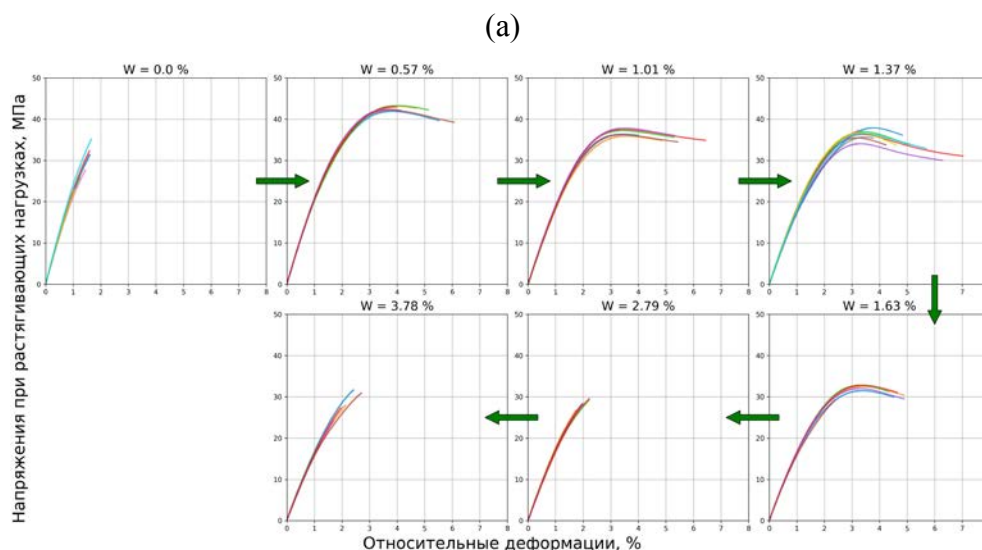
Вид отвердителя	Этал-1460	Этал-1472	Этал-45М	Этал-45TZ2
b0	52,1	65,82	40,55	49,33
b1	-7,76	-7,73	-6,436	-11,56
Коэффициент детерминации (R^2)	0,815	0,709	0,804	0,925
Среднеквадратичная ошибка (RMSE)	3,14	4,03	2,38	4,76
Средняя абсолютная ошибка (MAE)	2,53	2,55	2,02	3,67

Таблица 2

Коэффициенты полиномиального уравнения второго порядка и метрики качества (контрольное состояние) зависимости предела прочности образцов при растяжении от их влагосодержания

Вид отвердителя	Этал-1460	Этал-1472	Этал-45М	Этал-45TZ2
b0	54,64	68,43	41,89	55,98
b1	-14,62	-13,85	-10,12	-21,64
b2	2,64	2,27	1,53	2,24
Коэффициент детерминации (R2)	0,858	0,737	0,819	0,974
Среднеквадратичная ошибка (RMSE)	2,75	3,83	2,29	2,82
Средняя абсолютная ошибка (MAE)	2,07	2,39	1,91	2,31

На рисунке 4 представлены наборы кривых «Напряжения – относительные деформации» для последовательно увеличивающегося влагосодержания серий образцов 4 исследуемых составов после натурального экспонирования в условиях умеренного климата (4,2 года).



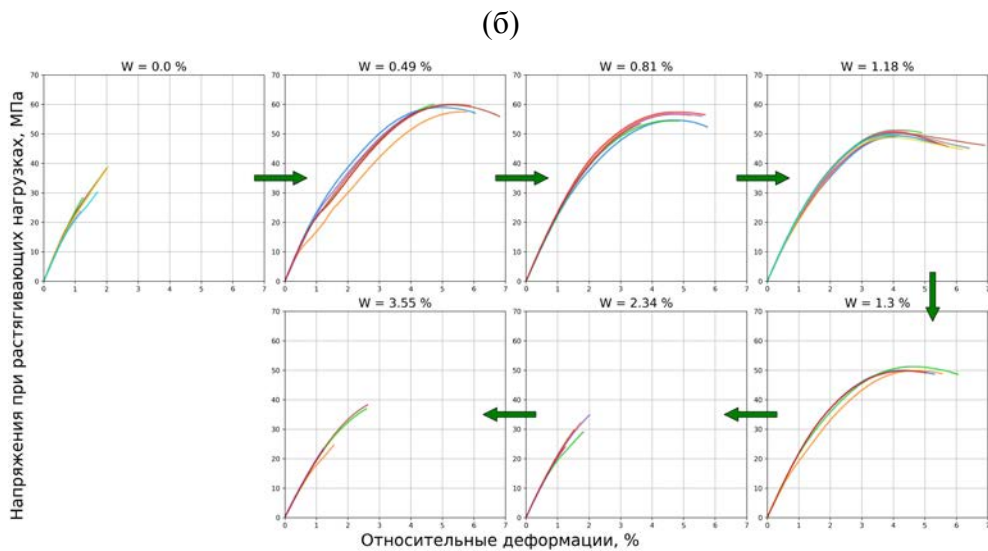


Рис. 4 – Изменение кривых «Напряжение – относительные деформации» в зависимости от влагосодержания серий образцов на основе Этал-247 и Этал-1460 (а), Этал-1472 (б), Этал-45М (в) и Этал-45TZ2 (г) после натурального климатического старения в умеренном климате (4,2 года)

Согласно [13], процесс натурального климатического старения в возрасте (до 18 месяцев включительно) сопровождается преимущественно снижением предельного влагосодержания образцов эпоксидных полимеров – на 9–27 % в зависимости от исследуемого состава. Значения предельного влагосодержания для образцов контрольного состава и после натурального экспонирования в течение 4,2 лет в умеренном климате (г. Саранск) представлены в таблице 3.

Таблица 3

Предельное влагосодержание образцов исследуемых эпоксидных полимеров в контрольном состоянии и после натурального климатического старение

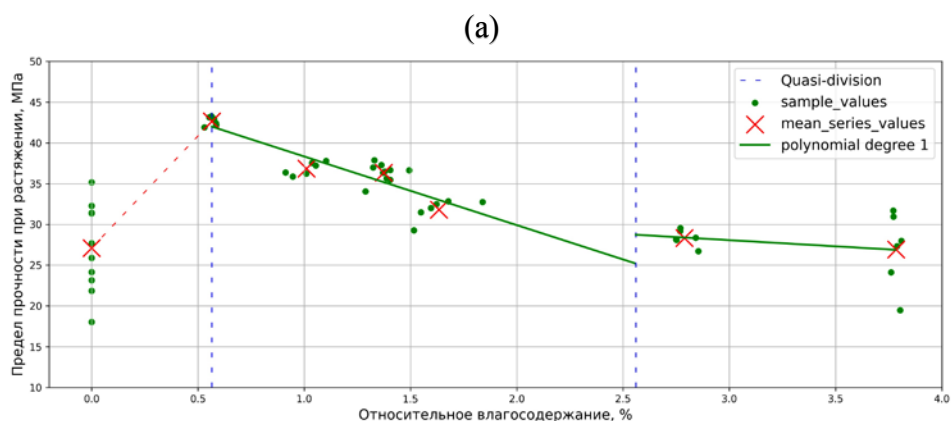
	Предельное влагосодержание, %			
	Этал-1460	Этал-1472	Этал-45М	Этал-45TZ2
Контрольная серия	2,56	2,6	2,21	4,45
4,2 года (1533 дня) экспонирования в условиях умеренного климата (г. Саранск)	3,78	3,55	3,16	7,26

В зависимости от состава, прирост предельного влагосодержания образцов составил от 37 до 63 %. При этом также наблюдается изменение характера разрушения образцов с последовательным ростом влагосодержания. Для всех без исключения составов по мере движения влагосодержания от 0% к W_{max}^{ag} наблюдается последовательное изменение характера разрушения от хрупкого к высокоэластическому и обратно к хрупкому. Причем для всех значений влагосодержания близких или превышающих W_{max}^0 – предельное влагосодержание состава в контрольном состоянии, отмечается хрупкий характер разрушения образцов (рис. 4, а–г).

Для анализа зависимости предела прочности при растяжении от влагосодержания образцов после натурального климатического старения, весь диапазон влагосодержания был условно разделен на 3 участка:

- 1) Окрестности «высушенного» состояния – от 0% до положения экспериментальной точки с минимальным значением влагосодержания W_1^{ag} ;
- 2) От W_1^{ag} до положения точки предельного влагосодержания состава в контрольном состоянии W_{max}^0 ;
- 3) От W_{max}^0 до положения точки предельного влагосодержания состава после натурального климатического старения W_{max}^{ag} .

На рисунке 5 представлены результаты графического отображения полученных результатов для 4 исследуемых составов. Аппроксимация представленных значений осуществлялась отдельно для данных, расположенных на условных втором и третьем участках влагосодержания. Имеющиеся данные не позволяют количественно определить положение точки «оптимального» влагосодержания, соответствующей максимальному значению механической прочности образцов при растяжении. Однако, мы можем локализовать её расположение на участке 1 – в окрестностях малых значений влагосодержания.



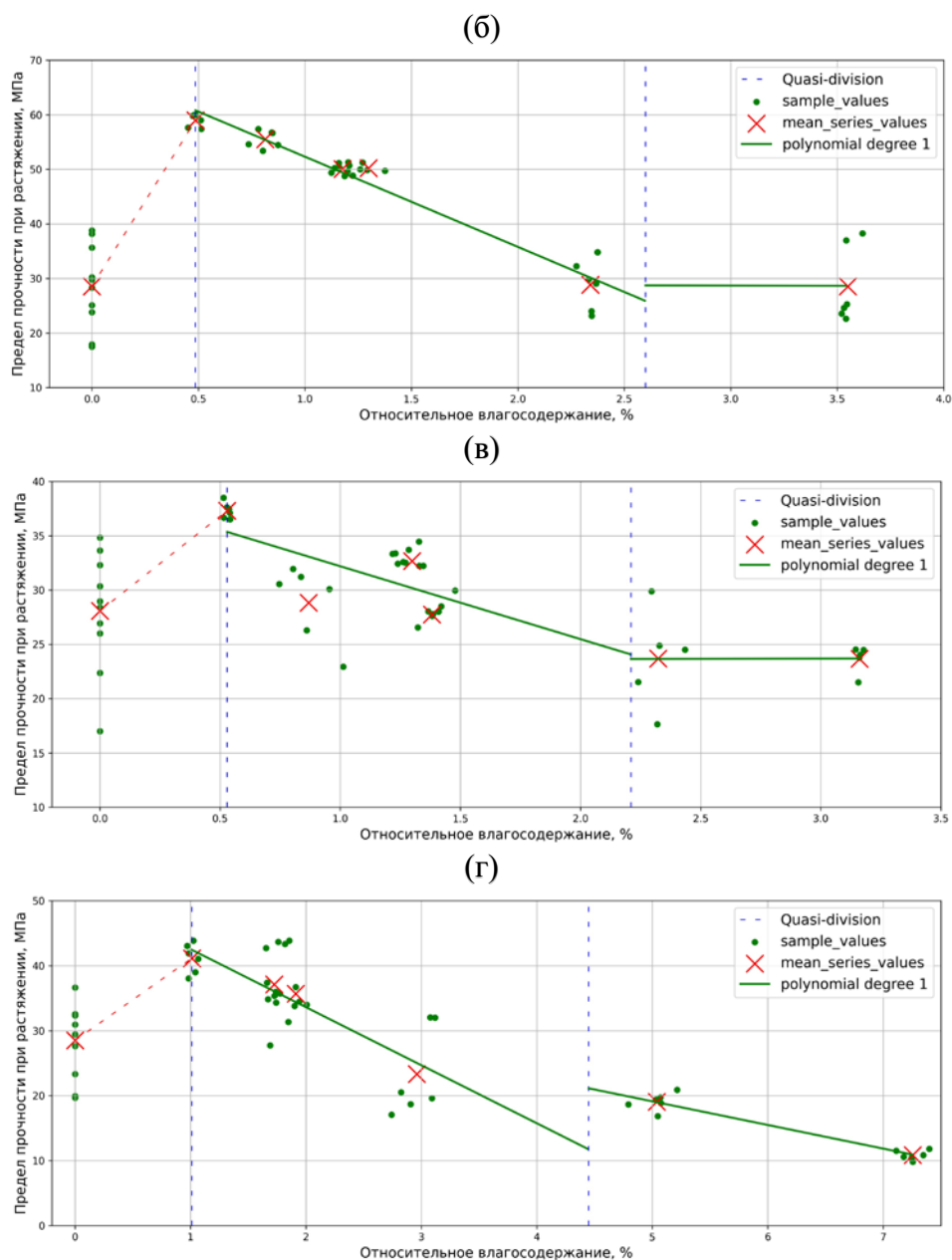


Рис. 3 – Аппроксимация зависимости предела прочности при растяжении образцов ненаполненных эпоксидных полимеров от их влагосодержания с помощью полинома первого порядка для отвердителей Этал-1460 (а), Этал-1472 (б), Этал-45М (в) и Этал-45TZ2 (г) после натурального климатического старения в умеренном климате (4,2 года)

Отдельного рассмотрения заслуживает участок 3 – за «границами» предельного влагосодержания образцов исследуемого состава в контрольном состоянии. В целом, аппроксимация данных на этом участке приводит к получению прямой, параллельной оси абсцисс. Что, в свою очередь, указывает на практическую неизменность механической

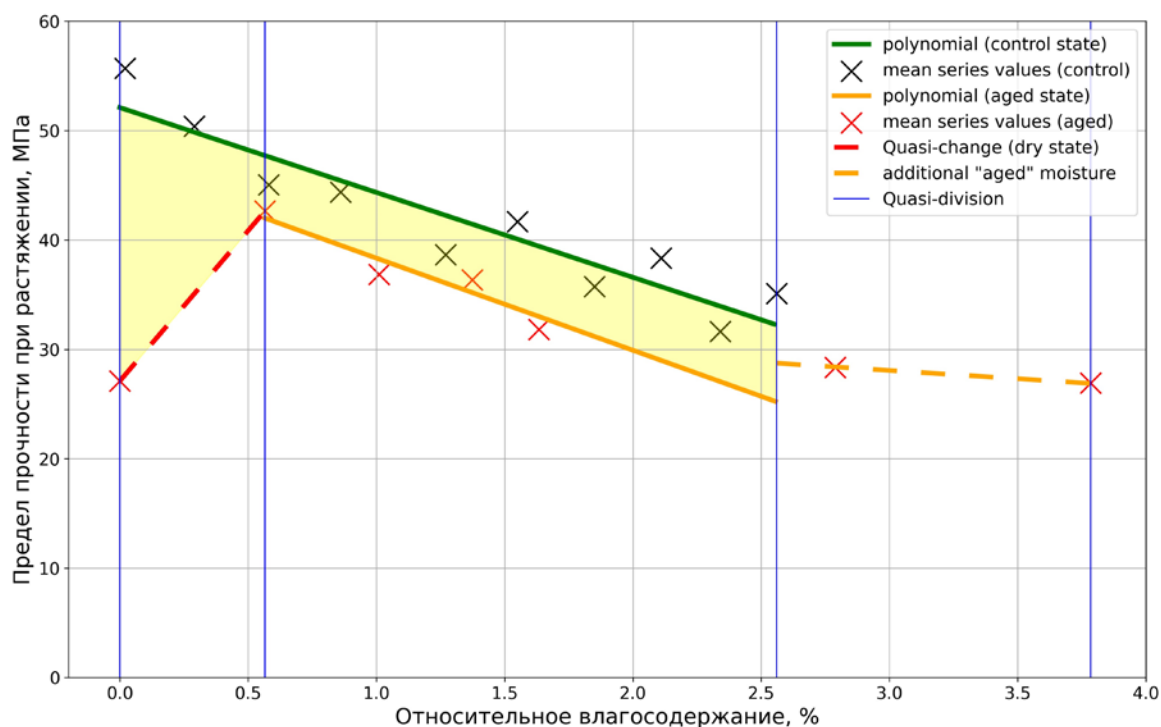
прочности образцов на данном участке, вне зависимости от изменения влагосодержания образцов. Похожий эффект наблюдался для 3D-печатных образцов на основе PETG-пластика [14]. В силу особенностей аддитивного формирования структуры, для 3D-печатных образцов предложено разделять общее значение влагосодержания на микро- и макроуровни. Влага, сорбированная микроуровнем – уровнем молекулярной структуры материала печати – приводит к изменению механических свойств образцов. В то время как влага макроуровня, представляющая собой воду, локализованную в свободном объеме, возникающем как следствие послойной укладки материала при изготовлении образцов, не оказывает статистически значимого влияния на изменение предела прочности образцов при растяжении. При этом в зависимости от параметров печати, содержание влаги на макроуровне превышает данный показатель на микроуровне в 2–6 раз. Единственный установленный эффект от сорбированной макроуровнем влаги заключается в снижении уровня относительных деформаций при разрыве, что, предположительно, позволяет рассматривать её в качестве потенциального дефекта структуры и, как следствие, концентратора напряжений.

Известно, что процесс деградации любого композиционного материала сопровождается образованием в его структуре микродефектов. Очевидно, что аналогичные процессы протекают и в структуре ненаполненных эпоксидных полимеров под действием натурального климатического старения. При этом процессы старения полимеров сопровождаются не только выходом из строя структурных элементов, но и их взаимной ограниченной ротацией с предельным целевым состоянием в виде минимального значения потенциальной энергии системы. Полученные данные позволяют предположить, что к данному сроку натурального климатического старения (4,2 года в умеренном климате) образцы ненаполненных полимерных материалов претерпели такое число

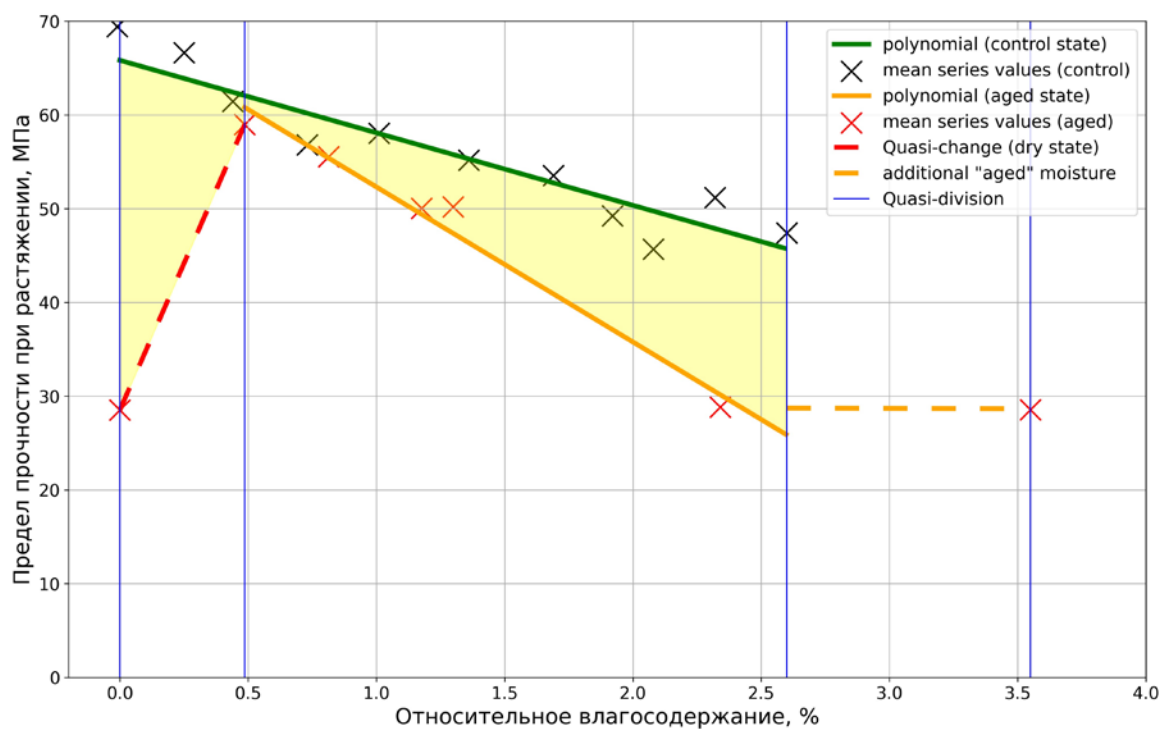
актов выхода из строя элементов структуры, что последующие акты релаксации привели к проявлению свободного объема на масштабном уровне, отличном от того, что воспринимает сорбируемую влагу в контрольном состоянии. Похожий по сути процесс описывает поведение материала под нагрузкой – образование локальных микродефектов, их накопление до некоторого критического уровня с последующим лавинообразным объединением, проявлением магистральной трещины и разрушением. Вероятно, схожий процесс объединения локальным микродефектов в дефекты более высокого масштабного уровня лежит в основе существенного увеличения предельного влагосодержания образцов после климатического старения.

На рисунке 6 приведены аппроксимационные полиномы первого порядка, полученные для образцов исследуемых составов в контрольном состоянии и после климатического старения. Коэффициенты аппроксимационных уравнений для участков 2 и 3 – в таблице 4.

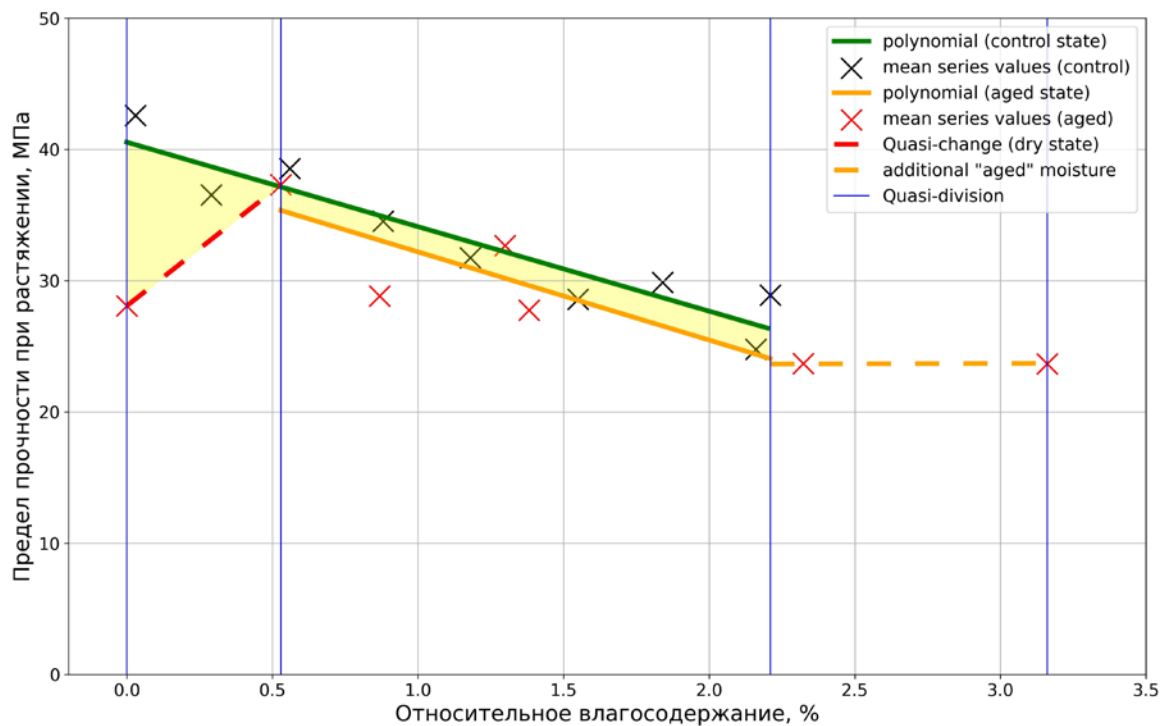
(a)



(б)



(в)



(г)

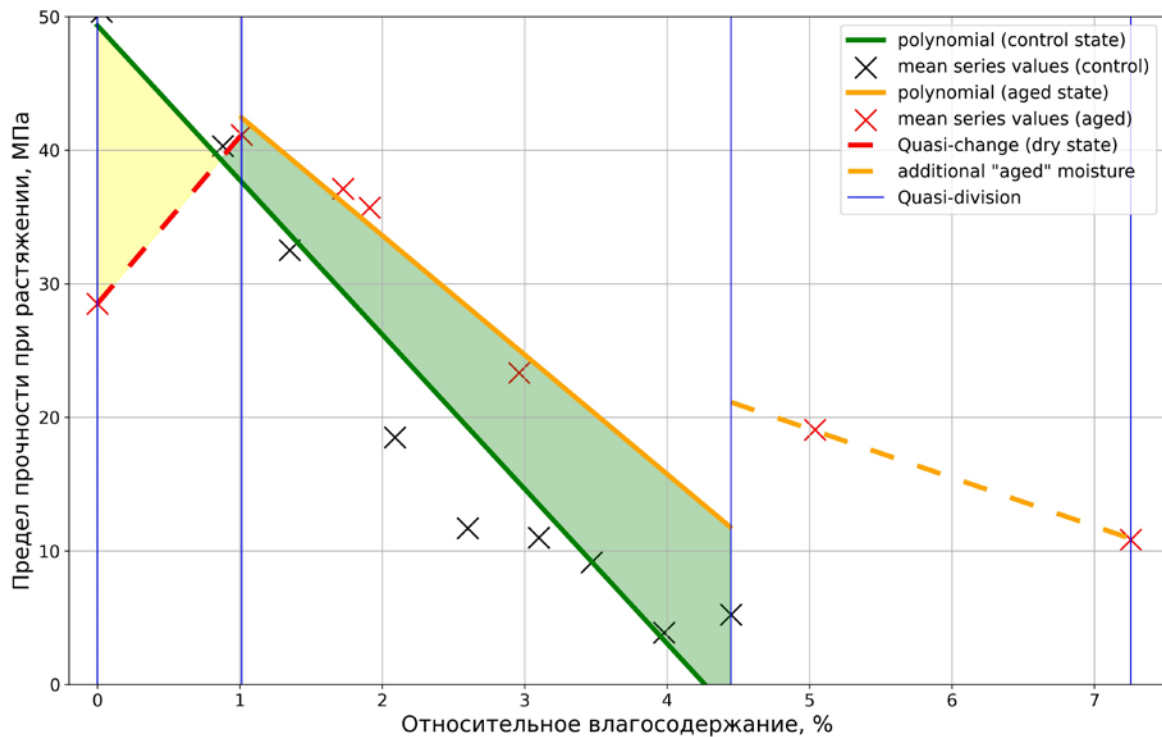


Рис. 6 – Аппроксимация зависимости предела прочности при растяжении образцов ненаполненных эпоксидных полимеров от их влагосодержания с помощью полинома первого порядка для отвердителей Этал-1460 (а), Этал-1472 (б), Этал-45М (в) и Этал-45TZ2 (г) для контрольного состояния и после натурального климатического старения в умеренном климате (4,2 года)

Таблица 4

Коэффициенты полиномиального уравнения первого порядка и метрики (4,2 года климатического старения) качества зависимости предела прочности образцов при растяжении от их влагосодержания (участок 2)

Вид отвердителя	Этал-1460	Этал-1472	Этал-45М	Этал-45TZ2
Участок 2				
b0	46,75	68,84	38,91	51,48
b1	-8,42	-16,53	-6,72	-8,93
Коэффициент детерминации (R2)	0,78	0,94	0,34	0,57
Среднеквадратичная ошибка (RMSE)	1,73	2,54	3,14	5,04
Средняя абсолютная ошибка (MAE)	1,42	1,91	2,62	3,8
Участок 3				
b0	32,6	28,89	23,53	37,32
b1	-1,51	-0,06	0,05	-3,63

Согласно представленным данным, наибольшее падение прочности в процессе натурального климатического старения наблюдается именно в

окрестностях состояния, преимущественно свободного от сорбированной влаги. В зависимости от состава, оно может достигать 50 % и более от предела прочности в контрольном состоянии. При этом, в границах диапазона влагосодержания от W_1^{ag} до W_{max}^0 изменение механической прочности существенно ниже и, что важно, практически не зависит от влагосодержания образцов. А с учетом возникновения участка влагосодержания за границей W_{max}^0 , в целом, можно утверждать о постепенном снижении степени отклика структуры полимерного материала на изменение влагосодержания в процессе натурального климатического старения для образцов на основе отвердителей Этал-1460 и Этал-45М. Следует отметить, что для образцов на основе отвердителя Этал-1472 в процессе натурального климатического старения, напротив, наблюдается повышение степени отклика материала на изменение влагосодержания. А для состава на основе отвердителя Этал-45TZ2 за пределами W_1^{ag} наблюдается существенный прирост механической прочности, сопровождающийся при этом кратным снижением относительного удлинения. В целом, для состава на основе данного отвердителя более точную оценку могу дать полиномиальные уравнения второго порядка, что, однако, не отменяет факта повышения механической прочности в процессе натурального климатического старения. В качестве возможной причины различия вклада натурального климатического старения в изменение характера зависимости предела прочности при растяжении образцов ненаполненных эпоксидных полимеров от влагосодержания можно рассматривать различие в химической природе используемых отвердителей.

Заключение

Представленные в работе результаты, с одной стороны, указывают на необходимость понимания полного диапазона варьирования

механической прочности эпоксидных полимеров в зависимости от влагосодержания. Тем более, как было показано, для его определения достаточно проведения разрушающих испытаний 2 серий образцов – в «высушенном» состоянии и при любом другом значении влагосодержания. С другой стороны, отмечается различие в характере изменения кривых зависимости механической прочности от влагосодержания в зависимости от используемого отвердителя. Возникновение области за пределами предельного влагосодержания образцов в контрольном состоянии указывает на высокую степень деградации структуры ненаполненных эпоксидных полимеров и, потенциально, может быть использовано в качестве количественного критерия оценки степени деградации. Дальнейшие исследования требуют уточнения механизмов перемещения точки «оптимального» влагосодержания (соответствующей максимальному значению механической прочности) из окрестностей «высушенного» состояния, установления их связи с количественными значениями действующих факторов окружающей среды, а также установления общей модели, описывающей изменение эксплуатационных характеристик эпоксидных полимеров от их влагосодержания с учетом натурального климатического старения.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00206, <https://rscf.ru/project/22-79-00206/>

Литература

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // Деформация и разрушение материалов. Москва, 2010. № 11. С. 19–27.

2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравномерности градиент свойств по толщине // Деформация и разрушение материалов. Москва, 2010. № 12. С. 40–46.

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

4. Startsev O.V., Krotov A.S., Golub P.D. Effect of climatic and radiation ageing on properties of glass fiber reinforced plastic VPS-7 // International journal of polymeric materials. 1998, Vol. 41. № 3–4. P. 263–273.

5. Kablov E.N., Startswv V.O. Climatic aging of aviation polymer composite materials: I. influence of significant factors // RUSSIAN METALLURGY (METALLY). 2020. Vol. 4. P. 364–372.

6. Старцев В.О. Методы исследования старения полимерных связующих // Клеи. Герметики. Технологии. 2020. № 9. С. 16–26.

7. Lettieri M., Frigione M. Natural and artificial weathering effects on cold-cured epoxy resins // Journal of Applied Polymer Science, 2011. Vol. 119, Is. 3. P. 1635–1645.

8. Marouani S., Curtil L., Hamelin P. Ageing of carbon/epoxy and carbon/vinyl ester composites used in the reinforcement and/or the repair of civil engineering structures // Composites Part B: Engineering, 2012. Vol. 43, Is. 4. P. 2020–2030.

9. Collins T.A. Moisture management and artificial ageing of fibre reinforced epoxy resins // Composite Structures 5. Elsevier applied science. 1989. P. 213–239.

10. Nizin D.R., Nizina T.A., Selyaev V.P., Chernov A.N., Gorenkova A.I. Natural Climatic Aging of Epoxy Polymers Tasking into Account the Seasonality Impact // *Key engineering materials*. 2019. Vol. 799. P. 159–165.

11. Климатические испытания строительных материалов / под общ. ред. д-ра техн. наук проф. О.В. Старцева, акад. РААСН д-ра техн. наук проф. В.Т. Ерофеева, акад. РААСН д-ра техн. наук проф. В.П. Селяева. – М.: Издательство АСВ, 2017. 558 с.

12. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р. Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате: монография. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020. 188 с.

13. Nizin, D.R., Nizina, T.A., Selyaev, V.P., Spirin, I.P. (2024). Dependence of Elastic-Strength Properties of Epoxy Polymers on Moisture Content in the Process of Natural Climatic Aging in Conditions of a Temperate Continental Climate. In: Klyuev, S.V., Vatin, N.I., Sabitov, L.S. (eds) *Industrial and Civil Construction 2022. ISCICC 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 436. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44432-6_16.

14. Низин Д.Р., Низина Т.А., Марьянова А.В., Миронов Е.Б. Влагопоглощение 3D-печатных образцов PETG-пластика // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. Вып. 7. С. 1078–1088. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.7.

УДК 678.067.5

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭПОКСИДНЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ
В РАДИОПРОЗРАЧНЫХ АНТЕННЫХ УКРЫТИЯХ
МОБИЛЬНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ**

А.А. Баранов¹; Г.С. Шуль¹, канд. техн. наук;

А.А. Ширко¹; Р. М. Гуськов¹

**EXPERIENCE IN THE USE OF EPOXY FIBERGLASS
PLASTICS IN RADIO-TRANSPARENT ANTENNA COVERS
OF MOBILE RADAR STATIONS**

Alexey A Baranov¹; Galina S Shul¹, Cand. Techn. Sc;

Anatoly A Shirko¹; Roman M Guskov¹

baranovaa@technologiya.ru

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Калужская обл., Россия

¹«JSE «Technologiya» named after A.G. Romashin», Obninsk, Kaluga Region, Russia

Аннотация

В данной работе рассмотрены основные параметры разработки и изготовления тонкостенных радиопрозрачных укрытий, комплектующих мобильные наземные и корабельные радиолокационные станции (РЛС). Представлены физико-механические характеристики используемых материалов и рассмотрен ряд конструктивно-технологических факторов, влияющих на качество формуемых изделий.

Ключевые слова:

радиопрозрачные изделия, композиционные материалы, стеклопластик, формование, сотовая конструкция

Abstract

This paper examines the main parameters of the development and manufacture of thin-walled radio-transparent shelters that are components for mobile ground and ship-based radar stations. The physical and mechanical characteristics of the materials used are presented and a number of design and technological factors influencing the quality of molded products are considered.

Keywords:

radio-transparent products, composite materials, fiberglass plastic, molding, honeycomb sandwich

Нашим предприятием накоплен большой опыт по разработке технологии и изготовлению стеклопластиковых бескаркасных радиопрозрачных укрытий (РПУ) коробчатой, сферической и иной формы с различными габаритными размерами (от 0,5 до 8,5 метров по длине) и конструкцией радиопрозрачной стенки. Более 20 лет мы занимаемся этой проблематикой и в данной работе будут охвачены некоторые аспекты изготовления радиопрозрачных изделий, комплектующих радиолокационные станции.

Эффективность работы РЛС в значительной степени зависит от характеристик радиотехнических изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), комплектующих антенные системы. В числе первых к таким изделиям относятся радиопрозрачные укрытия, защищающие оборудование антенных решеток от воздействия внешних силовых и климатических факторов [1].

Для проектирования радиопрозрачных изделий кроме климатических факторов одними из определяющих параметров разработки являются рабочий диапазон частот и сектор углов падения радиоволны. Так, в

диапазоне длинных радиоволн радиотехнические требования выполняются практически при любых условиях и выбор применяемой технологии изготовления и материалов определяется в основном прочностными и диэлектрическими свойствами материала изделия, необходимой долговечностью и стоимостью. В таких случаях функции защитных укрытий могут успешно выполнять стеклопластиковые изделия с монолитной конструкцией радиопрозрачной стенки, изготовленные наиболее простым и распространенным методом контактного формования. Увеличение габаритных размеров радиопрозрачных изделий, переход диапазона рабочих частот РЛС более близко к области миллиметровых длин волн делает наиболее оптимальными многослойные сэндвич-конструкции радиопрозрачной стенки, позволяющие получать достаточно легкие, прочные и жесткие изделия, и технологические процессы, обеспечивающие более точное соблюдение толщин ее элементов.

Ниже на рисунках 1 и 2 в качестве примера представлены мобильные радиолокационные станции, антенные решетки которых защищены изготовленными на нашем предприятии радиопрозрачными укрытиями. Основными заказчиками наших изделий являются предприятия АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» (АО «ВНИИРТ», АО «МЗ РИП», АО «ННИИРТ»).



Рис. 1 – Мобильная радиолокационная станция «Гамма-С1»



Рис. 2 – Мобильная радиолокационная станция «Подлёт-К1»

К защитным радиопрозрачным укрытиям, как правило, предъявляются требования по стойкости к следующим основным внешним воздействующим факторам: синусоидальная вибрация, повышенная и

пониженная температура среды (от минус 70 до плюс 65 °С), солнечное излучение, атмосферные осадки, статическая и динамическая пыль (песок), воздушный поток (до 50 м/с). При этом укрытия должны сохранять свое главное функциональное свойство – радиопрозрачность и значения коэффициента прохождения радиоволны – не менее 95 %.

Типовыми армирующими материалами в конструкциях радиотехнического назначения являются волокнистые материалы, изготавливаемые из стекол различного химического состава. Это могут быть ткани из волокон на основе алюмоборосиликатного, магнийалюмосиликатного, натрийборосиликатного, кварцевого и других видов стекол специального состава. В наших изделиях, как правило, используются конструкционные стеклоткани на основе алюмоборосиликатного стекла.

Следующим элементом ПКМ, в значительной степени определяющим его эксплуатационные характеристики, является связующее, обеспечивающее совместность работы армирующих волокон, распределение действующих напряжений по объему материала и фиксацию формы конечного изделия. Природой связующего (матрицы) задаётся допустимый диапазон рабочих температур композиционных материалов, характер изменения их свойств при воздействии различных эксплуатационных факторов [2, 3]. В процессе выбора связующего необходимо учитывать также его технологические свойства, которые в значительной степени определяют набор допустимых способов и режимов получения и переработки материалов в изделия. По литературным данным при изготовлении радиопрозрачных конструкций наиболее широкое распространение получили эпоксидные, фенолоформальдегидные, кремнийорганические, полиимидные и ненасыщенные полиэфирные связующие [4, 5].

В данной работе из рассматриваемых эпоксидных связующих (ЭДТ-69Н, ЭНФБ) по совокупности технических и эксплуатационных характеристик, доступности и стоимости материалов мы остановились на эпоксифенольном связующем ЭНФБ, а в качестве армирующего наполнителя была выбрана конструкционная стеклоткань Т-10-14. В таблице 1 представлены основные физико-механические свойства стеклопластика на их основе, полученного методом вакуумного формования.

Таблица 1

Свойства стеклопластика ЭНФБ-Т-10-14, используемого в производстве радиопрозрачных укрытий

Свойства	ρ , кг/м ³	σ_p , МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{изг}$, МПа	E_p , МПа
– по основе	1800	580	438	413	28 000
– по утку		300	290	332	16 000

Область, в которой мы работаем, это РЛС мобильного типа, поэтому ряд требований по физико-механическим характеристика диктуется их способом передвижения. При этом некоторые испытания, например, устойчивость к вибрационным нагрузкам, проводились в составе РЛС.

При создании изделий с многослойной конструкцией радиопрозрачной стенки в качестве материалов среднего слоя используются облегченные наполнители с малой плотностью и низкими значениями диэлектрических характеристик. В качестве таких облегченных наполнителей наиболее часто выступают сотопласты, пенопласты, синтактные пены и стеклосетчатые материалы, что позволяет получать многослойные сэндвич-конструкции, обеспечивающие заданные радиотехнические и жесткостные характеристики изделий при оптимальной массовой отдаче.

Наиболее широкое применение в качестве облегченных заполнителей, обеспечивающих разнесение обшивок на заданные расстояния, в радиопрозрачных конструкциях получили сотовые заполнители. Мы также используем в своих разработках стеклосотопласты, выпускаемые нашим предприятием, полученные клеевым способом (тип ССП-1) и методом ткачества (тип ТССП). В таблице 2 представлены основные свойства сотовых заполнителей без обшивок и с обшивками для наиболее распространенных размеров ячеек [1, 6].

Таблица 2

Свойства сотовых заполнителей различных марок

Свойства	Сотовый заполнитель		
	ССП-1-4,2	ССП-1-8Э	ТССП-Ф-10П
Плотность, кг/м ³	60-80	45-55	32-40
Прочность при сжатии, МПа			
– без обшивок	1,8–3,0	1,8–2,2	1,5
–с обшивками	2,0 - 3,5	2,3–2,6	–
Модуль упругости при сжатии, МПа			
– без обшивок	120–150	70–95	–
– с обшивками	150–180	120–125	–
Прочность при сдвиге, МПа			
– параллельно склейкам	2,5–2,7	1,4–1,7	–
– перпендикулярно склейкам	2,0–2,2	1,0–1,3	–

Трехслойные (многослойные) сотовые конструкции с обшивками обладают значительно более высокими физико-механическими характеристиками, чем сами сотовые заполнители. При воздействии внешних нагрузок воспринимающий поперечное сжатие и поперечный сдвиг сотовый заполнитель предохраняет тонкие обшивки от местной и общей потери устойчивости, обеспечивает их совместную работу и высокую жесткость. Обшивки, соответственно, предохраняют от внешнего

воздействия относительно слабый и чувствительный к сосредоточенным нагрузкам наполнитель.

Методы изготовления стеклопластиковых изделий радиотехнического назначения должны обеспечивать однородность и стабильность физико-механических и диэлектрических характеристик материалов, возможность их переработки в конструкции сложной формы с жесткими допусками на геометрические размеры. Для изготовления крупногабаритных конструкций сложной геометрии, характеризующихся повышенными требованиями к радиотехническим параметрам, мы активно используем метод вакуумного формования композитов.

Необходимо отметить, что значительный ряд изделий радиотехнического назначения из конструкционных стеклопластиков имеет малую толщину обшивок, что дополнительно усиливает их «чувствительность» к изменению тех или иных технологических факторов. Например, наряду с параметрами технологического режима, отмечается значительное влияние на качество изделий из ПКМ вспомогательных слоев технологического пакета, включающего разделительные, впитывающие, дренажные слои, цулаги, вакуумный мешок и др. В частности, жертвенные слои не только определяют шероховатость поверхности после их удаления, но и влияют на количество связующего, поглощаемого используемой тканью при формовании композитов. Соответственно отличия в соотношении компонентов определяют различие в физико-механических свойствах.

Дополнительно одним из основных элементов, определяющих качество формируемой композитной конструкции, несомненно является формообразующая оснастка, разработка и изготовление которой часто становится важнейшим этапом подготовки производства [7, 8]. Типовые искажения формы изделий в значительной степени обусловлены взаимодействием формируемого изделия с оснасткой в процессе

отверждения, а получаемые величины отклонений будут отличаться для различных материалов оснасток. В основном мы работаем с композитными оснастками из стеклопластика, при этом проходя всю цепочку разработки мастер-модель – формообразующая оснастка – радиопрозрачное изделие.

При проектировании защитных радиопрозрачных изделий вопросы материаловедения, выбора допустимых технологических решений, прочностные и электродинамические расчеты связаны в единую задачу и могут решаться только комплексно, без отрыва друг от друга [9]. На рисунках 3 и 4 в качестве примера представлены результаты исследования воздействия ветровой нагрузки на радиопрозрачное укрытие с трехслойной сотовой конструкцией радиопрозрачной стенки. Для проведения расчета конструкции, была смоделирована оболочка расчетной модели укрытия с соответствующей геометрией и размерами в SolidWorks. В SolidWorks Simulation был выбран составной оболочечный элемент, специально созданный для расчета композитных материалов, где каждый слой задается в явном виде со своими характеристиками материала. При этом обеспечивается получение исчерпывающих результатов во всех компонентах расчетной модели. На рассматриваемое укрытие действует ветровая нагрузка, величина которой составляет 35 м/с, что соответствует 923 Па.

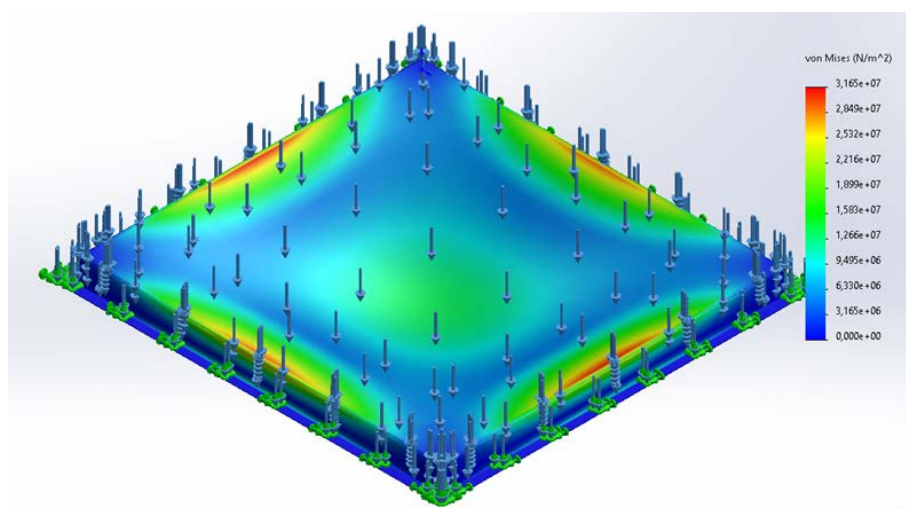


Рис. 3 – Эпюра напряжений

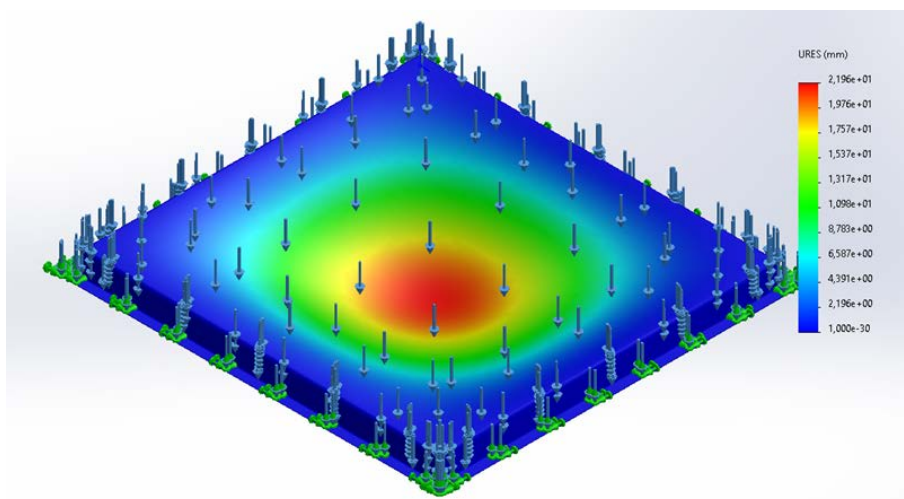


Рис. 4 – Эпюра перемещений

Максимальное напряжение в конструкции при данном виде нагружения составляет 32 МПа, а максимальный прогиб при габаритных размерах укрытия (1,3×1,4) метра составляет 22 мм и расположен в середине укрытия, что может явиться причиной снижения радиотехнических параметров системы антенна – РПУ. При этом коэффициент запаса прочности по критерию Цая-Хилла равен 10.

Как отмечалось выше, с переходом рабочих частот РЛС ближе к миллиметровому диапазону значения коэффициента прохождения радиоволны через защитное укрытие становятся все более чувствительны к возможным отклонениям параметров радиопрозрачной стенки. Так, незначительные отклонения толщин ее элементов, часто обусловленные какими-либо технологическими параметрами производства (допусками на порезку сотопласта, прогибом слоев внутренней обшивки в его ячейки, слоями усиления, переходящими на основные слои в угловых частях), могут стать причиной значительных снижений коэффициента прохождения радиоволны, что иллюстрируется рисунками 5 и 6.

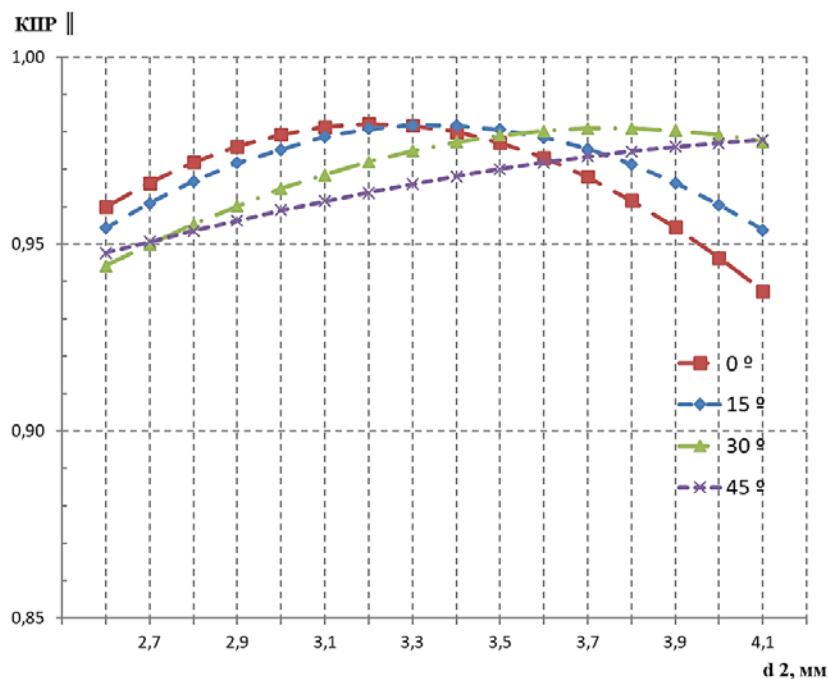


Рис. 5 – Расчетные зависимости КПР от высоты сотового слоя при различных углах падения ($\lambda = 2$ см)

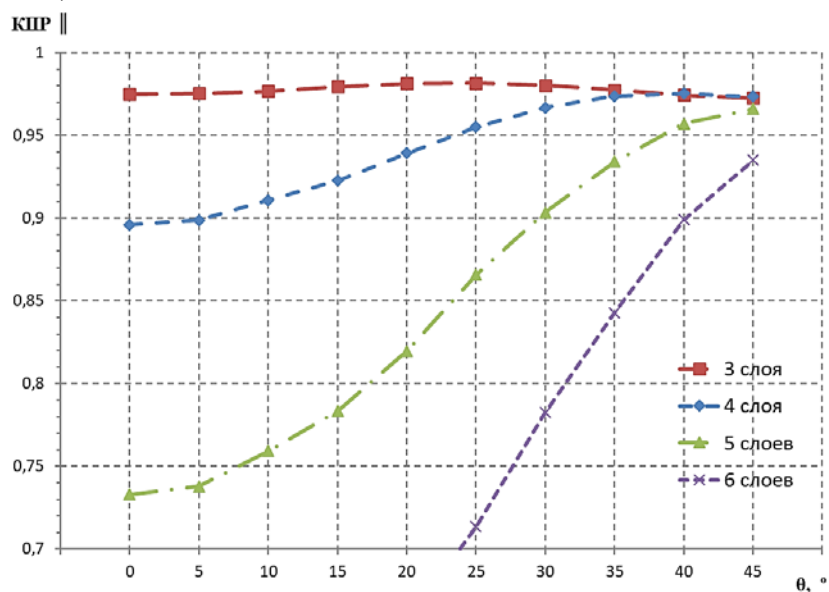


Рис. 6 – Расчетные зависимости КПР от угла падения для различных толщин стеклопластиковых обшивок ($\lambda = 2$ см)

Для мобильных наземных и корабельных защитных радиопрозрачных укрытий одним из основных требований к техническим характеристикам является обеспечение устойчивости к воздействию внешних климатических факторов, таких как температура среды эксплуатации от минус 70 до плюс 65 °С, влажность воздуха 98 % (при

25 °С), воздействие различных силовых статических и динамических нагрузок, морской и пресной воды, солнечного излучения. Для подтверждения работоспособности РПУ из стеклопластика на основе ЭНФБ-Т-10-14 был проведен весь комплекс климатических испытаний с оценкой ожидаемого ресурса эксплуатации формуемых изделий.

На рисунках 7 и 8 представлены зависимости динамических модулей накопления и потерь при изгибе от температуры, измеренные методом ДМА, для исследованных образцов эпоксифенольного стеклопластика по результатам термовлажностного старения ($T = 80\text{ °C}$, $\phi = 95\%$) и после воздействия ультрафиолетового излучения и соляного тумана.

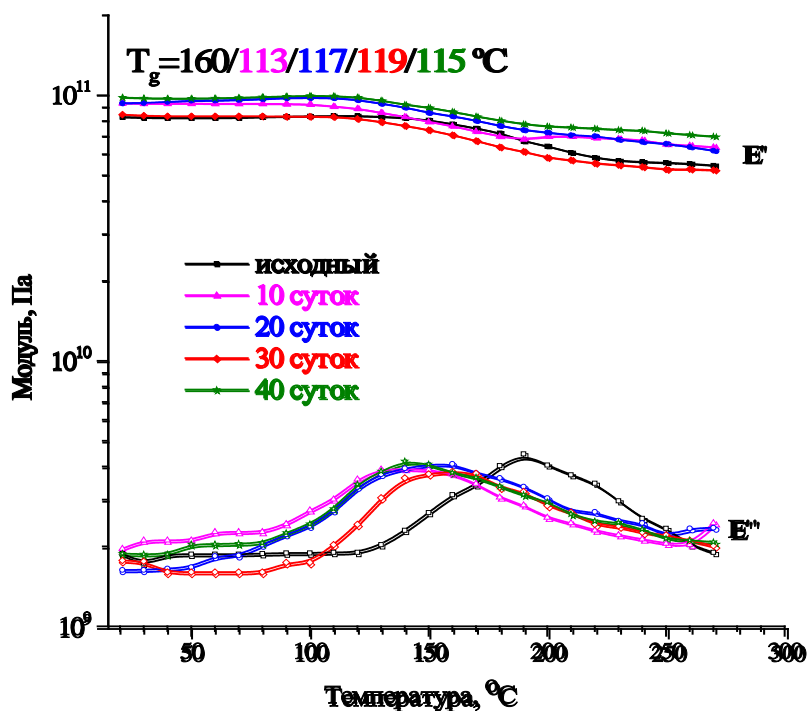


Рис. 7 – Изменение модулей упругости (E') и потерь (E'') при термовлажностном старении $T = 80\text{ °C}$, $\phi = 95\%$

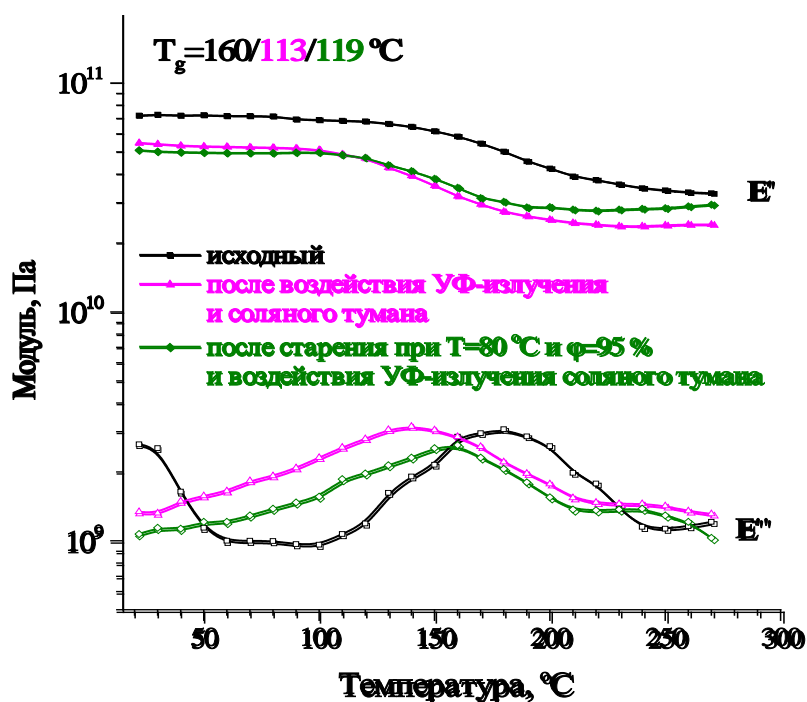


Рис. 8 – Изменение модулей упругости (E') и потерь (E'') при термовлажностном старении, воздействии УФ-излучения и солевого тумана

Можно отметить различия как в характере кривых, так и в уровне температуры стеклования для исходного и состаренного стеклопластика. Показано, что температура стеклования для исследованного материала снижается при всех воздействиях климатических факторов примерно на 40 °C, но сохраняется на уровне выше 100 °C, что обеспечивает гарантированную эксплуатацию изделий радиотехнического назначения в интервале температур до +65 °C.

Экспериментальные данные подтверждены успешным многолетним опытом (не менее 15 лет) эксплуатации РПУ с монолитной и многослойной сотовой конструкцией радиопрозрачной стенки. Радиопрозрачные укрытия, выполненные из стеклопластика на основе конструкционной стеклоткани Т-10-14 и эпоксифенольного связующего ЭНФБ, являются неотъемлемой составной частью как минимум десяти наземных и двух корабельных типов радиолокационных станций, надёжно

защищая антенные системы от воздействия неблагоприятных внешних климатических и механических факторов.

Литература

1. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 660 с.

2. Михеев С.В., Строганов Г.Б., Ромашин А.Г. Керамические и композиционные материалы в авиационной технике. М., Альтекс, 2002. 276 с.

3. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П., Пономаренко С.А., Долгова Е.В., Павлюк Б.Ф. Свойства связующего ЭДТ-69Н и ПКМ на его основе // Труды ВИАМ. 2018. № 4 (64). С. 28–37.

4. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Терморезактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58.

5. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Полиимидный стеклотекстолит с пониженной температурой отверждения // Труды ВИАМ. 2015. № 2. С. 44-49.

6. Корнейчук А.Н., Волков В.С., Шуль Г.С., Денисова Е.В., Кулагина И.В., Чугунов С.А. Стеклопластиковые сотовые наполнители: достижения и пути развития // М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. 2021. С. 21–29.

7. Выморков Н.В., Меснянкин А.Ю., Муратов В.М. Неметаллическая оснастка для формования конструкций из полимерных композиционных материалов // ТПКММ. 2001. С. 437–446.

8. Козлов М.В., Шешенин С.В., Макаренко И.В., Белов Д.А. Моделирование влияния оснастки на конечную форму изделий из полимерного композита // Вычислительная механика сплошных сред. - 2016. Т. 9. № 2. С. 145–161.

9. Шалгунов С.И., Соколов В.И., Морозова И.В., Прохорова Ю.С. Особенности проектирования и разработки радиопрозрачных обтекателей и укрытий, работающих в сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн // Антенны. 2015. Вып. 3 (214). С. 63–67.

УДК 620.171.3

**ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ,
ОСУЩЕСТВЛЯЕМОГО БЕЗ ДАВЛЕНИЯ, НА ПРОЧНОСТЬ
КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ В ТРЕХСЛОЙНЫХ
КОНСТРУКЦИЯХ.**

Е.Ю. Куприкова¹; Н.В. Степанов¹, к.т.н.

**INFLUENCE OF CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL
PARAMETERS OF THE GLUE CONNECTION, WHICH
IS CARRIED OUT WITHOUT PRESSURE ON DURABILITY
OF GLUE CONNECTION IN THREE-LAYER DESIGNS**

E.U. Kuprikova¹; N.V. Stepanov¹, Cand.Sc.

eukuprikova@mail.ru, stepnv@obninsk.ru

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Калужская обл., Россия

¹«JSE «Technologiya» named after A.G. Romashin», Obninsk, Kaluga Region, Russia

Аннотация

В данной работе отражены результаты исследований некоторых конструктивно-технологических параметров, влияющих на прочность клеевого соединения, осуществляемого без прикладывания давления. Представлены рекомендации для повышения технологичности изготовления опорного узла и повышению прочности клеевого соединения.

Ключевые слова:

опорный узел, прочность клеевого соединения, трехслойная конструкция

Abstract

Results of researches of influencing durability of the glue connection which is carried out without applying of pressure are reflected in this work. Recommendations for increase in technological effectiveness of production of basic knot and to increase in durability of glue connection are submitted.

Keywords:

support unit, shear strength, three layer honeycomb structure

Введение

На протяжении многих лет трехслойные конструкции широко используются в агрегатах авиационной и космической техники. За счет применения полимерных композиционных материалов в качестве несущих слоев (обшивок) и сверхлегких сотовых заполнителей в трехслойных панелях можно значительно повысить массовую эффективность летательных аппаратов [1–3]. Современные исследования показывают, что требуется не только оптимизация основных элементов трёхслойной конструкции, но и элементов усилений, формирующих узлы соединения для передачи нагрузки (опорные узлы). Как правило, такие узлы (рис. 1) необходимы при фиксации панелей между собой, для крепления трехслойной панели к элементам каркаса или для установки приборов и агрегатов. Прочность и надежность клеевого соединения в таких узлах играет важную роль, а методы, позволяющие обеспечить эти показатели чрезвычайно актуальны.

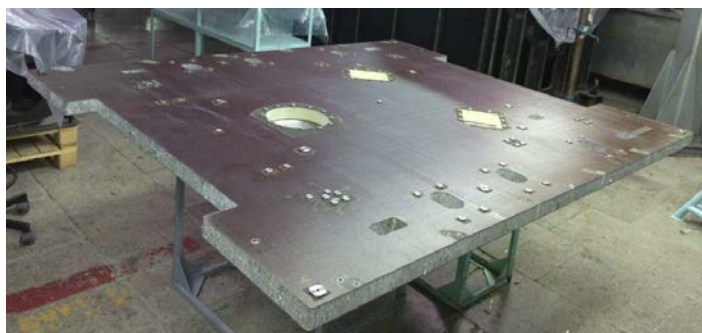


Рис. 1 – Опорные узлы в палете десантного модуля

Один из распространенных видов опорных узлов, отличающийся высокими показателями технологичности, представляет собой трехслойную конструкцию со сквозным отверстием для вклеивания закладного элемента из металла (рис. 2).

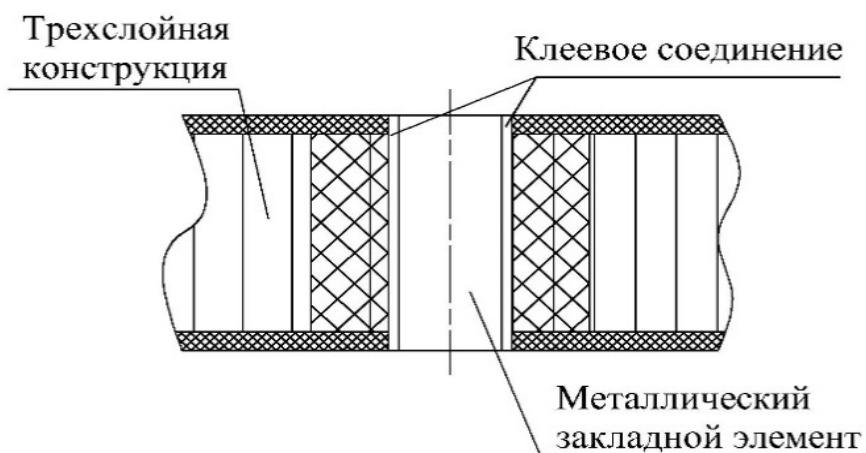


Рис. 2 – Схема опорного узла

Прочность клеевого соединения металлического элемента с трехслойной панелью является немаловажным фактором для несущей способности узла [4]. В представленном решении из-за конструктивных особенностей узла один из параметров, отвечающих за прочность клеевого соединения, а именно – давление склейки отсутствует. В связи с чем возникает необходимость определения конструктивно-технологических особенностей и их влияния на прочность соединения.

Условно можно выделить два вида параметров, влияющих на прочность клеевого соединения: конструктивные и технологические.

В качестве конструктивных параметров можно отметить:

- величину зазора между закладным элементом и отверстием;
- шероховатость склеиваемых поверхностей;
- наличие армирующих элементов в клеевом слое;
- соосность закладного элемента и отверстия.

Среди технологических параметров можно выделить:

- увеличение вязкости клея за счет применения наполнителей в клеевой композиции;
- увеличение вязкости клея за счет особенности нанесения клеевой композиции;
- способы подготовки поверхностей под склейку;
- обеспечение равномерного нанесения клея.

Стоит отметить, что параметры, которые могут оказывать влияние на качество склейки очень часто взаимосвязаны между собой и друг с другом. При изучении каждого параметра в отдельности необходимо исключить или минимизировать влияние других параметров.

Исследование влияния конструктивно-технологических параметров на прочность клеевого соединения

Для проведения исследований были сформированы образцы, представляющие собой трехслойную панель с обшивками из углепластика и сотовым наполнителем из алюминиевой фольги, упрочненным полимерным наполнителем со стеклянными микросферами, в зоне установки закладного элемента из металла. Соединение обшивок с сотовым наполнителем выполнено с использованием клея горячего отверждения. В сквозное отверстие трехслойной панели устанавливался закладной элемент, выполненный из алюминиевого сплава. Для вклейки

закладного элемента применялся многокомпонентный клей холодного отверждения ВК-9.

На первом этапе данной работы изучался один из конструктивных параметров – величина зазора между склеиваемыми поверхностями. В таблице 1 представлены параметры объекта исследования. Величину зазора изменяли за счет увеличения диаметра отверстия.

Таблица 1

Параметры объекта исследования

Высота трехслойной панели, мм	Диаметр закладного элемента, мм	Значение зазора, мм
24	28	0,1
24	28	0,3
24	28	0,6
24	28	0,9
24	28	1,2

На втором этапе исследований оценивались технологические параметры-применение наполнителя в клеевой композиции и введение нескольких стадий при нанесении клея. По технологическим соображениям и для дополнительного контроля качества, нанесенного клея на поверхности закладного элемента, выполнялась предварительная выдержка клеевого слоя в течение $(1,5 \pm 0,2)$ ч.

Следует отметить, что при малых зазорах (до 0,3 мм) не требуются дополнительные приспособления для обеспечения соосности закладного элемента и отверстия, проще обеспечивается равномерность заполнения зазора клеевой композицией, а также практически исключается перекося при установке закладного элемента в отверстие. При зазорах 0,3 мм и 0,6 мм облегчается трудоемкость вклеивания, поскольку не наблюдается заедание закладного элемента, также несложно обеспечить равномерность заполнения зазора клеевой композицией. При зазорах более 0,6 мм помимо

использования специальных приспособлений потребовалось дозаполнение зазоров клеевой композицией после установки закладного элемента.

При выполнении второго этапа – исследование влияния технологических особенностей выявлено, что предварительная выдержка клея, нанесенного на закладной элемент, увеличивая вязкость, исключает его стекание после установки в трехслойную конструкцию, когда провести контроль сплошности клеевого слоя невозможен. Этот прием (двухстадийного нанесения клеевого слоя) по прогнозам должен увеличить технологичность установки и положительно сказаться на прочности клеевого соединения.

Оценку параметров проводили экспериментальным путем, расчетными способами подобную оценку выполнить невозможно [5]. На рисунке 3 показана схема нагружения, которая использовалась для определения прочности клеевого соединения закладного элемента с панелью.

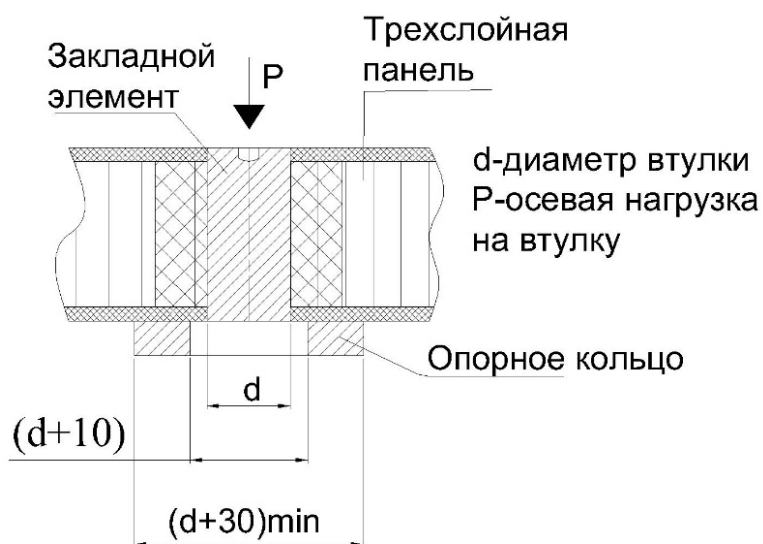


Рис. 3 – Схема нагружения опорного узла

Небольшая разница (5 мм) между внутренним диаметром опорного кольца и диаметром закладного элемента обеспечивала разрушение по клеевому слою. В ходе испытаний определялась разрушающая нагрузка, на

основании которой производился расчет прочности клеевого соединения на сдвиг.

На рисунке 4 представлены результаты исследования прочности клеевого соединения в зависимости от величины зазора между склеиваемыми поверхностями.

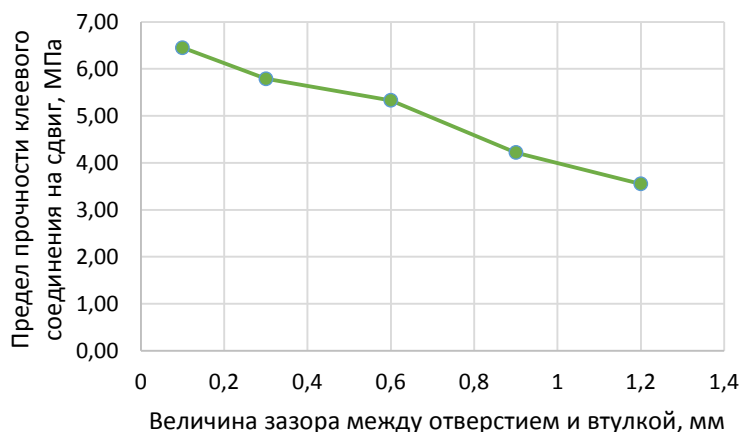


Рис. 4 – Зависимость предела прочности клеевого соединения от величины зазора

Анализируя данные, полученные на первом этапе исследований, можно отметить, что значение предела прочности клеевого соединения имеет практически линейную зависимость от величины зазора. При увеличении зазора до 0,6 мм наблюдается падение прочности не более 17%. Управляя этим параметром при проектировании с учетом допускаемых значений по пределу прочности клеевого соединения (определяется несущей способностью опорного узла) можно повысить технологичность изготовления опорного узла. Как правило, при малых зазорах (до 0,6 мм) несущая способность опорного узла исчерпывается раньше разрушения клеевого соединения [1, 6].

На рисунке 5 приведены сравнительные диаграммы прочности клеевого соединения с наполнителем и без наполнителя по двум способам нанесения клея:

- одностадийный (без выдержки);
- двухстадийный (с выдержкой (1,5±0,2) ч).



Рис. 5 – Зависимость прочности клеевого соединения от состава клеевой композиции

По результатам исследований второго этапа наблюдается незначительное снижение не более 12 % прочности клеевого соединения с применением наполнителя. При этом следует отметить, что нанесение предварительной клеевой прослойки увеличивает прочность клеевого соединения на 3–13 %. Также помимо увеличения прочности клеевого соединения при использовании предварительной выдержки, можно отметить повышение стабильности показателей предела прочности. В таблице 2 представлены результаты испытаний клеевого соединения без наполнителя по двум технологическим вариантам.

Таблица 2

Порядковый номер образца	Результаты испытаний	
	Предел прочности клеевого соединения при сдвиге, МПа	
	без выдержки	с выдержкой (1,5±0,2) ч
1	6,46	7,03
2	7,05	8,69
3	7,20	6,93
4	5,86	6,36
5	8,76	7,37
Коэффициент вариации	12%	2%

Заключение

В работе получены следующие результаты:

– построена экспериментальная зависимость прочности клеевого соединения от величины зазора между склеиваемыми поверхностями;

– определены величины зазоров между соединяемыми поверхностями, позволяющие повысить технологичность вклейки закладных элементов без существенного снижения прочности клеевого соединения;

– выявлены технологические параметры повышающие технологичность вклейки и стабильность прочностных характеристик клеевого соединения.

Литература

1. Применение трехслойных сотовых конструкций в космических аппаратах/ Н.А. Тестоедов, В.Н. Наговицин, М.Ю. Пермяков /Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17. № 1. С. 200–211.

2. Исследование свойств углепластиковых сотовых структур для легковесных конструкций ракетно-космического назначения/ А.В. Дегтярев, А.М. Потапов / Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2012. № 3. С. 20–26. Режим доступа:URL: <https://www.patonpublishinghouse.com/tdnk/pdf/2012/pafarticles/03/5/pdf> (дата обращения: 09.03.2022).

3. Применение в конструкции сотовых панелей космических аппаратов опорных узлов/ Е.А. Иванов, В.Н. Наговицин / Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2021. № 20. С. 332–334/ Режим доступа:URL: <https://www.elibrary.ru/item/asp?id=47243034> (дата обращения: 28.02.2022).

4. Проектирование узлов авиационных конструкций: учебное пособие/ Д.М. Козлов; под. Ред. д-ра техн. наук, проф. В.А. Комарова. - Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. 25 с.

5. Конструирование соединений элементов ЛА из композиционных материалов: учебное пособие/ Ю.С. Царахов. Москва: Московский физико-технический институт, 1980. 79 с.

6. Степанов Н.В. Разработка методики проектирования опорных узлов для трехслойных сотовых платформ космических аппаратов: дис. ...канд.тех.наук. Москва, 2007/ Режим доступа:URL: <https://www.dissercat.com> (дата обращения: 11.02.2022).

УДК 621.893: 620.178.162.42

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ТКАНЕВЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИТЫ

А.Г. Шпенев¹, к.ф.-м.н.; П.О. Буковский¹; А.Ю. Кривошеев²

ANTI-FRICTION FABRIC BASED C/C COMPOSITES

A. Shpenev¹, P. Bukovsky¹, A. Krivosheev²

kel-a-kris@list.ru

¹*ИПМех РАН им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия.*

²*ООО «ГМК», Таганрог, Россия.*

¹*Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia.*

²*LLC "GMK", Taganrog, Russia.*

Аннотация.

Проведено исследование антифрикционных свойств тканевых углерод-углеродных композитных материалов в паре с карбид-кремниевой керамикой в условиях сухого трения. Исследовано влияние ориентации армирующей ткани, её состава и термообработки на коэффициент трения и интенсивность изнашивания композита. Выявлены особенности механизмов трения и изнашивания композитов при разных конфигурациях контакта и различных свойствах материалов; определены характерные механизмы фрикционного разрушения отдельных структурных элементов композита (отдельных волокон, нитей, слоёв армирующей ткани). Определены оптимальные для антифрикционных свойств композита параметры армирования.

Ключевые слова.

Углерод-углеродный композит, препрег, углеродное волокно, термообработка, коэффициент трения, износостойкость, трибология композитов, структура поверхности, оптическая профилометрия.

Annotation

A study of the antifriction properties of fabric carbon-carbon composite materials paired with silicon carbide ceramics under dry friction conditions was carried out. The influence of the reinforcing fabric orientation, its composition and heat treatment on the coefficient of friction and wear rate of the composite was studied. The features of composites friction and wear mechanisms for different contact configurations and different material properties have been revealed. The characteristic mechanisms of the composite individual structural elements (individual fibers, threads, layers of reinforcing fabric) frictional destruction have been determined. The optimal reinforcement parameters for the antifriction properties of the composite were determined.

Key words:

C/C composite, prepreg, carbon fiber, heat treatment, friction coefficient, wear resistance, composite tribology, surface structure, optical profilometry.

Введение

Композитные материалы на основе углеродного волокна и углеродной матрицы находят широкое применение в различных узлах трения [1]. Они отличаются высокой механической прочностью, крайне высокой термостойкостью и химической инертностью. Эти качества обеспечили их широкое применение в качестве фрикционных пар в авиационных тормозах, тормозных системах высокоскоростных поездов и специализированных автомобилей [2]. Однако в последнее время углеродные композиты находят всё более широкое применение в качестве антифрикционных материалов, прежде всего в различные рода

уплотнениях [3]. Комплекс свойств углеродного композита определяется как структурой его армирования, так и структурой углеродных волокон, которая, в свою очередь, зависит от условий их получения (температуры термообработки, состояния исходного сырья, присутствия легирующих модификаторов, а также наличия дефектов). В зависимости от режима термообработки углеродные волокна подразделяются на карбонизованные и графитированные, а в зависимости от состава полимерного прекурсора различают ПАН и вискозные волокна [4–6]. Из углеродных волокон производят различные текстильные формы: штапелированные волокна, непрерывные нити, тканые или нетканые материалы. Триботехнические характеристики углерод-углеродных материалов существенно зависят от их структуры и от ориентации волокон относительно поверхности трения [7]. Большинство существующих серийных углерод-углеродных композитов трибологического назначения изготавливаются на основе жгутов волокон и нетканых углеродных материалов. Это ограничивает возможность выбора ориентации волокон относительно поверхности трения. Применение тканевой основы дает возможность варьировать ориентацию армирующих волокон относительно поверхности трения в широких пределах, что позволяет улучшить как прочность элементов пар трения, так и трибологические свойства сопряжения [8].

Материалы и методы исследования

Таблица 1

Виды исследуемых композитов и особенности их изготовления.

Номер образца	Название композита	Температура отжига	Материал препрега
1	Хардкарб-ТП	Карбонизация Т<1000 °С	ПАН
2	Хардкарб-ТВ		Вискоза
3	Хардкарб-ТПГ	Графитация Т>2000 °С	ПАН
4	Хардкарб-ТВГ		Вискоза

Объектами исследования являлись четыре углерод-углеродных композита серии «Хардкарб» на тканевой основе, произведённые ООО «ГМК», г. Таганрог, Россия. Данные композиты различались типом армирующей углеродной ткани на основе ПАН (400 г/м², саржевое плетение) и вискозы (325–350 г/м², полотняное плетение). Материалы изготавливались методом прессования пропитанного полимером тканевого препрепрега с последующей термической обработкой. Далее заготовки уплотнялись (до плотности 1.3–1.5 г/см³, в зависимости от технологии изготовления) в процессе осаждения пиролитического углерода из газовой фазы. После уплотнения материалы подвергались финальной термообработке при различных температурах отжига: карбонизация при $T < 1000^{\circ}\text{C}$ или графитация при $T > 2000^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

Экспериментальное изучение трибологических свойств (коэффициента трения и интенсивности изнашивания) полученных композитов, осуществлялось на лабораторном трибометре UMT-2 (Cetr, USA) по схеме контакта кольцо-диск (рис. 1, а). Испытания проводились в двух вариациях расположения слоёв углеродной ткани относительно поверхности трения (рис. 1, б, в). Первая схема: слои углеродной ткани располагались перпендикулярно поверхности трения (рис. 1, б) в направлении скольжения; композитный образец был выполнен в форме кольца, а контртело в виде диска. Вторая схема: слои углеродной ткани располагались параллельно поверхности трения (рис. 1, в); углеродный композит был выполнен в форме в виде диска, а контртело в форме кольца.

а

б

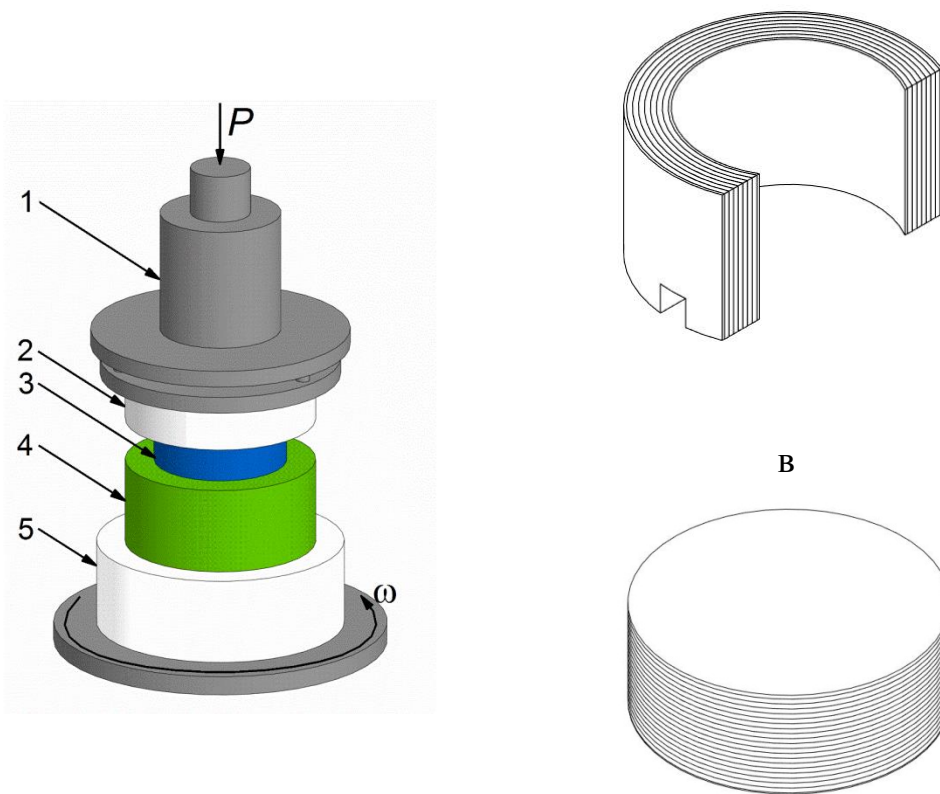


Рис. 1 – (а) Установка для трибологических испытаний, где 1 – самоустанавливающийся держатель; 2 – оснастка для крепления кольца; 3 – кольцо; 4 – диск; 5 – оснастка для крепления диска; Расположение слоёв углеродной ткани в образцах композита: (б) перпендикулярно к поверхности трения – при первой схеме трения, (в) параллельно к поверхности трения – при второй схеме трения

В качестве контртела использовалась керамика на основе карбида кремния. Материал отличается высокой твёрдостью ($HRC \approx 92,5 \pm 1,5$) и практически не изнашивается в процессе испытаний. Испытания проводились при фиксированной нагрузке $F = 150$ Н (что соответствовало среднему значению давлений в области контакта $P = 0,5$ МПа) и скорости скольжения $V = 1,25$ м/с в первой схеме и $V = 0,5$ м/с во второй схеме испытаний. Разница в скоростях была обусловлена различной теплопроводностью материалов вдоль и поперёк слоёв ткани. Такое сочетание скоростей позволило удерживать температуру в контакте, растущую за счёт фрикционного разогрева, в одинаковом диапазоне значений ($80 \dots 100$ °С). Для наработки видимого износа, который может фиксировать используемое оборудование, все эксперименты имели

длительность по времени около 5 часов. Перед началом проведения экспериментов с целью обеспечения одинаковой микрошероховатости и геометрической формы поверхности образцов осуществлялась их притирка на наждачной бумаге из карбида кремния с зернистостью 14-20 мкм. Изменения морфологии поверхности трения композитов после вышеперечисленных серий трибологических испытаний изучались методом конфокальной профилометрии на бесконтактном оптическом профилометре S Neox (SensoFar, Испания). Измерение топографии поверхности образцов было выполнено на типично-повторяющихся участках поверхности. В этом исследовании для сбора данных использовался конфокальный объектив 20х.

Результаты трибологических испытаний и их анализ.

На рисунке 2 приведены результаты трибологических испытаний образцов тканевых композитов, представленные в таблице 1, которые демонстрируют влияние на значения интенсивности изнашивания I_h (рис. 3, а) и коэффициента трения μ (рис. 3, б) следующих факторов:

- типа армирующей углеродной ткани;
- температуры отжига композита (см. табл. 1);
- расположения слоев ткани относительно поверхности трения (см. рис. 1, б, в).

а

б

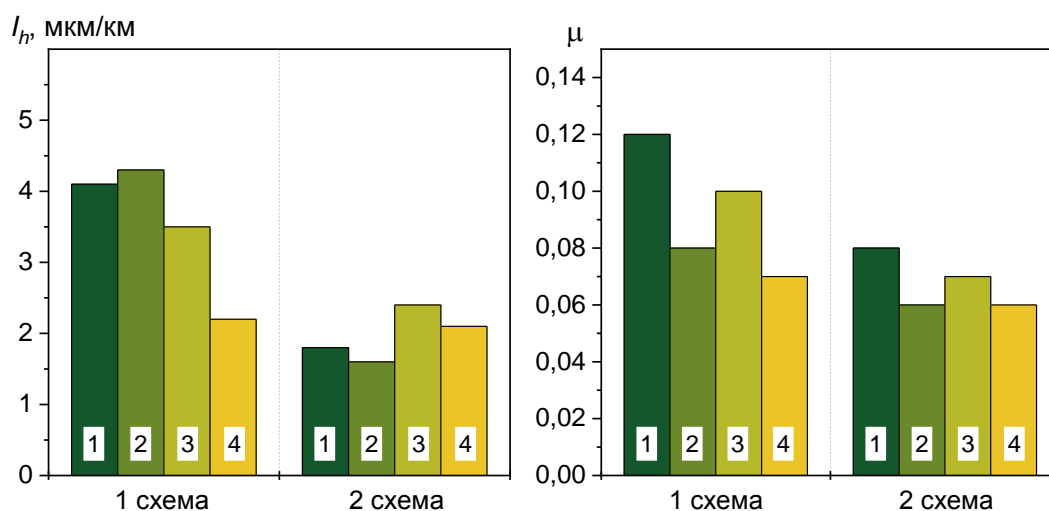


Рис. 2 – Зависимость интенсивности изнашивания (а) и коэффициента трения (б) исследуемых композитов 1, 2, 3, 4 (таблица 1) при двух схемах испытаний

Анализ полученных результатов показывает, что при испытании образцов по второй схеме (рис. 1, в) (композит в форме диска, в котором слои ткани расположены параллельно поверхности трения) снижается интенсивность изнашивания по сравнению с первой схемой, причем для некоторых композитов (1 – ТП и 2 – ТВ, см. табл. 1) наблюдается двукратное снижение с $I_h \approx 4$ мкм/км до $I_h \approx 2$ мкм/км. Наименее чувствительным к схеме испытаний оказался образец композита на основе вискозных волокон с высокой температурой отжига (4 – ТВГ, см. табл. 1).

Сравнительный анализ показывает, что композиты, испытанные по второй схеме, имеют меньшие значения коэффициента трения ($\mu = 0,06...0,08$) в сравнении с первой схемой испытания ($\mu = 0,08...0,12$). Наибольший коэффициент трения при обеих схемах испытаний наблюдался для композита Хардкарб-ТП, изготовленного на основе ПАН волокна с температурой карбонизации менее $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (см. таблицу 1).

В целом по результатам проведенных испытаний можно сделать вывод, что углеродные композиты на основе вискозных волокон демонстрируют меньшие значения интенсивности изнашивания и коэффициента трения по сравнению с композитами на основе ПАН

волокон. Данное наблюдение характерно для обеих схем трения и обоих режимов термообработки композита. На рис. 3, а, б представлены профилограммы поверхности отмытых от пленки продуктов износа материалов Хардкарб-ТПГ и Хардкарб-ТВГ после трибологических испытаний по первой схеме на масштабном уровне отдельных слоёв ткани. На рис. 3, в, г показаны профили поверхности вдоль проведенных секущих линий. Заметим, что поверхности материалов, отожжённых при низкой температуре (менее 1000 °С), имеет схожую морфологию после трибологических испытаний, поэтому они не представлены на рисунке.

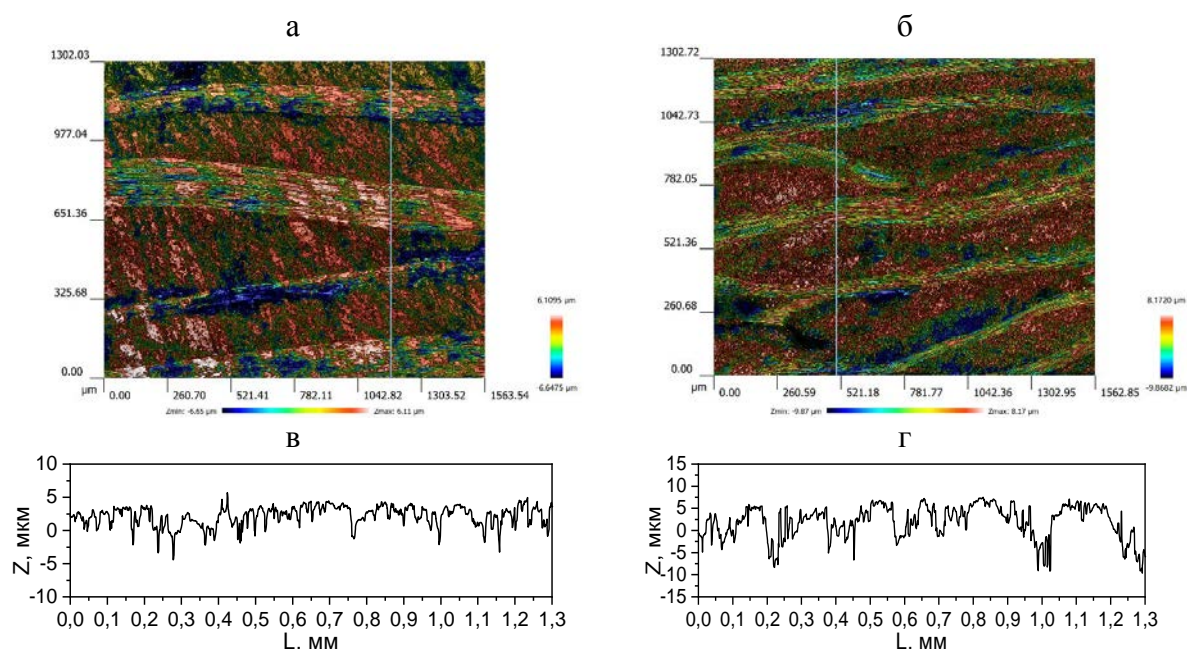


Рис. 3 – Профилограммы поверхностей (а, б) и их профили вдоль проведенных секущих (в, г) исследуемых образцов, испытанных по первой схеме; (а, в) – материал 3 (ТПГ) и (б, г) – материал 4 (ТВГ)

Поверхность композитов (рис. 3), испытанных по первой схеме (слои ткани перпендикулярны поверхности трения) состоит из перемежающихся полос (являющихся сечениями отдельными нитей ткани), в которых волокна расположены перпендикулярно и параллельно поверхности трения. При этом средняя высота полос мало различается в зависимости от угла залегания волокон, а в межслоевой области имеются глубокие впадины.

Данный факт свидетельствует, что при трении по этой схеме происходит значительное разрушение материала вблизи границы слоев ткани.

Характер разрушения тканевых композитов при параллельном расположении слоев ткани к поверхности трения (вторая схема испытаний)

На рис. 4, а, б приведены профилограммы поверхности отмытых от пленки продуктов износа материалов Хардкарб-ТПГ и Хардкарб-ТВГ после трибологических испытаний по второй схеме на масштабном уровне отдельных слоёв ткани. На рис. 4, в, г показаны профили поверхности вдоль проведенных секущих линий. Следует заметить, что, как и при первой схеме трения, поверхность материалов, отожжённых при низкой температуре, имеет аналогичный характер с материалами, отожжёнными при высокой температуре, поэтому их изображения на рисунке не представлены. Анализ профилограмм показывает, что из-за особенности саржевого плетения, характерного для композита на основе ПАН волокна (рис. 4, а), его поверхность имеет более обширные впадины в местах переплетения отдельных нитей по сравнению с композитом на основе вискозы. При этом практически все волокна расположены под малыми углами к поверхности трения. Материал на основе вискозных волокон (рис. 4, б) демонстрирует достаточно равномерную топографию поверхности. Вследствие особенностей полотняного переплетения ткани на снятых профилограммах присутствуют участки как с параллельным залеганием волокон, так и с залеганием волокон под углом, близким к прямому к поверхности трения.

а

б

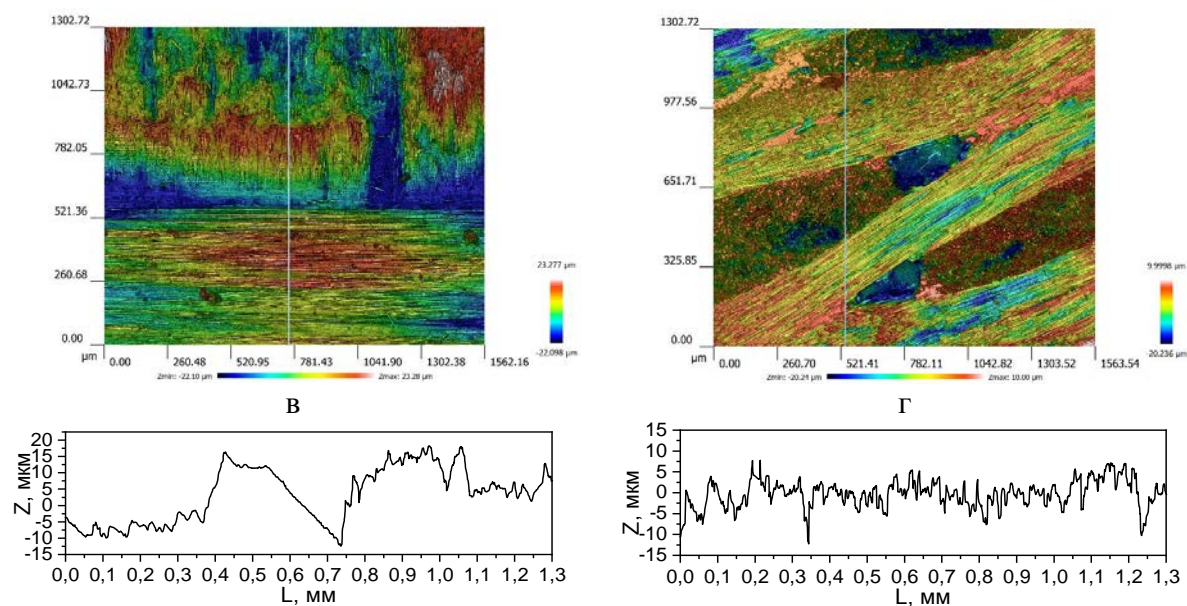


Рис. 4 – Профилограммы поверхностей (а, б) и их профили вдоль проведенные секущих (в, г) исследуемых образцов, испытанных по второй схеме; (а, в) – материал 3 (ТПГ) и (б, г) – материал 4 (ТВГ)

Таким образом, структура волокон и их расположение по отношению к поверхности трения в значительной степени влияют на характер их поверхностного разрушения в условиях фрикционного взаимодействия, что, в свою очередь, определяет величину коэффициента трения и скорости изнашивания при разных схемах испытаний (рис. 3).

Выводы

Анализ результатов трибологических испытаний позволяет сделать вывод о том, что термообработка при высокой (>2000 °С) температуре незначительно снижает коэффициент трения, однако может вызывать увеличение износа при второй схеме контакта (слои ткани расположены параллельно поверхности трения), поэтому её целесообразность для антифрикционных материалов неоднозначна. Таким образом, из рассмотренных материалов оптимальным по критерию малых значений коэффициентов трения и интенсивности изнашивания является композит на основе вязкого волокна, отожжённый при температуре <1000 °С, с расположением слоёв ткани параллельным поверхности контакта

(Хардкаб-ТВ, вторая схема испытаний). При этом все исследованные материалы показывают достаточно низкий коэффициент трения (0.06...0.12) и высокую износостойкость (1.5..4.3 мкм/км) в паре с керамическим контртелом, характеризующимся высокой твёрдостью поверхности. Это делает их перспективными материалами для работы в подшипниках скольжения, работающих без смазки или с ограниченной смазкой. Высокие трибологические характеристики материалов сохраняются в ограниченном диапазоне температур, не допускающем осушения углеродной плёнки на поверхности композита, что накладывает ограничения на нагрузочно-скоростные условия трения. Однако эти ограничения могут быть значительно ослаблены в случае трения в жидкой среде [9, 10]. Учитывая значительное разрушение материалов на границе нитей и слоёв ткани при трении, перспективным способом повышения износостойкости рассматриваемых материалов является увеличение плотности упаковки слоёв ткани и отдельных нитей, а также увеличение механической прочности связи между структурными элементами. Следует также отметить, что технология изготовления исследуемых материалов позволяет варьировать направление залегания слоёв ткани относительно поверхности трения для различных конфигураций контакта (плоская, цилиндрическая, коническая и т.д.), добиваясь оптимальных значений коэффициентов трения и снижения интенсивности изнашивания при заданных условиях эксплуатации конкретного трибосопряжения.

Таким образом, результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке новых углеродных тканевых композитов для различных узлов трения и управления их трибологическими характеристиками за счет подбора вида армирующей ткани, её ориентации относительно рабочей поверхности и режимов термообработки материала.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ООО «ГМК», г. Таганрог, за предоставленные образцы композитных материалов.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-19-00548-П).

Литература

1. Sarower K., Chowdhury A.S., Sazzad H.A., Imtiaz A.C., Faiz A. Review of the developments in composite materials over the last 15 years // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. 2023.

2. Cheng H., Xue N.J., Hou W.Q. The application and development of carbon/carbon composites in aircraft and high-speed train braking systems // Carbon. 2020 (184), 30–33.

3. Lu F., Lu L., Liu J., Pang X., Song C. Tribological Properties and Wear Mechanism of C/C Composite Applied in Finger Seal. Machines 2023, 11, 17.

4. Хтет Вин Аунг, Шешин Е.П., Вэй Зин Хлаинг. Основные свойства углеродных волокон на основе полиакрилонитрила (ПАН). // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Том 1. 2019. С. 265–267.

5. Kaludjerović B.V., Kljajević Lj.M., Laušević Z.V. The effect of partially carbonized fibers on the mechanical properties of carbon/carbon composites // Journal of Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212, P. 157–163.

6. Zhufeng Hu, Yuchen Tong, Min Wang, Junbo Xu, Chao Yang. Rapid and low-cost carbon/carbon composites by using graphite slurry impregnated prepregs // Journal of the European Ceramic Society. 2023. Vol. 43, P. 4363–4373.

7. Cheng, H.; Xue, N.J.; Hou, W.Q. The application and development of carbon/carbon composites in aircraft and high-speed train braking systems // Carbon. 2020. Vol. 184, P. 30–33.

8. Морозов А.В., Сачек Б.Я., Мезрин А.М. Оценка триботехнических свойств модифицированных эпоксидных углепластиков в проточной воде // Вопросы материаловедения. 2012. Т. 72. С. 58–65.

9. Lu F, Lu L, Liu J, Pang X, Song C. Tribological Properties and Wear Mechanism of C/C Composite Applied in Finger Seal // Machines. 2023. Vol. 11(2). P. 176. <https://doi.org/10.3390/machines11020176>

10. Hua Su, Chuding Zhang, Shan Sun. Research on the wear model of carbon/carbon composite finger seal // Wear. 2021. Vol. 476. P. 203682.

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА
ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ С
СЕГРЕГИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ**

К.А. Шиянова¹, к.х.н.; М.К. Торкунов¹;
М.В. Гудков¹, к.х.н.; Н.Г. Рывкина¹, к.ф.-м.н.;
А.А. Гулин¹, к.ф.-м.н.; В.П. Мельников¹, к.х.н.

**STUDYING THE INFLUENCE OF CARBON NANOMATERIALS ON
THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF POLYMER COMPOSITES
WITH A SEGREGED STRUCTURE**

К.А. Shiyanova¹, М.К. Torkunov¹, Gudkov M.V.¹;
N.G. Ryvkina¹, A.A. Gulin¹, V.P. Melnikov¹

shiyanovakseniya@mail.ru, tmk19981207@yandex.ru, gudkovmv@gmail.com,
ryv@mail.ru, aleksandr.gulin@phystech.edu, mvpchph@yandex.ru

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр химической физики им.
Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия*

¹*N.N. Semenov federal research center for chemical physics Russian academy of
sciences, Moscow, Russia*

Аннотация

Создание сегрегированных структур, то есть неравномерное распределение наполнителей в объеме, сейчас является одной из самых прогрессивных стратегий для формирования электропроводящих полимерных композитных материалов. В данной работе различные полимерные матрицы были наполнены углеродными нанотрубками (многостенными и одностенными) и восстановленным оксидом графена

(ВОГ). Для полученных композитных материалов исследовали электрофизические и механические характеристики. Представленные результаты могут ускорить разработку новых композитных материалов для безметаллических микроэлектронных устройств или для создания экранов для защиты от электромагнитных помех.

Ключевые слова:

электропроводящие полимерные композиты, сегрегированная структура, углеродные нанотрубки, восстановленный оксид графена

Abstract

The creation of segregated structures, that is, the uneven distribution of fillers in the volume, is now one of the most advanced strategies for the formation of electrically conductive polymer composite materials. In this work, various polymer matrices were filled with carbon nanotubes (multi-walled and single-walled) and reduced graphene oxide (rGO). The electrophysical and mechanical characteristics of the resulting composite materials were studied. The presented results could speed up the development of new composite materials for metal-free microelectronic devices or for creating shields against electromagnetic interference.

Keywords:

electrically conductive polymer composites, segregated structure, carbon nanotubes, reduced graphene oxide

Введение

Последние два десятилетия наблюдается увеличение числа работ, посвященных применению углеродных наноматериалов. Открытие фуллеренов (C₆₀) в 1985 году [1], удостоенное Нобелевской премии, создало совершенно новую отрасль химии углерода и вызвало значительный исследовательский интерес к его новым формам,

а последующие открытия углеродных нанотрубок и графена еще больше расширили данную область [2]. Углеродные наноматериалы обладают уникальными свойствами, среди которых высокая механическая прочность, прекрасная электро- и теплопроводность, высокая удельная поверхность и др. Упомянутые характеристики указывают на большие перспективы использования углеродных наноматериалов для создания электропроводящих полимерных композитов (ЭПК) [3].

Разработка ЭПК является актуальной и важной материаловедческой задачей. Это связано с активным ростом спроса на гибкую электронику, метки радиочастотной идентификации, гибкие датчики [4] и материалы для поглощения электромагнитного излучения [5].

В настоящее время публикуется множество работ, посвященных разработке и исследованию ЭПК [3, 6–10]. Эффективное распределение электропроводящих наноразмерных наполнителей в полимерной матрице все еще является одной из основных проблем [11], препятствующих широкому применению таких материалов в промышленности. Вследствие неравномерного распределения вырастает локальная концентрация наполнителя на частицах полимерной матрицы, что негативно сказывается на целевых свойствах композита. Чтобы достигнуть высоких значений электропроводности требуется высокая концентрация электропроводящего наполнителя, что приводит не только к кардинальному изменению свойств материала, но и увеличению стоимости конечного композита.

Существенного уменьшения доли наполнителя можно достичь посредством формирования сегрегированной структуры, где проводящая фаза распределена заведомо неравномерно и локализована на границе между частицами полимера, что приводит к повышению локальной концентрации наполнителя по сравнению с равномерным распределением, которого традиционно пытаются достичь механическим смешением компонентов [6]. Электропроводность ЭПК с сегрегированной структурой

регистрируется уже при содержании менее 0.1 мас.% проводящего наполнителя, что значительно ниже порога перколяции для композитов с равномерным распределением частиц в полимерной матрице, который обычно составляет 1–10 мас.%. Такой подход для получения композиционных материалов является многообещающим, поскольку малое содержание электропроводящего наполнителя позволяет достичь высоких значений электропроводности [12].

В настоящей работе впервые изучено влияние различных углеродных наноматериалов на электропроводность и механические свойства электропроводящих полимерных композитов с сегрегированной структурой. Проведен анализ покрытия из углеродных наноматериалов на поверхности частиц полимера, а также изучена морфология хрупких сколов композитов. Исследованы электрофизические свойства композитов. Рассмотрена возможность использования ЭПК в качестве экрана электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне.

Материалы и методы

В качестве полимерных матриц использовались следующие материалы:

- сополимер тетрафторэтилена и винилиденфторида (Ф-42);
- поливинилхлорид (ПВХ);
- сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ);
- полиамид-12 (ПА).

Для придания композиту электропроводящих свойств полимерные матрицы наполняли восстановленным оксидом графена (ВОГ), многостенными (МУНТ) и одностенными (ОУНТ) углеродными нанотрубками.

Для формирования сегрегированной структуры на первом этапе смешивали суспензию углеродных наноматериалов, изопропиловый спирт

и порошок полимера в необходимом соотношении. Далее жидкую фазу удаляли сначала на роторном испарителе при пониженном давлении, формируемом водоструйным насосом, и 40 °С, затем в печи при 80 °С в течение 12 часов. После этого полимерный порошок с покрытием (если покрытие содержало ОГ) обрабатывали парами гидразингидрата при 80 °С в течение 12 ч для восстановления ОГ и образования его восстановленной графеноподобной формы. Полученный порошок с покрытием прессовали в диски диаметром 12 мм и толщиной 2 мм для проведения дальнейшего исследования композитов.

ОГ и ВОГ были проанализированы методами инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, рентгеновской спектроскопии поглощения, лазерной дифракции, рентгенофазовым анализом, рамановской спектроскопией, УФ-видимой спектроскопией, просвечивающей электронной микроскопией, атомно-силовой микроскопией и оптической микроскопией. Более подробный анализ этих образцов ОГ и ВОГ был проведен в нашей предыдущей работе [6].

Полученные ЭПК были испытаны на сжатие и проанализированы методами сканирующей электронной микроскопии, диэлектрической спектроскопии, а также резонаторным методом в прямоугольном резонаторе с использованием измерителей коэффициента стоячей волны напряжения.

Экспериментальная часть

В первой части работы были разработаны ЭПК с сегрегированной структурой на основе сополимера тетрафторэтилена и винилиденфторида (Ф-42), поливинилхлорида (ПВХ) или сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), наполненные ВОГ (от 0.1 до 3 мас.%) [6]. Формирование композитов с сегрегированной структурой, наполненных

0.25 об.%. ВОГ, обеспечивает увеличение электропроводности не менее чем на 8 порядков по сравнению с электропроводностью чистого полимера независимо от полимерной матрицы. При фиксированном содержании наполнителя использование в качестве матрицы неполярного СВМПЭ приводит к более низкой электропроводности, чем использование полярных полимеров – ПВХ и Ф-42. Максимальная проводимость для композитов ПВХ и Ф-42 (0.7 и 0.5 См/м соответственно) достигается при $\omega_{\text{вог}} = 2 \text{ мас.}\%$.

Увеличение содержания ВОГ приводит к утолщению слоя и снижению качества покрытия частиц, увеличению количества дефектов – трещин и сколов, а также количества мест покрытия с рыхлой структурой. Чем толще пленка покрытия, тем меньше скорость диффузии выделяющихся газообразных продуктов восстановления ОГ. Повреждение покрытия приводит к нарушению единства электропроводящей сети в композитном материале при горячем прессовании порошка с покрытием. Это вызывает замедление роста электропроводности при степени наполнения от 0.25 до 0.5 об.% для композитов ПВХ/ВОГ и Ф-42/ВОГ и дальнейшему снижению электропроводности при увеличении содержания ВОГ.

Введение 0.5 мас.% ВОГ понижает прочность композита на основе ПВХ на 78 % по сравнению с прочностью чистого полимера. В отличие от чистого ПВХ данный композит достаточно хрупок. Очевидно, композит не способен выдерживать значительные нагрузки в плоскости частиц графена, что приводит к сдвиговому разрушению. В результате снижается деформация разрушения композита. Для пластичных матриц СВМПЭ и Ф-42, характеризующихся сильным деформационным упрочнением, материал остается пластичным, несмотря на наличие слабых мест в плоскостях частиц ВОГ, а предел текучести уменьшается незначительно. И все же механические свойства композитов определяются адгезией соседних

графеновых частиц, которая не слишком высока. Очевидно, что плоскость частиц ВОГ является слабой, что приводит к некоторому снижению прочности композита.

Далее на основе Ф-42 впервые получены ЭПК с сегрегированной структурой, наполненные смесью ВОГ и МУНТ в различных соотношениях [13]. Исследован синергетический эффект использования ВОГ и МУНТ в электропроводности и механических характеристиках ЭПКМ. Показано, что использование 1 мас.% смеси ВОГ/МУНТ для формирования электропроводящего покрытия на поверхности частиц порошка Ф-42 приводит к увеличению электропроводности по сравнению с электропроводностью композитов, наполненных исключительно 1 мас.% МУНТ. Максимальное значение электропроводности достигается для композита, наполненного 1 мас.% смеси ВОГ/МУНТ с соотношением компонентов 1/3, и составляет 0.160 ± 0.001 См/м. Для композитов, наполненных 1 мас.% ВОГ/МУНТ, наблюдается снижение модуля упругости и увеличение максимальной деформации при увеличении массового содержания МУНТ в смеси.

Также были разработаны ЭПК с сегрегированной структурой, наполненные ВОГ, ОУНТ и их смесями [14]. Исследованы морфология частиц Ф-42, покрытых углеродными наноматериалами, а также электрофизические и механические характеристики полученных ЭПК. Максимум электропроводности – 12 ± 0.001 См/м – полимерных композитов с сегрегированной структурой на основе Ф-42 достигается при содержании ОУНТ 1 мас.% и отсутствии ВОГ. Последующее увеличение содержания ОУНТ приводит к падению электропроводности вследствие агломерации нанотрубок на поверхности частиц порошка полимера при формировании электропроводящего покрытия до прессования.

Установлено, что около 70 % энергии электромагнитной волны отражается от передней границы образца композитного материала,

наполненного 0.5 мас.% ОУНТ и 0.5 мас.% ВОГ, около 60 и 35 % энергии отражается в случае композита с 1 мас.% ОУНТ и 1 мас.% ВОГ соответственно. Наименьший коэффициент прохождения СВЧ-волн наблюдается для образца со смесью 0.5 мас.% ВОГ и 0.5 мас.% ОУНТ. Для образца толщиной 2 мм он составляет менее 1 %, что свидетельствует о синергетическом эффекте смеси ВОГ/ОУНТ в композитах с сегрегированной структурой и показано впервые. Полученные данные свидетельствуют о перспективности полученных материалов для использования в качестве экранов, защищающих от электромагнитных помех в СВЧ-диапазоне.

Разработка новых полимерных композитов со специальными свойствами для 3D-печати — одна из наиболее привлекательных задач. В нашем исследовании мы разработали новые полимерные порошки на основе полиамида с покрытием ВОГ, подходящие для печати методом селективного лазерного спекания [15]. Полученные материалы были охарактеризованы с помощью оптической микроскопии, UV-vis спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и диэлектрической спектроскопии. Проведенные исследования показали, что полимерные порошки, наполненные 0.5 и 1 мас.% ВОГ, соответствуют всем требованиям, предъявляемым к SLS-материалам. Поскольку композит из полиамидного порошка, наполненного 0.5 мас.% ВОГ, имеет электропроводность 2.46×10^{-5} См/м, его можно использовать для 3D-печати антистатических композитов. Порошок, наполненный 1 мас.% ВОГ, обладает электропроводностью 0.14 См/м и может быть использован для печати изделий, пригодных для светоотражающих экранов от электромагнитного излучения.

Выводы

Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологического процесса создания экранов электромагнитных волн, покрытий и элементов изделий, препятствующих накоплению статического электричества, и др. Результаты работы свидетельствуют о том, что разработанные ЭПК могут быть использованы в различных областях техники. Данные о способах формирования таких композитов, а также о влиянии различных факторов на электрофизические и физико-механические свойства полученных материалов открывают новые возможности для создания полимерных электропроводящих композитов с низким содержанием наполнителя с использованием различных полимерных матриц в зависимости от потенциальной области применения.

Литература

1. Kroto H. W. et al. C₆₀: Buckminsterfullerene //nature. 1985. V. 318. №. 6042. P. 162–163.
2. Sheka E. F., Chernozatonskii L. A. Graphene-carbon nanotube composites //Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. 2010. V. 7. №. 9. P. 1814–1824.
3. Soni S. K., Thomas B., Kar V. R. A comprehensive review on CNTs and CNT-reinforced composites: syntheses, characteristics and applications // Materials Today Communications. 2020. V. 25. P. 101546.
4. Liu L. et al. Highly conductive graphene/carbon black screen printing inks for flexible electronics // Journal of colloid and interface science. 2021. V. 582. P. 12–21.
5. Mamunya Y. et al. Influence of conductive nano-and microfiller distribution on electrical conductivity and EMI shielding properties of polymer/carbon composites // Composites Science and Technology. 2019. V. 170. P. 51–59.

6. Shiyanova K. A. et al. Segregated network polymer composites with high electrical conductivity and well mechanical properties based on PVC, P (VDF-TFE), UHMWPE, and rGO // ACS omega. 2020. V. 5. №. 39. P. 25148–25155.
7. Zhai W. et al. Segregated conductive polymer composite with synergistically electrical and mechanical properties // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2018. V. 105. P. 68–77.
8. Zhao X. et al. Enhanced mechanical properties of graphene-based poly (vinyl alcohol) composites // Macromolecules. 2010. V. 43. №. 5. P. 2357–2363.
9. Wang D. W. et al. Fabrication of graphene/polyaniline composite paper via in situ anodic electropolymerization for high-performance flexible electrode //ACS nano. 2009. V. 3. №. 7. P. 1745–1752.
10. Pang H. et al. Conductive polymer composites with segregated structures // Progress in Polymer Science. 2014. V. 39. №. 11. P. 1908–1933.
11. Idumah C. I., Hassan A. Emerging trends in graphene carbon based polymer nanocomposites and applications // Reviews in Chemical Engineering. 2016. V. 32. №. 2. P. 223–264.
12. Gudkov M. V. et al. Electrically conductive nanocomposites with segregated structure based on poly (vinylidene fluoride-co-tetrafluoroethylene) and reduced graphene oxide // Doklady Physical Chemistry. – Pleiades Publishing, 2016. V. 466. P. 1–3.
13. Shiyanova K. A. et al. Effect of reduced graphene oxide, multi-walled carbon nanotubes and their mixtures on the electrical conductivity and mechanical properties of a polymer composite with a segregated structure // Journal of Composite Materials. 2023. V. 57. №. 1. P. 111–119.
14. Shiyanova K. et al. Segregated structure copolymer of vinylidene fluoride and tetrafluoroethylene composites filled with rGO, SWCNTs and their mixtures // Polymers. 2022. V. 14. №. 19. P. 4105.

15. Torkunov M. et al. Powders of rGO-coated polyamide with special electrical properties for SLS 3D printing // Journal of Composite Materials. – 2023. V. 57. №. 14. P. 2233–2242.

УДК 691.175.3

**ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЖИДКОЙ ФАЗЫ РАЗЛИЧНОЙ
ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ НА КОМПЛЕКС СВОЙСТВ
ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ДВУХФАЗНОЙ СХЕМОЙ АРМИРОВАНИЯ**

Е.А. Косенко¹, канд. техн. наук; Н.И. Баурова¹, докт. техн. наук

**INFLUENCE OF LIQUID PHASE MATERIALS
OF DIFFERENT CHEMICAL NATURE ON COMPLEX
OF PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS
WITH TWO-PHASE REINFORCEMENT SCHEME**

E.A. Kosenko¹, candidate of technical Sciences,

N.I. Baurova¹, doctor of technical Science, professor,

kosenkokate@mail.ru, nbaurova@mail.ru

¹*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет (МАДИ)», Москва, Россия
Moscow automobile and road construction state technical university (MADI),
Moscow, Russia*

Аннотация

Представлены результаты комплексных исследований по оценке эксплуатационных свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ), в которых для предотвращения накопления дефектов в процессе деформации и обеспечения релаксации напряжений содержится расположенный по заданным схемам армирования материал, формирующий в структуре композита самостоятельную жидкую фазу

(диметакрилат триэтиленгликоль, силиконовый герметик и синтетический воск). Установлено, что использование в качестве материала жидкой фазы диметакрилат триэтиленгликоля и силиконового герметика позволяет достичь комплекса трудносочетаемых свойств ПКМ: одновременного повышения статической прочности при растяжении и ударной прочности (в том числе при влиянии сверхнизких температур), релаксации напряжений и длительной прочности при растяжении и изгибе.

Ключевые слова:

отрицательные температуры, прочность, статическое нагружение, циклическое нагружение, ударное нагружение, углепластик, эпоксидная матрица

Abstract

The results of complex studies are presented to evaluate the performance properties of polymer composite materials (PCMs), which, to prevent the accumulation of defects during deformation and ensure stress relaxation, contain a material located according to given reinforcement patterns that forms an independent liquid phase in the structure of the composite (triethylene glycol dimethacrylate, silicone sealant and synthetic wax). It has been established that the use of triethylene glycol dimethacrylate and silicone sealant as liquid phase material makes it possible to achieve a complex of difficult-to-combine properties of PCM: a simultaneous increase in static tensile strength and impact strength (including under the influence of ultra-low temperatures), stress relaxation and long-term tensile and bending strength.

Keywords:

negative temperatures, strength, static loading, cyclic loading, impact loading, carbon fiber reinforced plastic, epoxy matrix

Введение

Закономерным этапом научно-технического развития цивилизации является создание природоподобной техносферы, основанной на принципах сбалансированности природной системы и энергоэффективности природных объектов [1]. Использование природного принципа формирования материалов позволяет создавать уникальные объекты и системы, которые применяются в медицине, энергетике, экологии, на транспорте и пр. [2].

При внедрении природоподобных материалов, конструкций и технологий осуществляется изучение и поиск природных аналогов для решения инженерных задач (биологический этап), моделирование (теоретический этап) и реализация результатов моделирования, полученных на основе природных аналогов, в реальные инженерные разработки (технический этап).

Такие материалы, как древесина, кость, некоторые виды минералов (мусковит и асбест) и др. обладают высокими деформационными и механическими свойствами, что, по мнению авторов работ [3-5], связано с наличием в их структуре границ раздела пониженной прочности, обеспечивающих под действием нагрузок, одновременное развитие различных видов разрушений.

Разработка композиционных материалов, имеющих структуру слоистых природных материалов, и экономически эффективных технологий производства из них деталей является одним из перспективных направлений по обеспечению высоких показателей прочности, жесткости и долговечности композитных конструкций, стойкости к воздействию знакопеременных и ударных нагрузок, в том числе при сверхнизких температурах.

Для реализации природоподобного поведения полимерные композиционные материалы (ПКМ) и конструкции из них должны иметь

нелинейно изменяющиеся свойства, которые формируются на этапе производства изделий.

Применяемые на сегодняшний день методы модификации материалов матриц ПКМ, в частности наиболее распространенных при получении армированных пластиков эпоксидных связующих, не позволяют достигнуть комплекса трудносочетаемых свойств композитов. При использовании одного типа модификатора, обеспечивающего повышение одной группы свойств, как правило, происходит ухудшение параметров другой. Выполнение модификации эпоксидного связующего совместимыми или ограниченно совместимыми с ним добавками, как правило, приводит к изменению реологических характеристик конечного продукта, что вызывает необходимость регулирования технологических режимов его переработки [6, 7], так как введение модификаторов, как правило, приводит к изменению скорости реакции отверждения, кинетики и механизмов химических процессов [8–10], что, в свою очередь, оказывает влияние на релаксацию напряжений, возникновение остаточных термических напряжений, дефектность получаемых структур и свойства системы в целом [11, 12].

Таким образом, одним из путей дальнейшего повышения деформационно-прочностных, теплофизических, технологических и др. свойств ПКМ является разработка их природоподобных структур.

Достижение природоподобного поведения ПКМ возможно за счет применения нового принципа их армирования, при котором, наряду с традиционными волокнистыми материалами, в качестве армирующего состава в структуре композита с предельно высокой анизотропией, используется мономерный (или эластомерный) материал, обеспечивающий формирование промежуточного слоя пониженной прочности. При этом мономерный (или эластомерный) материал дополнительного армирования в структуре ПКМ сохраняет свое исходной агрегатное состояние и

формирует самостоятельную жидкую фазу. Такой подход к формированию структуры ПКМ позволяет осуществлять локальное изменение их прочностных и деформационных свойств в зоне действия внешних нагрузок, подавляет нежелательные механизмы разрушения и приводит к повышению прочности.

При существующем разнообразии мономерных, эластомерных и полимерных материалов, потенциально пригодных соединений, которые было бы возможно использовать в качестве жидкой фазы матрицы ПКМ, очень немного. Это связано с тем, что такие материалы не должны вступать в химическое взаимодействие с компонентами связующего.

На основании комплексных исследований по оценке влияния материалов различной химической природы на кинетику процесса взаимодействия с эпоксидным связующим (ЭД-20+ПЭПА) [13], а также технологичности применения, в качестве материалов жидкой фазы были выбраны диметакрилат триэтиленгликоль (являющийся основой анаэробных клеев), силиконовые герметики и синтетические воски.

Введение в эпоксидный материал даже в небольших количествах материала жидкой фазы (диметакрилат триэтиленгликоля и силиконового герметика), приводит к снижению значений адгезионной прочности, что косвенно указывает на отсутствие между ними химического взаимодействия; изменению формы диаграммы напряжение-деформация, что указывает на изменение механизма разрушения с хрупкого на пластичный и подтверждается повышением работы разрушения [13].

Формование изделий из ПКМ с двухфазной схемой армирования осуществляется вакуумформованием с применением препрегов холодного отверждения (предварительно пропитанных связующим слоев армирующей ткани). Материал жидкой фазы наносится на заданные слои пакета ПКМ в соответствии с рассчитанной схемой армирования, которая определяется направлением и характером действующих нагрузок.

Целью работы является повышение статической и динамической прочности ПКМ на основе волокнистых наполнителей и эпоксидных матриц за счет использования дополнительного армирования материалом, формирующим в структуре композита самостоятельную жидкую фазу, и реализации природоподобного поведения композитных конструкций под действием внешних нагрузок.

Исследование влияния химической природы и количества материала жидкой фазы на прочность ПКМ при статических и ударных нагрузках

Исследование прочности ПКМ при растяжении проводилось на образцах углепластиков с различным содержанием материала жидкой фазы в количестве 1–5 мас. ч., 5–10 мас. ч и 10–20 мас. ч. Изготовление образцов осуществлялось по препреговой технологии вакуумформованием из 4 слоев углеродной ленты FibArmTape-230/300 пропитанных эпоксидным связующим на основе смолы Elan-Tech EC 57 и отвердителя W61. В качестве материалов жидкой фазы использовались: диметакрилат триэтиленгликоль, силиконовый герметик и синтетический воск. Материалы жидкой фазы наносились между 2 и 3 слоями препрега вдоль образцов.

Особенностью испытаний на растяжение являлась не только длительная выдержка образцов при температурах -30 и -50 °С в течение 30 дней (в морозильной камере PozisFH-258-1 (при -30 °С) и в жидкостном криотермостате LOIP FT-311-80 (при -50 °С), но и непосредственное проведение самих испытаний при этих же минусовых температурах с помощью машины для испытаний «УТС 110М-50», оснащенной системой температурных испытаний «СТИ ТС 3». Скорость перемещения активного захвата составила 2 мм/мин.

Из полученных результатов испытаний (рис. 1) следует, что наибольшие значения прочности (для всех исследуемых материалов)

достигаются при минимальном содержании материала жидкой фазы (1–5 мас.ч.). При использовании диметакрилат триэтиленгликоля прочность при всех исследуемых температурах, в том числе и при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ повышается на $\sim 8\%$, тогда как при использовании силиконового герметика и воска она, наоборот, снижается при $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 16 и 60 % соответственно [14].

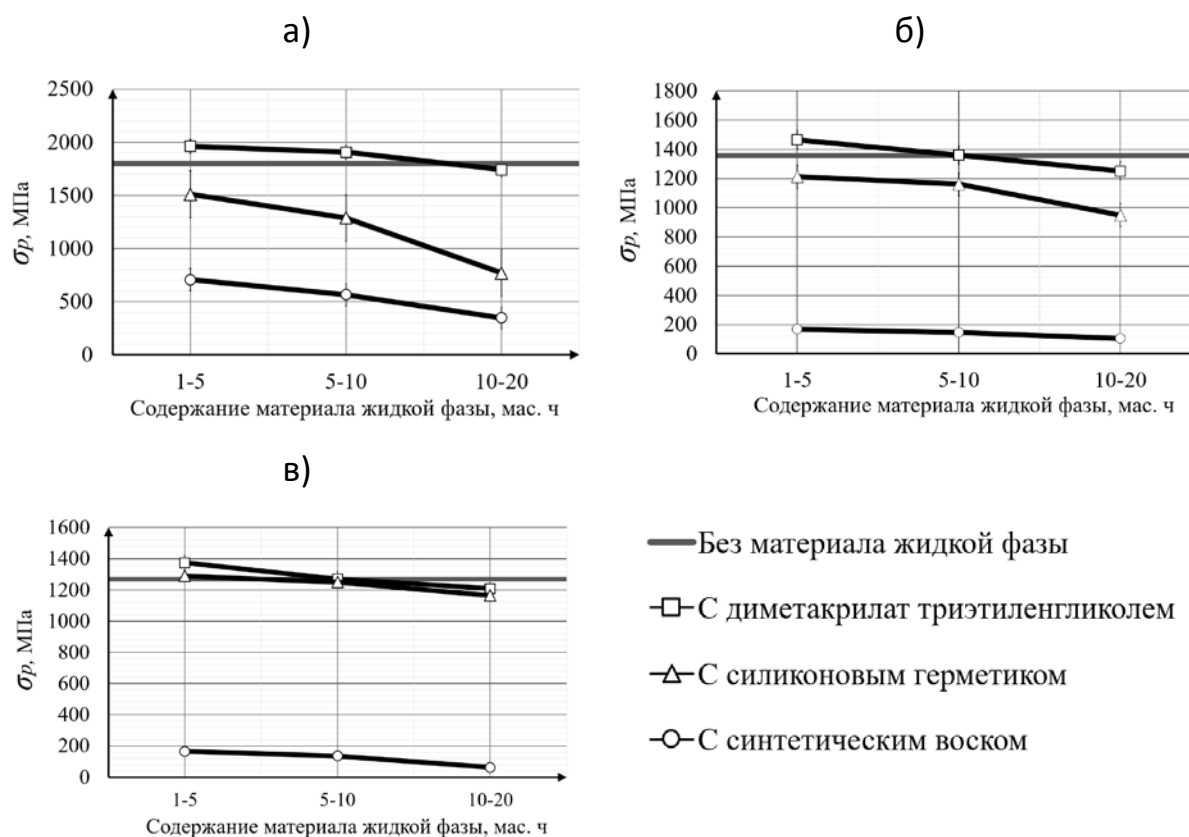


Рис. 1 – Прочность углепластиков при растяжении при температурах: $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (а), $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (б), $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в) при использовании в качестве материалов жидкой фазы: диметакрилат триэтиленгликоля, силиконового герметика, воска

С использованием этих же компонентов и технологии формования из 20 слоев ленты были изготовлены образцы для испытаний по определению ударной прочности углепластиков с двухфазной схемой армирования. Материалы жидкой фазы наносились между 10 и 11 слоями вдоль образцов горизонтально прикладываемой ударной нагрузке.

Испытания проводили методом Шарпи с применением копра маятникового Testsystems ТСКМ-300. Предварительно образцы

выдерживались в климатической камере КМН-64S при температурах $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 дней. Испытания проводились при комнатной температуре.

По результатам испытаний (рис. 2) установлено, что использование в качестве материала жидкой фазы диметакрилат триэтиленгликоля позволило увеличить значение прочности при комнатной температуре на 36%, при температурах $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 33 и 31 % соответственно. Использование в качестве материала жидкой фазы силиконового герметика также привело к повышению ударной прочности на 18 % при комнатной температуре и на 20 % при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Использование синтетического воска при его содержании в композите до 5 мас. ч. приводит к повышению ударной прочности на 9 и 22 % при комнатной температуре и после выдержки при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Максимальное содержание воска позволяет повысить ударную прочность на 20 % при комнатной температуре, на 33 % после выдержки при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и на 8 % – после выдержки при $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14].

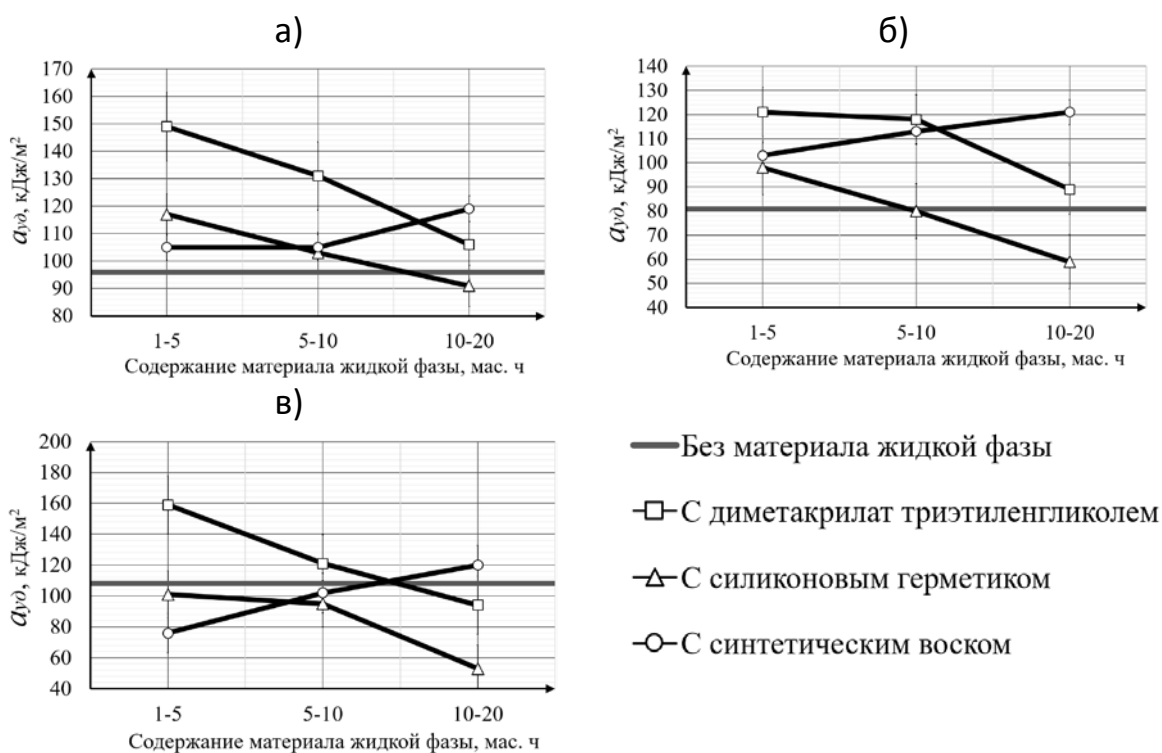


Рис. 2 – Прочность углепластиков при ударных нагрузках при температурах: +23 °С (а), –30 °С (б), –50 °С (в) при использовании в качестве материалов жидкой фазы: диметакрилат триэтиленгликоля, силиконового герметика, воска

Исследование длительной прочности ПКМ с двухфазной схемой армирования

Для определения длительной прочности при действии циклических нагрузок, были изготовлены образцы углепластиков на растяжение из 6 слоев углеродной ткани GG 200T A-38-3K-200 tex, пропитанных эпоксидным связующим марки EPR 320 с отвердителем марки EPH 943. Материалы жидкой фазы (диметакрилат триэтиленгликоль, силиконовый герметик, синтетический воск) наносились между 3 и 4 слоями вдоль образцов в количестве до 5 мас. ч. Отверждение осуществилось при температуре 80 ± 2 °С.

Испытания на длительную прочность осуществлялись путем циклически изменяющегося усилия растяжения, равного 70 % от абсолютного разрывного усилия. Испытания проводили методом блочного циклического нагружения с помощью испытательной машины Zwick Z 100 со скоростью нагружения: 10 мм/мин, количество циклов нагружения блоков составило: 100, 500, 1000.

После циклического нагружения, образцы нагружались до их полного разрушения. Полученные результаты приведены на рис. 3.

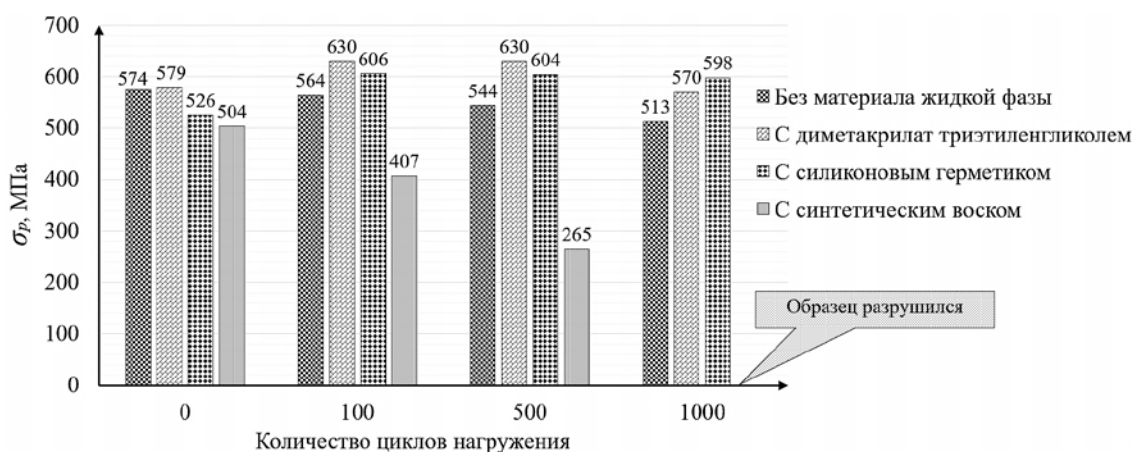


Рис. 3 – Значения предела прочности после циклического растягивающего нагружения

В результате проведенных испытаний установлено, что диметакрилат триэтиленгликоль и силиконовый герметик, используемые в качестве материала жидкой фазы, позволяют повысить остаточную прочность при растяжении [15]. При увеличении количества циклов нагружения разница в прочности $\Delta\sigma$ между углепластиком, изготовленным без использования материала жидкой фазы, и с применением диметакрилат триэтиленгликоля и силиконового герметика увеличивается и составляет при 100 циклах нагружения $\Delta\sigma = 66$ МПа и $\Delta\sigma = 42$ МПа соответственно; при 500 циклах нагружения $\Delta\sigma = 86$ МПа и $\Delta\sigma = 60$ МПа для диметакрилат триэтиленгликоля и силиконового герметика соответственно. Синтетический воск, используемый в составе ПКМ в качестве материала жидкой фазы, наоборот, привел к снижению прочности и в условиях циклического растяжения такие ПКМ не выдержали 1000 циклов нагружения.

Оценку длительной прочности ПКМ с двухфазной схемой армирования при изгибе осуществляли на образцах углепластиков, изготовленных по препреговой технологии из 4 слоев углеродной ленты FibArmTape-230/300, пропитанных эпоксидным связующим на основе смолы Elan-Tech EC57 и отвердителя W61. Материалы жидкой фазы (диметакрилат триэтиленгликоль, силиконовый герметик, синтетический воск) наносились между 2 и 3 слоями в количестве до 5 мас. ч., перпендикулярно направлению действия нагрузки. Отверждение образцов осуществлялось под воздействием инфракрасного излучения с применением установки Trommelberg IR3C Standard, обеспечивающей нагрев до температуры $+80\pm 2$ °С. Габаритный размер образцов составил $1,3\times 15\times 100$ мм.

Для оценки длительной прочности углепластиков при изгибных нагрузках, разработана специальная установка (Патент на изобретение РФ № 2788917, С1, МПК G01N 3/00, заявл. 18.04.2022, опубл. 25.01.2023),

которая позволила выполнить циклическое нагружения плоских образцов углепластиков с амплитудой равной 70 % от максимального прогиба, частотой 5 Гц, количество циклов 100 тыс. После циклического нагружения были проведены испытания на трехточечный изгиб до разрушения с помощью испытательной машины УТС 110М-50 (скорость нагружения 10 мм/мин, расстояние между опорами составило 80 мм) (рис. 4).

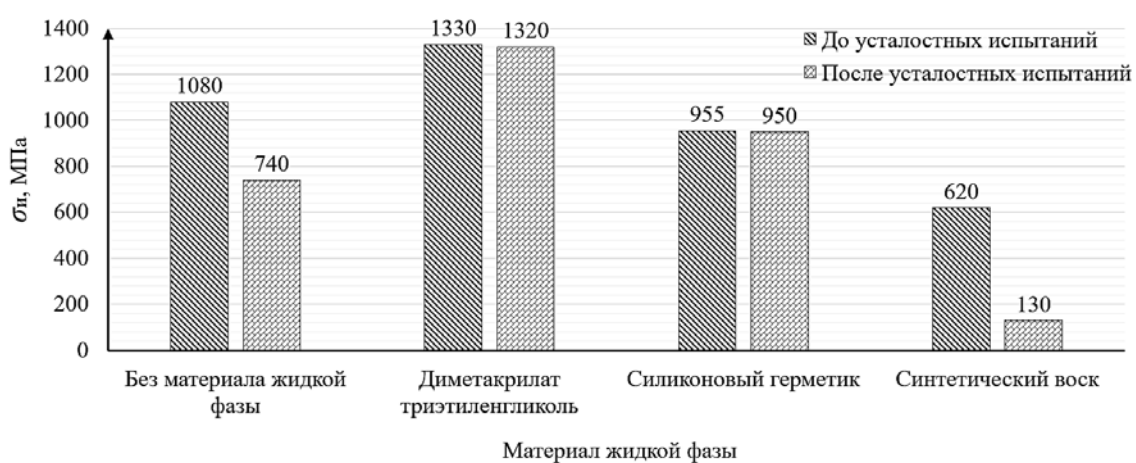


Рис. 4 – Значения предела прочности после 100 тыс. циклов изгибающего нагружения

Результаты испытаний показали, что прочность при изгибе у образцов с диметакрилат триэтиленгликолем и силиконовым герметиком, используемыми в качестве материала жидкой фазы после 100 тыс. циклов нагружения практически не изменяется (рис. 4), что является подтверждением более высоких релаксационных характеристик данных типов материалов по сравнению с углепластиковыми, в составе которых нет материала жидкой фазы [16].

Полученные результаты испытаний по оценке длительной прочности ПКМ с двухфазной схемой армирования при изгибе (рис. 4) хорошо согласуются с результатами оценки длительной прочности при растяжении (рис. 3).

Проведенная консольным методом экспериментальная оценка остаточных напряжений позволила установить, что значения остаточных напряжений для всех исследованных эпоксидных составов очень близки между собой и составляют 2,4–2,7 МПа. Введение в качестве материала жидкой фазы диметакрилат триэтиленгликоля приводит к снижению величины остаточных напряжений до 2,0–2,2 МПа, а силиконового герметика до 1,9–2,4 МПа.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что используемые материалы жидкой фазы оказывают неоднозначное влияние на свойства композита. Статическая и динамическая прочность повышаются, тогда как адгезионная прочность снижается.

На основании результатов выполненной оценки механизма разрушения ПКМ с двухфазной схемой армирования установлено, что причинами повышения прочности при динамическом нагружении являются: релаксация напряжений, пластичное поведение эпоксидной матрицы при нагружении, увеличение работы разрушения между элементарным волокном и полимерной матрицей.

«Материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2020-0011 (2019-1342), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ»

Литература

1. Ковальчук М.В. Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы / М.В. Ковальчук, О.С. Нарайкин, Е.Б. Яцишина // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89. № 5. С. 455–465.
2. Ковальчук, М.В. Природоподобные технологии – новые возможности и новые угрозы / М.В. Ковальчук, О.С. Нарайкин // Индекс безопасности. 2016. Т. 22. № 3-4(118-119). С. 103–108.
3. Берлин, Ал. Ал. Загадки химической физики / Ал. Ал. Берлин // Горение и взрыв. 2020. Т13. №3. С. 3–18.
4. Полилов, А.Н. Биомеханика прочности волокнистых композитов / А.Н. Полилов, Н.А. Татусь. М.: Физматлит, 2018. 328 с.
5. Cook J.A mechanism for the control of crack propagation in all-brittle systems / J.A. Cook, J.E. Gordon // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1964. Vol. 282. № 1391. P. 508–520.
6. Сидоров, О.И. Исследование реокинетики отверждения эпоксидных связующих / О.И. Сидоров, Ю.М. Милехин // Пластические массы. 2013. № 9. С. 14–17.
7. Сидоров, О.И. Модификация эпоксиполимеров нанокремнеземом / О.И. Сидоров, А.Н. Осавчук, А.А. Матвеев [и др.] // Пластические массы. 2013. №10. С. 42–45.
8. Высокомолекулярные соединения: учебник и практикум для академического бакалавриата / М.С. Аржаков, А.Б. Зезин, А.Д. Антипина [и др.]; под ред. А.Б. Зезина. М.: Издательство Юрайт, 2016. 340 с.
9. Вялов, А.И. Исследование влияния модификации на реокинетику отверждения эпоксисинтетической композиции методами реометрии и дифференциальной сканирующей калориметрии / А.И. Вялов, А.А. Щербина, И.Ю. Горбунова [и др.] // Пластические массы. 2022. № 5-6. С. 13–15.

10. Осипчик, В.С. Исследование процесса отверждения эпоксидных олигомеров / В.С. Осипчик, И.Ю. Горбунова, Н.В. Костромина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 3. С. 19–22.

11. Осипчик, В.С. Реокинетика отверждения модифицированного эпоксидного связующего / В.С. Осипчик, С.А. Смотрова, В.М. Аристов [и др.] // Пластические массы. 2012. № 2. С. 17–19.

12. Wang, X. Prediction of the inter-fiber mechanical properties of composites: Part I standardization micro-scale modelling method and damage analysis / X. Wang, Zh. Guan, X Liu [et al] // Composite Structures. 2021. Vol. 271. P. 114127.

13. Косенко, Е.А. Исследование кинетики процесса взаимодействия материала «жидкой» фазы и эпоксидного связующего / Е.А. Косенко, Н.И. Баурова, В.А. Нелюб // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. №6. С. 30-33.

14. Косенко, Е.А. Исследование прочностных свойств углепластиков с двухфазной схемой армирования / Е.А. Косенко, В.А. Нелюб, Н.И. Баурова, // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2023. № 6. С. 2–7.

15. Косенко, Е.А. Оценка усталостной прочности углепластиков с различными типами гибридных матриц / Е.А. Косенко // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2022. Т. 84. № 2(92). С. 262–268.

16. Косенко, Е.А. Оценка усталостной прочности углепластиков с двухфазной схемой армирования при циклическом изгибающем нагружении / Е.А. Косенко, В.А. Нелюб, Н.И. Баурова // Химическая промышленность сегодня. 2023. № 4. С. 37–42.

УДК 678.067:621.7

ТЕРМОСТОЙКИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫЕ СОТОВЫЕ ЗАПОЛНИТЕЛИ

С.А. Чугунов¹; А.Н. Корнейчук¹; В.С. Волков¹, канд. техн. наук;
Е.В. Денисова¹; И.В. Кулагина¹

HEAT-RESISTANT FIBERGLASS HONEYCOMBS

Sergey A. Chugunov¹; Alexey N. Korneychuk¹; Valery S Volkov¹, Cand. Techn. Sc;
Elena V. Denisova¹; Irina V. Kulagina¹

e-mail: chugunovsa@technologiya.ru

АО “ОНПП “Технология” им. А.Г. Ромашина”, г. Обнинск, Россия)

(ORPE Technologiya named after A.G.Romashin, Obninsk, Russia)

Аннотация

В докладе приведен обзор свойств отечественных термостойких стеклопластиковых сотовых наполнителей. Показаны основные физико-механические характеристики, типы используемых материалов и геометрии ячеек.

Ключевые слова:

соты, стеклосотопласт, связующее, стеклоткань, клей

Abstract

The review of properties of domestic fiberglass honeycombs is provided in the report. Dependences of their main physicomachanical characteristics on type of the used materials and geometry of cells are shown.

Keywords:

honeycombs, fiberglass honeycomb filler, the binding, fiberglass fabric, glue

Постоянно растущие требования к повышению тактико-технических характеристик, ресурса, эффективности и надежности изделий авиационной и ракетной промышленности создают необходимость интенсивно искать и разрабатывать новые материалы, конструктивные решения, методы проектирования и технологические процессы. Возрастает потребность в новых полимерных композиционных материалах (ПКМ) для высокотехнологичных изделий.

В настоящее время наблюдается увеличение объемов применения многослойных конструкций из ПКМ с ячеистыми заполнителями, которые рассматриваются как материал для изготовления деталей сложной геометрии благодаря их небольшой массе и высокой прочности. Наибольшее распространение получили конструкции из ПКМ, содержащие сотовые заполнители (СЗ), отличительными свойствами которых являются высокие физико-механические, радиотехнические, а также тепло- и звукоизоляционные свойства. Это позволяет решать такие сложные задачи как снижение веса конструкций, повышение их прочностных характеристик и уменьшение трудоемкости изготовления.

Одной из важных функций СЗ, применяемых в многослойных конструкциях из ПКМ различного назначения, является перераспределение нагрузок, испытываемых наружными обшивками [1, 2]. СЗ имеют максимальное, по сравнению с другими заполнителями, соотношение прочность/плотность, благодаря чему они являются наиболее перспективными на сегодняшний день материалом для изготовления легких и прочных многослойных конструкций в авиакосмической и других отраслях промышленности [3]. Одним из видов СЗ являются

стеклопластиковые сотовые наполнители (ССП), получаемые на основе различных стеклотканей. ССП нашли широкое применение в радиопрозрачных многослойных конструкциях.

В последние годы предметом активных исследований является увеличение температуры эксплуатации полимерных композиционных материалов. Замена традиционных термостойких материалов на более легкие полимерные аналоги имеет очень большую практическую значимость. Для ССП увеличение температуры эксплуатации также является актуальной задачей.

В данной работе приведен обзор термостойких стеклопластиковых сотовых наполнителей, разработанных в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», и их основные свойства.

В настоящее время при производстве ССП применяются стеклоткани алюмоборосиликатного и кварцевого составов различной толщины от 80 до 240 мкм [4]. Несмотря на то, что механические характеристики ССП в значительной степени зависят от свойств наполнителя (волокна), на условия эксплуатации ССП решающее влияние оказывают химическая природа и свойства полимерной матрицы.

В качестве связующего для изготовления термостойких ПКМ, работоспособных при температурах до 300 °С, применяют полиимидные (гетероциклические) смолы [5, 6]. В результате экспериментальных исследований для получения стеклосотопластов было выбрано полиимидное связующее марки СП-97К (ТУ 1-595-10-1087-2009).

Наиболее широко применяются соты с шестигранной формой ячеек. Это обусловлено тем, что такая форма ячеек обеспечивает максимально высокие физико-механические характеристики ССП.

В таблице 1 приведены основные свойства полиимидных ССП с шестигранной формой ячеек, разработанных в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

Основные характеристики стеклосотопластов

Марка сотопласта	Размер граней ячеек, мм	Номер технических условий	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при сдвиге \perp клеевой полосе, МПа
ССП-7-8Т	8	ТУ 1-596-466-2009	70–80	2,0–3,0	2,1–2,4
ССП-7-3,5	3,5	ТУ 1-596-481-2011	65–90	2,2–3,0	0,9–1,1
ССП-7-4,2	4,2		55–75	1,6–2,6	0,8–1,0
ССП-7П-3,5	3,5	ТУ 1-596-511-2013	60–70	2,2–2,8	1,0–1,2

На рисунке показаны зависимости изменения прочности при сжатии и модуля упругости при температуре 20°C от времени выдержки для ССП-7П-3,5.

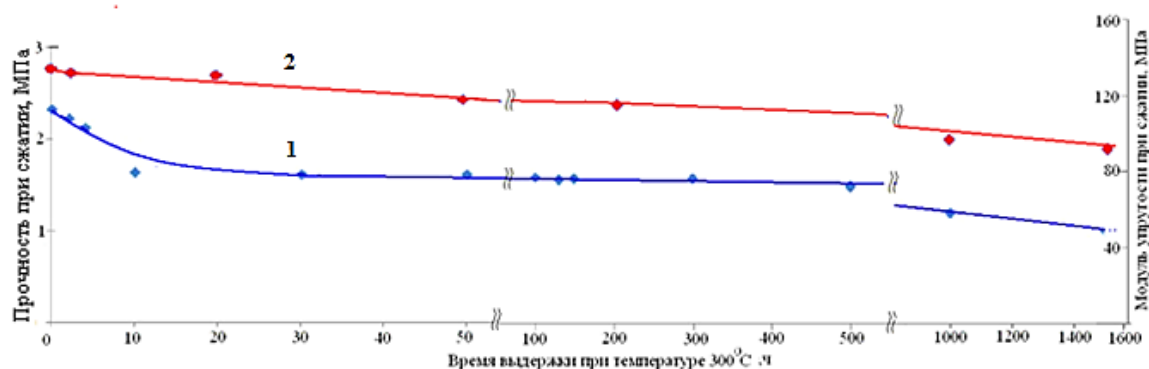


Рис. 1 – Зависимость прочности (1) и модуля упругости (2) при сжатии стеклосотопласта ССП-7П-3,5 от времени выдержки при температуре 300 °С

Установлено, что после выдержки при температуре 300 °С в течение 1500 часов наблюдается сохранение 50 % значения предела прочности при сжатии и 65 % модуля упругости.

Так как полимерная матрица отвечает за механическую устойчивость при повышенных температурах, то такое изменение свойств характерно и для других марок ССП.

В настоящее время стеклосотопласты марок ССП-7-3,5 и ССП-7-4,2 нашли применение в трехслойной конструкции аэродинамического экрана защитного кожуха спускаемого аппарата в межпланетной станции «Экзомарс», а также в различных теплонагруженных конструкциях авиационной и ракетной техники. Сотовые заполнители с размером ячеек 8 мм применяются в качестве заполнителя трехслойных панелей шумоглушения. Стеклосотопласт марки ССП-7-8Т применяется в составе звукопоглощающих конструкций двигателей ПД-8 и ПД-14 в зонах с повышенными температурами (зона газогенератора).

Несмотря на очевидные преимущества, применение СЗ с шестигранной формой ячеек для изготовления конструкций одинарной и двойной кривизны осложняется необходимостью раскроя сот на сотодельки малых размеров, что приводит к ухудшению технологичности процесса и снижению эксплуатационных характеристик конечного изделия. Поэтому в ТСК, имеющих кривизну, предпочтительным является применение СЗ с гибкими формами ячеек, позволяющими осуществлять выкладку на криволинейные поверхности большими панелями [7].

Для повышения гибкости известен целый ряд СЗ различных конфигураций (рис. 2), имеющих свои конструктивные особенности:

- 1 – Возможность изгиба в направлении L;
- 2 – Возможность изгиба по одной из осей;
- 3 – Возможность изгиба сотового блока по двум осям при изготовлении криволинейных оболочек;
- 4, 5 – Возможность изгиба по двум осям.

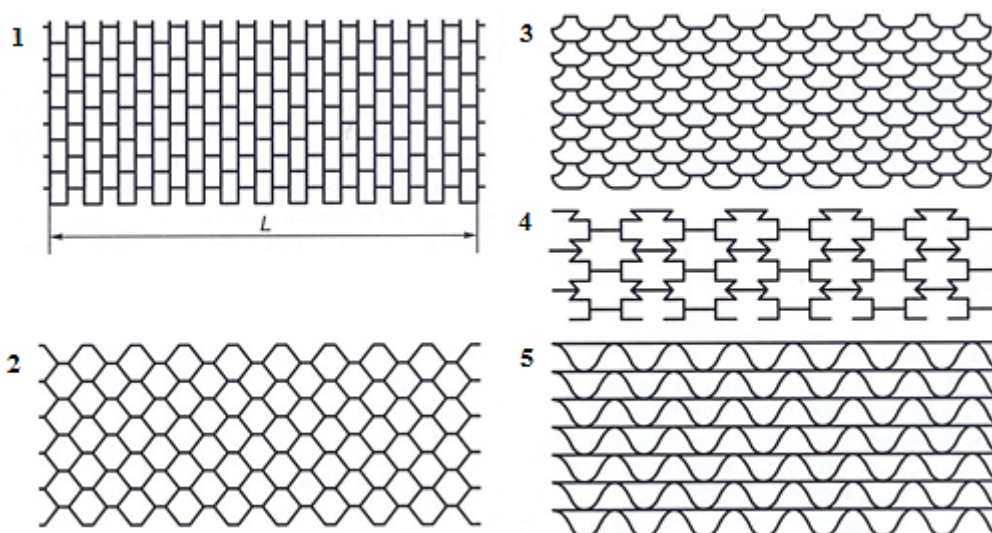


Рис. 2 – Разновидности форм ячеек сотовых заполнителей: 1 – прямоугольная; 2 – ромбическая; 3 – «флекс»; 4 – мальтийский крест; 5 – рифленые (гофрированные) ячейки [8]

В свою очередь СЗ с прямоугольной и ромбической формой ячеек имеют значительно меньший антикластический эффект при изгибе вокруг одной оси, поэтому являются более предпочтительными для изготовления криволинейных ТСК одинарной кривизны.

Следует отметить, что существующая технология изготовления стеклопластиковых СЗ с шестигранной формой ячеек позволяет получать СЗ с прямоугольной и ромбической формами ячеек путем изменения лишь технологической оснастки на отдельных стадиях изготовления, в то время как производство СЗ с более сложными формами ячеек (флекс, мальтийский крест и т. д.) требует полного технического перевооружения, что для решения поставленных задач является экономически и технически нецелесообразным.

Несмотря на то, что для получения конструкций одинарной кривизны подходят СЗ с ромбической и прямоугольной формами ячеек, преимущество имеет прямоугольная форма за счет большей изгибной способности.

Для решения задач по увеличению гибкости ССП в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» были разработаны термостойкие ССП с прямоугольной формой ячеек на основе электроизоляционной (марка ССП-7-3,5ПР) и кварцевой тканей (марка ССПК-7-3,5ПР) и полиимидного связующего марки СП-97К. Свойства разработанных СЗ с прямоугольной формой ячеек представлены в таблице 3.

Таблица 3

Свойства полученных сотовых наполнителей

Марка сотопласта	Ширина клеевой полосы, мм	Номер технических условий	Плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при сдвиге \perp клеевой полосе, МПа
ССП-7-3,5ПР	3,5	ТУ 1-596-567-2023	80–90	2,2–2,8	1,1–1,2
ССПК-7-3,5ПР	3,5	ТУ 1-596-568-2023	60–70	1,8–2,2	1,7–1,8

Термостойкие сотовые наполнители с прямоугольной формой ячеек двух марок ССП-7-3,5ПР и ССПК-7-3,5ПР обладают высокими значениями показателей прочности как при сжатии, так и при сдвиге, сравнимыми с серийно выпускаемыми термостойкими стеклосотопластами. Однако стоит отметить, что у СЗ с прямоугольной формой ячеек прочность при сдвиге в перпендикулярном направлении выше, чем в параллельном направлении, в отличие от СЗ с шестигранной формой ячеек. Это обусловлено тем, что у прямоугольной ячейки длина стенки в 2 раза больше, чем у шестигранной, что и приводит к большей способности сопротивления сдвиговой нагрузке.

В таблице 4 и рисунке 3 показаны результаты исследований изгибающей способности прямоугольных ССП. Суть эксперимента заключалась в том, что образцы ССП с прямоугольной формой ячеек в виде панелей различной толщины выкладывали на цилиндрические приспособления различных диаметров. Панели выкладывали таким

образом, чтобы они полностью огибали цилиндр. За положительный принимали результат, при котором сотопанель не ломалась в результате выкладки на цилиндр.

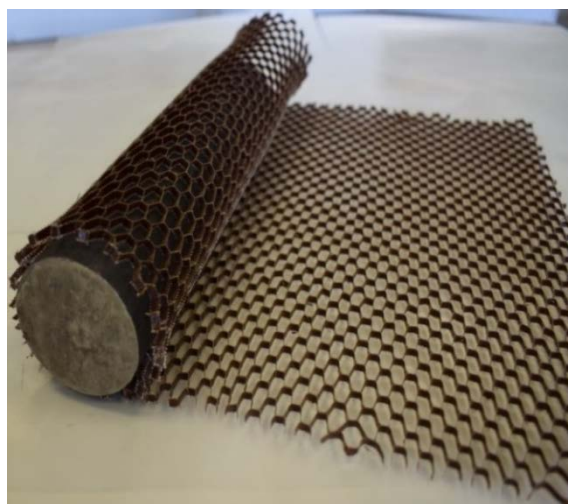


Рис. 3 – Внешний вид сотопанели с прямоугольной формой ячейки

Таблица 4

Изгибающая способность прямоугольных сот

Диаметр цилиндрической поверхности, мм	Высота сотопанели h, мм					
	3	5	10	15	25	30
10	+	+	-	-	-	-
15	+	+	+	-	-	-
20	+	+	+	+	-	-
40	+	+	+	+	-	-
60	+	+	+	+	+	+
80	+	+	+	+	+	+

Видно, что сотопанели хорошо выкладываются на цилиндрическую поверхность, не образуя седловидной формы при изгибе вокруг одной оси, при соотношении диаметра цилиндрической поверхности к высоте сотопанели, превышающем 1,3 – 1,6 в зависимости от величины нагрузки, приложенной к пластине, и толщины пластины. Для малых высот (до 15 мм) это соотношение составляет около 1,3; для высот свыше 15 мм – более 1,6.

Стеклосотопласты в отличие от других типов сотовых заполнителей являются также очень хорошими диэлектриками, что позволяет применять их в качестве заполнителей многослойных сотовых конструкций радиотехнического назначения. Основные радиотехнические свойства ССП приведены в таблице 5.

Таблица 5

Диэлектрические характеристики стеклосотопластов

Марка сотопласта	Диэлектрическая проницаемость на частоте 10 ГГц	Коэффициент прохождения волны на частоте 10 ГГц, %
ССП-7-3,5	1,09	98–100
ССП-7-4,2	1,09	
ССП-7П-3,5	1,09	
ССП-7-8Г	1,09	
ССП-7-3,5ПР	1,08	
ССПК-7-3,5ПР	1,07	

Для разработанных стеклосотопластов была проведена оценка водопоглощения и горючести. Водопоглощение полиимидных стеклосотопластов типа ССП-7 составило 2,4 %, что соответствует водопоглощению серийно выпускаемых фенольных стеклосотопластов типа ССП-1. По результатам испытаний на горючесть (ОСТ 1 900094-79) их можно отнести к классу трудносгораемых материалов, а по классификации по дымообразованию – к 1-ой группе, т. е. практически не выделяющие дыма.

Таким образом в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» разработана широкая номенклатура термостойких полиимидных стеклосотопластов, позволяющих решать задачи создания облегченных конструкций сложной геометрии для изделий авиационной и ракетной техники, работающих при температурах до 300 °С.

Литература

1. Михайлин Ю.А. Полимерные сотовые материалы // Полимерные материалы. 2010. № 10. С. 31–37.
2. Шемама Р., Руппель В. Новые тенденции ремонта конструкций из 1. КМ//Композитный мир. Спецвыпуск «Авиация и космос». 2011. С. 32.
3. Ощепков М.Ю. Композиты в авиационно-космической промышленности // Композитный мир. 2010. № 6 (33). С. 46.
4. Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. М.: Мир, 2003. 363 с.
5. Аленьтьев А.Ю., Яблокова М.Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. 69 с.
6. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор)//Композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3. С. 48–58.
7. Гиясов Б.И., Серёгин Н.Г., Серёгин Д.Н. Трёхслойные панели из полимерных композиционных материалов. М.: АСВ, 2015. С. 4–9.
8. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. – СПб: НОТ (Научные основы и технологии), 2014. 476 с.

УДК 691.175

**НОВЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МОЩНОСТИ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФТОРПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ПЛЕНОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

К.х.н. П.В. Митин¹; М.Ю. Кацап¹; Б.В. Левин¹;
Ю.В. Лякина¹; В.А. Печилин¹; Д.В. Шумилов¹

NEW PRODUCTION FACILITIES

FOR THE PRODUCTION OF PHOTOPOLYMER COMPOSITE FILM
MATERIALS

P.V. Mitin¹; M.Yu. Katsap¹; B.V. Levin¹;
Yu.V. Lyakina¹; V.A. Pchelin¹; D.V. Shumilov¹

p.mitin@giph.su, m.katsap@giph.su, b.levin@giph.su, j.lyakina@giph.su,
v.pechilin@giph.su, d.shumilov@giph.su

¹*АО «Российский научный центр «Прикладная химия (ГИПХ)», Санкт-Петербург, Россия*

JSC «Russian Scientific Center «Applied Chemistry (GIPH)», Saint-Petersburg, Russia

Аннотация

Сообщается о запуске новых производственных мощностей по производству композиционных пленочных материалов методом экструзии. Обсуждаются методы технического контроля готовой продукции и методы научного исследования новых композиционных материалов.

Ключевые слова:

полимерные пленочные материалы, производство, экструзия, технический контроль, комбинационное рассеяние, атомно-силовая микроскопия

Реферат

Сообщается о введении в строй мощностей по производству пленочных материалов экструзионным методом. Сообщается о производительности экструзионного оборудования, его технических особенностях. Рассматривается вопрос технического контроля готовой продукции, перечисляются его методы и приборы. Сообщаются основные характеристики получаемых пленочных материалов. Обсуждается использование методов спектроскопии комбинационного рассеяния и атомно-силовой микроскопии для изучения новых композиционных материалов.

Annotation

It is reported about the launch of new production facilities for the production of composite film materials by extrusion. Methods of technical control of finished products and methods of scientific research of new composite materials are discussed.

Keywords:

polymer film materials, production, extrusion, technical control, raman scattering, atomic force microscopy

Report

It is reported about the commissioning of capacities for the production of film materials by the extrusion method. The performance of the extrusion equipment and its technical features are reported. The issue of technical control of finished products is considered, its methods and devices are listed. The main

characteristics of the obtained film materials are reported. The use of Raman spectroscopy and atomic force microscopy methods for studying new composite materials is discussed.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства растет спрос на химически и атмосфероустойчивые пленочные материалы. Этим требованиям удовлетворяют термопластичные материалы на основе фторполимеров. К фторполимерам, выпускаемым промышленностью относятся этилен-тетрафторэтилен (ETFE) или фторопласт Ф-40, поливинилиден фторид модифицированный тетрафторэтиленом (PVDF) или фторопласт Ф-2М, сополимер тетрафторэтилена и гексафторпропилена (FEP) или фторопласт Ф-4МБ, сополимер тетрафторэтилена с перфторпропилвиниловым эфиром (PFA) или фторопласт Ф-50. Здесь перечислены наиболее востребованные и крупнотоннажные виды фторполимеров.

Значительный спрос имеется на широкие пленки из фторполимеров (более 1500 мм). Такие пленки (особенно из исключительно атмосфероустойчивого этилен-тетрафторэтилена (ETFE) находят применение в сельском хозяйстве как укрывной материал [1]. В последнее время в нашей стране значительный интерес к плёнкам ETFE проявляют в строительной отрасли. Их используют в покрытиях большепролетных зданий и сооружений, в различных строительных конструкциях, в том числе и надувных [2].

Основным способом получения пленочных материалов из термопластов является экструзия из расплава. К экструзионному оборудованию для таких целей предъявляются особые требования к коррозионной устойчивости.

В АО РНЦ «Прикладная химия (ГИПХ)» уже имелся определенный опыт экструзионной переработки фторполимеров. Мы располагаем

укрупнённой лабораторной экструзионной установкой, которая использовалась для наработки опытных партий различных фторполимеров. На ней были наработаны опытные партии протонообменных мембран из сульфополимера Ф-4СФ, используемых в водородных топливных элементах и мембранных электролизерах, партии пленок из фторопласта Ф-3М для изготовления защитных пленок для смотровых стекол в аппаратах электрохимического фторирования.

На основе имеющегося опыта было принято решение о создании промышленного производства пленок из термопластичных фторполимеров. При выборе производителя оборудования остановились на компаниях из Китайской Народной Республики, так как за последние 30 лет КНР сделали гигантский прогресс в химическом машиностроении.

Основная часть

В РНЦ «Прикладная химия» созданы новые производственные мощности по получения пленок из всех видов промышленных термопластичных фторполимеров. Производственный комплекс включает промышленный экструдер с производительностью до 150 кг/час и шириной полотна до 1600 мм. Диапазон толщин получаемых пленочных материалов – от 25 до 300 мкм.

Промышленный экструдер выполнен по одношнековой схеме, с материальным цилиндром с семью зонами нагрева. Контроль температуры осуществляется комбинированным путем – электронагревом и воздушным охлаждением. Загрузочная часть цилиндра на длине $2d$, а также винт охлаждаются водой. Винт компрессионного типа с отношением $L/D=30:1$ выполнен из хастеллоя. Плоскощелевая головка из хастеллоя с шириной оформляющей щели мундштука 1850 мм.

Экструдер оснащен двумя охлаждающими хромированными барабанами. Выдавливаемая из щелевой головки лента расплава полимера

поступает на охлаждающие барабаны и затем на трёхвалковый рольганг для дальнейшего воздушного охлаждения и далее, через системы контроля толщины на основе рентгеновского датчика на тянущую пару гуммированных валков.

Фторполимерные пленки являются химически инертными, с низким значением поверхностного натяжения, что делает их невосприимчивыми к покрытию печатными красками, клеями и покрытиями. Для подготовки к нанесению красок поверхность пленки подвергается обработке коронным разрядом в коронаторе. Далее пленка поступает на двухпостовую систему намотки с кромочными ножами. Кромка подается на режущую мельницу и пневмотранспортом подается обратно в загрузочный бункер.

Пленка, наматываемая на рулоны, по мере готовности режется поперечным ножом.

Для обеспечения контроля качества используется оснащенная производственная лаборатория. Контроль качества начинается с исследования сырья. Определяется показатель текучести расплава с использованием прибора ПТР-ЛАБ-11. Это основной показатель для определения возможных условий экструзии.

Далее исследуются тепловые переходы полимера методом дифференциальной сканирующей колориметрии с использованием прибора ДСК SKZ 1052. Фторполимеры относятся к кристаллическим полимерам. Метод ДСК позволяет определить температуры кристаллизации, плавления и начало термической деструкции.

На рис. 1 приведена полученная нами термограмма образца полимера FEP (аналог Ф-4МБ). Выделены зона плавления с поглощением тепла (слева) и термодеструкции с выделением тепла (справа). Полученные данные используются для выбора тепловых режимов экструзии.

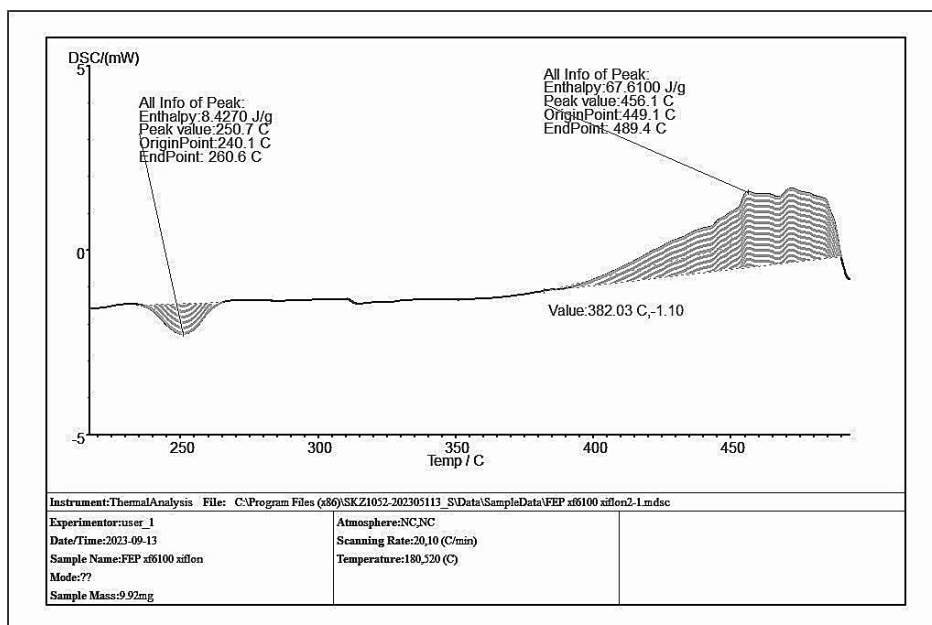


Рис. 1 –Термограмма образца FEP Xiflon 6100 (КНР)

Важным параметром качества исходного сырья является наличие инородных включений или механических примесей. Превышение этого показателя приводит к существенному снижению качества готовой пленки и браку. Для исследования на предмет наличия мехпримесей из репрезентативной пробы гранул полимера изготавливается образец пленки методом горячего прессования. Наличие мехпримесей определяется визуально.

Для получения пленки методом горячего прессования применяется пресс гидравлический обогреваемый с усилием 100 тонн марки ПКВМ-100 и специально изготовленная пресс-форма.

Проверка качества готовой продукции проводится по разработанным техническим условиям на пленочные материалы торговой марки NEVAFLON.

В табл. 1 приведены в основные показатели качества пленки NEVAFLON ETFE.

Таблица 1

Наименование показателя	Норма
1. Внешний вид	Пленка должна быть без складок, трещин и отверстий. Допускаются риски и полосы (следы от формующего инструмента).
2. Прочность при разрыве, МПа, не менее	35,0
3. Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	300

Планируется, что наработка этого материала будет составлять основную часть производственного плана ввиду растущего спроса со стороны сельского хозяйства и строительства. Для этих потребителей основными являются показатели прочности. Регламентируемые нами показатели не хуже, чем у лучших мировых аналогов.

Для исследования прочности на разрыв и относительного удлинения при разрыве применяется разрывная машина МИМ.1

В случае особых требований к электрическим параметрам пленок имеются измеритель иммитанса для определения тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости, для определения удельного объемного сопротивления используется электрометр Keithley 8009.

В планах нашего предприятия расширение номенклатуры выпускаемой продукции в том числе и за счет новых композиционных пленочных материалов. К ним относятся окрашенные и наполненные фторполимеры, используемые в том числе для авиационной отрасли. Инициативные исследования в этом направлении идут на стадии формулировки задачи.

На данном этапе отрабатываются методы анализа полимерных композиций. Наиболее удобным методом исследования оказался метод комбинационного рассеяния (КР) с использованием рамановского микроскопа с источником когерентного излучения 532 нм. Преимущества

этого метода заключаются в возможности исследования непрозрачных сред и небольших объектов (в масштабе микрометра). Имеется возможность сканирования образцов пленок по площади с выявлением неравномерностей в распределении наполнителей. На рис. 2, 3, и 4 представлены рамановские спектры образцов пленок NEVAFLON FER, образца мела и NEVAFLON ETFE. Характеристические пики образцов хорошо идентифицируются и не накладываются друг на друга. По их интенсивности можно определять концентрацию наполнителя в полимере и равномерность его распределения при сканировании образца по площади.

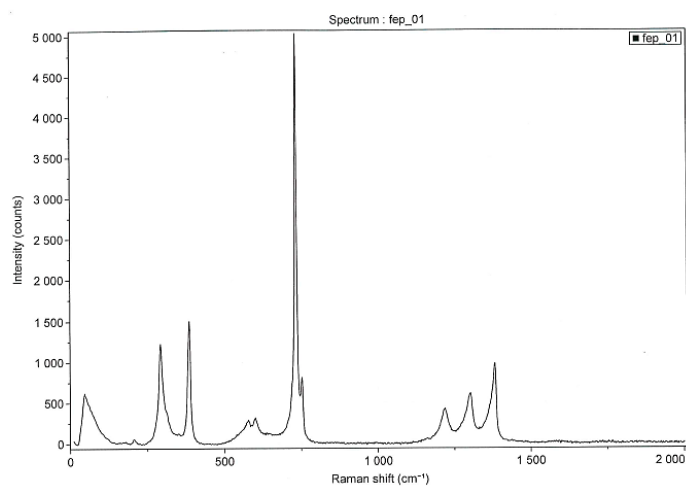


Рис.2– Пленка FER

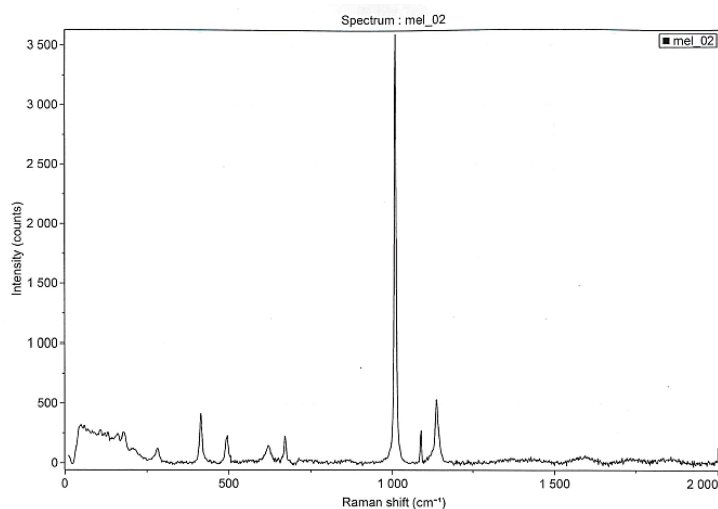


Рис.3– Мел

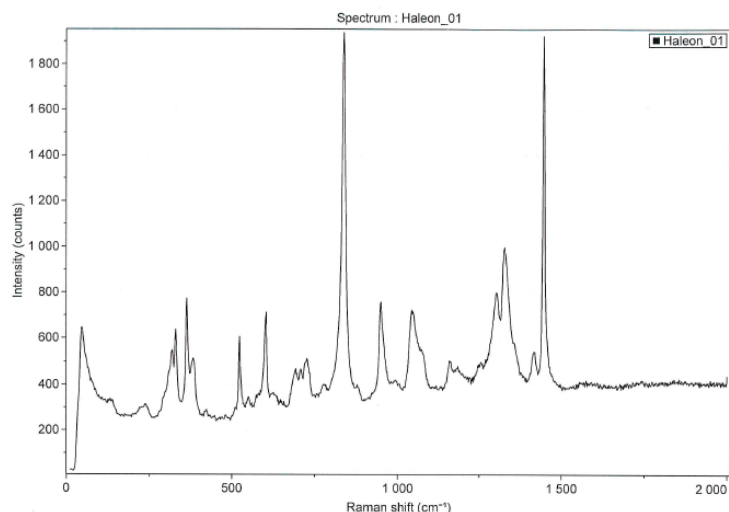


Рис. 4– Пленка ETFE

Ещё одним интересным и перспективным методом исследования наноструктуры полимерных композиций является метод атомно-силовой микроскопии. Этот метод был применён нами в содружестве с Институтом ядерной физики им. Константинова (Санкт-Петербург) при исследовании образцов протонообменной мембраны из сульфополимера (рис. 5 и 6).

При анализе этого изображения (где светлые зоны означают высоты, а темные – впадины) был сделан вывод о наличии крупных кристаллитов и меньшей упорядоченности поверхности в образце № 1 по сравнению с образцом мембраны № 2.

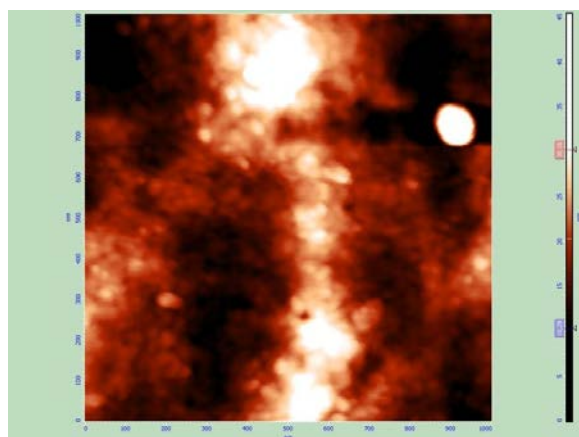


Рис. 5 – Образец № 1 (1×1 мкм)

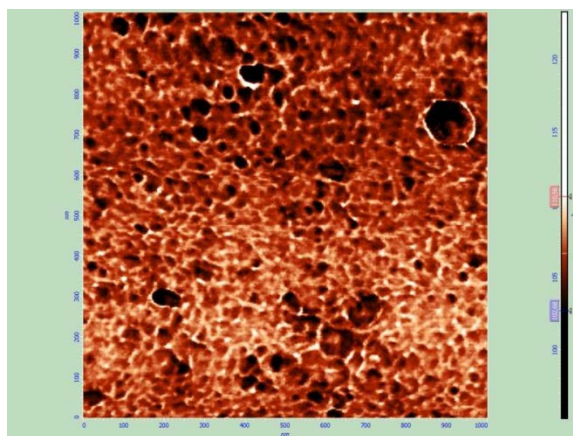


Рис. 6 – Образец № 2 (1×1 мкм)

Для исследования экструзионной переработки новых композиционных фторполимеров, наработки их опытных партий, оптимизации режимов экструзии планируется использовать лабораторный экструдер с производительностью до 4 кг/час, шириной полотна до 300 мм. Этот агрегат изготовлен по одношнековой схеме, имеет три зоны нагрева и один охлаждающий барабан. Поскольку схема с одним охлаждающим барабаном имеет ограничения по возможности обеспечения равной толщины в поперечном сечении пленочного полотна ($\pm 15\%$) разработана конструкция с установкой второго гладильно-калибрующего вала непосредственно у щелевой фильеры по рекомендациям [3]. Такая конструкция позволит производить калиброванную пленку с допусками по толщине полотна в пределах $\pm 5\%$.

Выводы и рекомендации

В Российской Федерации имеется значительный спрос на фторполимерные пленки с шириной полотна 1600 мм. В АО «РНЦ «Прикладная химия (ГИПХ) создана научно-производственная база для коммерческого выпуска широких пленок из фторполимеров, востребованных в строительстве, сельском хозяйстве, аэрокосмической отрасли, других отраслях промышленности. Производство пленок оснащено необходимыми средствами технического контроля для обеспечения надлежащего качества готовой продукции. Научная часть проекта располагает опытной экструзионной установкой для отработки режимов, наработки опытных партий. В качестве методов исследования перспективных материалов разрабатываются методики на основе дифференциальной сканирующей калориметрии, комбинационного рассеяния и атомно-силовой микроскопии. Полученные предварительные результаты с использованием этих методик дают основания рекомендовать их для исследования новых композиционных пленочных материалов.

Литература

1. Smirnova A.S., Meles A., Nemova D.V. Ethylene-Tetrafluoroethylene: A Review //AlfaBuild. 2021. Vol. 16. Article No 1604.
2. Кашина И.В., Киселев И.М., Евлахова Е.Ю. Использование этилен-тетрафторэтилена (этфэ) в покрытиях большепролетных зданий и сооружений //Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 17 (69).
3. Панова Ю.Т., Чижова Л.А., Ермолаева Е.В. Экструзия полимеров и литье под давлением. Учебное пособие для вузов, М.: Юрайт, 2023. С. 68.

**СЕМИПРЕГИ И УГЛЕПЛАСТИКИ НА ИХ ОСНОВЕ
РАЗРАБОТКИ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» - ВИАМ**

К.И. Донецкий¹, к.х.н.; Р.Ю. Караваев¹; Д.В. Быстрикова¹;
А.Д. Грачева¹; М.И. Мищун¹; Н.А. Городилова¹

**SEMIPREGS AND CARBON PLASTICS BASED ON THEM
DEVELOPED BY NRC "Kurchatov Institute" - VIAM**

K.I. Donetskiy¹, Candidate of Sciences (Chem.); R.Yu. Karavaev¹;
D.V. Bystrikova¹; A.D. Gracheva¹; M.I. Mishchun¹; N.A. Gorodilova¹

admin@viam.ru

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ), Москва, Россия

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute» (NRC «Kurchatov institute» - VIAM), Moscow, Russia

Аннотация

Рассмотрены особенности изготовления углепластиков на основе семипрегов, перерабатываемые вакуумным формованием. Установлены основные подходы и требования к связующим, наполнителям и процессам, проходящим во время формования. Приведены свойства ПКМ на основе семипрегов из равнопрочной и однонаправленной тканей и эпоксидного расплавленного связующего разработки НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

Реферат

Представлены материалы для вакуумного формования разработки НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. Описаны особенности изготовления полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе семипрегов, перерабатываемые вакуумным формованием. Установлены основные подходы и требования к связующим, наполнителям и процессам, проходящим во время формования. Обращено внимание на исследования, выполненные зарубежными изготовителями семипрегов. Приведены свойства ПКМ на основе семипрегов из равнопрочной и однонаправленной тканей и эпоксидного расплавленного связующего разработки НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

Ключевые слова:

полимерные композиционные материалы, безавтоклавное формование, вакуумное формование, семипреги, физико-механические свойства

Annotation

The features of manufacturing carbon fiber plastics based on semipregs processed by vacuum molding are considered. The main approaches and requirements for binders, fillers and processes taking place during molding are established, the properties of PCM based on semipregs from equally strong and unidirectional fabrics and epoxy molten binder developed by NRC "Kurchatov Institute" - VIAM are given.

Report

The materials for vacuum forming developed by NRC "Kurchatov Institute" - VIAM are presented. The features of manufacturing polymer composite materials (PCM) based on semipregs processed by vacuum molding are described. The main approaches and requirements for binders, fillers and

processes taking place during molding are established. Attention is drawn to the research carried out by foreign manufacturers of semipregs. The properties of PCM based on semipregs made of equal-strength and unidirectional fabrics and epoxy melt binder developed by NRC "Kurchatov Institute" - VIAM are given.

Keywords:

polymer composite materials, non-autoclave molding, vacuum prepregs, semipregs, physical and mechanical properties

Введение

В авиационной промышленности полимерные композиционные материалы (ПКМ) ввиду их уникальных свойств (низкой плотности и значительных механических характеристик) применяют с самого начала их создания. Такие важные факторы переработки, как температура и давление, отвечают за свойства изготовленных изделий. При этом при производстве использовали давление атмосферы и вакуумируемые пакеты, однако свойства изготавливаемых вакуумной формовкой материалов были невысокими ввиду их значительной пористости [1, 2].

При увеличении масштаба использования и роста требований к свойствам готовых конструкций разработчики и изготовители перешли на автоклавный процесс изготовления, позволяющий гарантировать высокое давление и, соответственно, изготовление более высококачественных материалов. Позже этот метод стал главным для получения высоконагруженных изделий, поскольку он позволяет получать конструкции из низкопористого материала.

Однако, существует потребность замены энергоемкой технологии автоклавного формования на дешевую и простую, с низкими капиталовложениями, позволяющую изготавливать конструкции без ограничений размеров изготавливаемых изделий, которые налагает использование автоклава.

Задача изготовления низкопористых конструкций формовкой под вакуумом привела к появлению как "классических" препрегов для этого метода формования, так и частично пропитанных препрегов – семипрегов. Замена материалов для формования в автоклаве на вакуумные возможна только тогда, когда характеристики изготавливаемых пластиков будут сопоставимы [3–5].

Основным отличием формования семипрега под давлением вакуума от автоклавного, является разница в давлении при сборке слоев препрега при формовании. Если при автоклавном формовании давление, как правило, составляет от 5–7 атмосфер и выше, то при вакуумном – около 1 атмосферы. Как следствие при формовании в автоклаве высокое давление обеспечивает вывод ("задавливание") из пакета присутствующих там влаги и воздуха, а также не дает возможности оставшейся влаге увеличиваться в объеме в процессе нагрева при проведении режима формования. В результате, углепластик, полученный автоклавным формованием, оказывается плотно упакованным и низкопористым. При вакуумном формовании создаваемое давление недостаточно как для полного вывода влаги и воздуха с поверхности семипрега, так и для сдерживания разрастания пор с оставшейся в семипреге влаги при нагреве в процессе режима формования. В результате, композиционный материал, полученный методом вакуумного формования, оказывается пористым, а объемная доля пор может достигать неприемлемых для использования пластика значений. Ввиду этого, подготовка как самого вакуумного семипрега, так и вакуумного пакета перед формованием является принципиальной задачей [6–8].

Несмотря на указанные сложности, метод вакуумного формования семипрегов является весьма перспективным. Его применение позволит исключить дорогостоящие энергоемкие автоклавы, что примерно на

четверть снизит стоимость изделий за счет удешевления оборудования и в несколько раз энергопотребление.

Отказавшись от высокого автоклавного давления формования, используя только давление атмосферы, необходимо найти такие материалы и такие технологии их переработки, чтобы получать изделия из материалов с минимальной пористостью и свойствами на уровне автоклавного формования. Для достижения этой цели были предложены и разработаны соответствующие расплавные связующие и технологии их нанесения на армирующие наполнители для получения «семипрегов», состоящих из пленки связующего с одной стороны и сухого армирующего наполнителя с другой, имеющего каналы в волокнистой структуре непропитанной части наполнителя для удаления воздуха перед формованием [9–12].

Свойства компонентов, составляющих структуру композита (волокно, связующее и поры) взаимно влияют на процессы, происходящие во время формования. В целом, свойства волокна и структура волокнистого слоя являются достаточно стандартизованными, тогда как свойства связующих в составе семипрегов находятся в стадии развития и становления. Наличие свободных от связующего зон, в семипрегах, для вакуумного формования должны оставаться такими долгое время вплоть до начала нагревания собранного пакета после удаления воздуха и влаги. Это накладывает определенные требования к связующему: первая стадия – удаление воздуха при комнатной температуре – связующее должно оставаться вязким и не пропитывать семипрег; вторая же стадия заключается в нагревании связующего для снижения вязкости и пропитке сухих зон под действием давления атмосферы, при этом вязкость должна быть достаточной, чтобы пропитать полностью все пустое пространство [13].

Вопросами разработки и исследования процессов безавтоклавного формования изделий из углепластиков на основе семипрегов с односторонним нанесением пленки связующего за рубежом уделяется большое внимание. В настоящее время появляется много информации об активном внедрении таких материалов в производство различной авиационной техники как военного, так и гражданского назначения. Так, за рубежом, изготовили семипрег для элемента перспективного фюзеляжа грузового транспортного самолета (рис. 1).



Рис. 1 – Изготовление с использованием семипрега для элемента фюзеляжа грузового транспортного самолета

К сожалению, в нашей стране это направление не развито, основные исследования и разработки происходят лишь в области препреговых и жидкостных технологий.

Японские ученые, работающие в этой области, модифицировали связующее и ввели контроль направлением волокон при ткачестве, на основе которых методом пропитки под давлением получают углепластики со свойствами аналогичными автоклавному формованию [14].

В настоящее время существует порядок процесса формования изделий, определены как времена вакуумирования собранного пакета, так и параметры его нагрева. В отличие от жидкостного метода формования

изделий, которое может привести к образованию наплыва связующего или сухих непропитанных пятен, использование семипрегов обеспечивает равномерное его распределение и содержание пор менее одного процента.

Активное внедрение таких материалов в производство различной современной техники в настоящее время происходит все чаще.

Таким образом, использование ПКМ на основе разработанных материалов позволит:

- снизить до 20 % себестоимость элементов конструкций на основе полученных вакуумным способом формования относительно энергозатратного и дорогостоящего автоклавного формования;

- снизить до 40 % вес деталей при замене металлических сплавов на ПКМ;

- повысить технологичность сборки вакуумного пакета за счет обеспечения необходимой липкости;

- снизить выброс в атмосферу вредных веществ (т.к. отсутствуют летучие соединения), за счет использования расплавленного эпоксидного связующего при изготовлении элементов методом вакуумного формования;

- в случае с использованием семипрегов, сократить время вакуумирования заготовки.

Таким образом, развитие и применение данных решений в высокотехнологичных отраслях российской промышленности позволит придать дополнительный импульс в изготовлении новых образцов техники различного применения.

Материалы и методы

Объектом исследований являются семипреги марок ВКУ-69 и ВТкУ-69/ВТкУ-2.200, которые изготавливаются на пропиточной установке (рис. 2).



Рис. 2 – Установка, предназначенная для изготовления препрегов/семипрегов

Производство семипрега включает в себя следующие стадии:

- подготовка связующего к проведению пропитки, заключающаяся в разморозке связующего в течение 1 суток при температуре от 0 до 6 °С, дроблению на куски, с последующим разогревом в термошкафу до необходимой температуры;

- подготовка установки к пропитке, заключающаяся в заправке наполнителем. Установка антиадгезионной бумаги, полиэтиленовой пленки, картонных шпυль на соответствующие узлы установки. Протяжка наполнителя, бумаги и пленки через лентотракт установки;

- настройка технологических параметров пропитки, заключающаяся в выставлении температур валов, нагревательных плит, каландров и ламинаторов по соответствующим режимам, установление зазоров между валами и давления в пневмоцилиндрах каландров;

- отработка процесса получения пленки связующего на подложке с оптимальной поверхностной плотностью для последующего получения семипрегов с оптимальной поверхностной плотностью;

- пропитка наполнителя полимерным связующим по установленным режимам.

Для получения качественного пластика методом вакуумного формования со свойствами, приближенными к свойствам аналогичного

автоклавного материала, была уточнена технология процесса вакуумного формования семипрега.

В качестве связующего используется связующее марки ВСЭ-68, на которое выпущены: Технологическая инструкция с литерой «О», Технические условия, а также получен Патент на изобретение.

Возможно изготовление связующего в Воскресенском экспериментальном технологическом центре (ВЭТЦ – «НИЦ «Курчатовский институт») или в НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ в лаборатории № 612. Возможно изготовление высоковязких композиций с системой подогрева и их вакуумирования. Производительность составляет до 30 тонн/год.

Основные характеристики связующего марки ВСЭ-68 представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики связующего марки ВСЭ-68

Свойства	Связующее марки ВСЭ-68
Вязкость связующего при температуре (50 °С), Па·с	2085
Вязкость связующего при температуре переработки (70 °С), Па·с	80
Вязкость связующего при температуре переработки (70 °С) после в течение 3 часов, Па·с	82
Вязкость связующего при температуре переработки в ПКМ (125 °С), Па·с	5
Температура стеклования ($T_{g_{dry}}$), °С	175,7
Время гелеобразования при 120 °С, мин	93
Температура отверждения, 180 °С	180
Степень отверждения при температуре 180 °С, %	98,9

Установлено, что вязкости связующего марки ВСЭ-68 увеличивается при температуре переработки 70 °С в течение 3 часов на 3 % относительно вязкости связующего при температуре переработки 70 °С в исходном состоянии, при этом вязкость связующего при температуре переработки в

ПКМ при 125 °С составляет не более 5 (Па·с), что подтверждает его использование при изготовлении семипрегов.

Температура стеклования составляет не менее 175 °С, что позволяет сделать вывод о возможности изготовления изделий из семипрегов, с рабочей температурой до 120 °С.

Максимальная температура формования: 180 °С – отверждение проводится по ступенчатому режиму.

Наполнителями в семипрегах являются:

– равнопрочная углеродная ткань марки ВТкУ-2.200 при изготовлении семипрега марки ВКУ-69/ВТкУ-2.200;

– однонаправленной углеродная ткань марки ВТкУ-3 при изготовлении семипрега марки ВКУ-69.

На рисунке 3 представлена установка для изготовления наполнителей – ткацкий станок для изготовления углеродной ткани марки ВТкУ-3 и углеродной ткани марки ВТкУ-2.200, а также реактор для изготовления связующего.

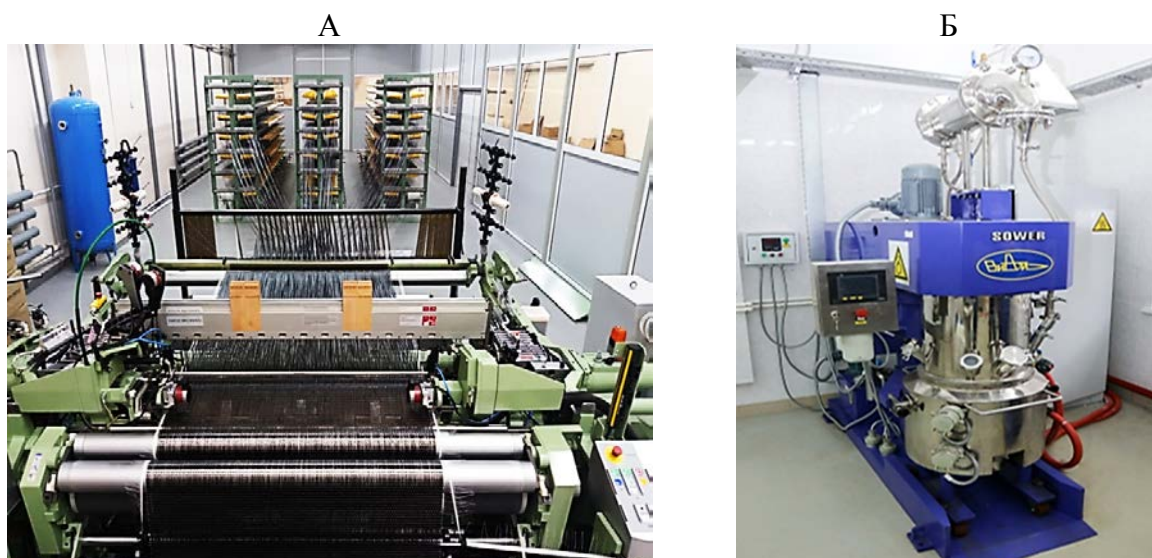


Рис. 3 – А) ткацкий станок для изготовления углеродных наполнителей; Б) реактор для изготовления связующего марки ВСЭ-68

Далее проведены испытания материалов (связующего, углеродных наполнителей и семипрегов) и построена зависимость параметров формования семипрегов от реологических характеристик связующего и проницаемости наполнителей. С использованием полученных результатов разработаны расчетные модели и проведено моделирование постадийного процесса вакуумного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей и расплавленного эпоксидного связующего марки ВСЭ-68 с учетом кинетики отверждения, содержания связующего и усадки пакета слоев.

Проведена экспериментальная отработка процесса вакуумного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей (ленты и ткани) с помощью: диагностики процесса формования с использованием программно-аппаратных средств и исследования проникновения связующего в наполнитель с применением маркерных слоев методом высокоразрешающей электронной микроскопии с энергодисперсионным спектрометром.

По результатам проведенной работы выбраны оптимальные режимы получения углепластиков методом вакуумного формования семипрегов на основе углеродных наполнителей (ленты и ткани) и расплавленного эпоксидного связующего.

Отработав различные схемы сборок вакуумных пакетов, вспомогательных слоев, а также подобрав оптимальные режимы изготовления, позволило получить бездефектные углепластики, с минимальным содержанием пор.

Также стоит обратить внимание, что для изготовления безавтоклавным способом формования семипрегов используется оборудование (сушильный шкаф и вакуумный насос), не требующее больших финансовых и энергетических затрат при их приобретении и обслуживании.

Результаты и обсуждение

По разработанной технологии на пропиточной установке изготовлены партии семипрегов углепластиков марки ВКУ-69 и марки ВКУ-69/ВТкУ-2.200:

– на основе углеродного наполнителя (однонаправленной ленты – углеродной ткани марки ВТкУ-3) и расплавного эпоксидного связующего марки ВСЭ-68,

– на основе углеродного наполнителя (углеродной ткани марки ВТкУ-2.200) и расплавного эпоксидного связующего марки ВСЭ-68.

Из полученных партий семипрегов изготовлены образцы и исследованы их основные свойства (табл. 2):

Таблица 2

Основные свойства семипрегов углепластиков марки ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200

Свойства	Значения
Семипрег углепластика марки ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200	
Поверхностная плотность семипрега, г/м ²	313 ± 33
Содержание связующего в семипреге, масс. %	36 ± 4
Толщина монослоя, мм	0,20 ± 0,02

На основе статистического анализа комплекса полученных свойств выбраны нормированные показатели качества и разработаны 2 ТУ на семипреги, в которых указаны показатели их качества.

Для проведения испытаний из полученных партий семипрегов методом вакуумного формования были изготовлены монолитные плиты углепластиков марок ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200.

Проведенный ультразвуковой контроль монолитных плит высокочастотным эхо-импульсным методом путем сканирования преобразователем по всей площади плит углепластиков марок ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200 показал отсутствие дефектов в монолитных плитах углепластиков.

Из монолитных плит углепластиков марок ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200 вырезаны образцы и исследованы их основные свойства: предел прочности и модуль упругости при растяжении по ГОСТ Р 56785-2015, предел прочности при изгибе по ГОСТ Р 56810-2015, плотность по ГОСТ 15139-69, пористость (объемная доля пористости) по ТР 1.2.2883-2020, температура стеклования по ГОСТ Р 56753-2015 (табл. 3).

Таблица 3

Основные свойства углепластиков марок ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200

Свойства	Значения
Углепластик марки ВКУ-69	
Прочность при растяжении, МПа	2130
Модуль упругости при растяжении, ГПа	130
Прочность при изгибе, МПа	1470
Плотность, кг/м ³	1555
Температура стеклования, °С	174
Пористость, %	0,35
Углепластик марки ВКУ-69/ВТкУ-2.200	
Прочность при растяжении, МПа	770
Модуль упругости при растяжении, ГПа	63
Прочность при изгибе, МПа	925
Плотность, кг/м ³	1536
Температура стеклования, °С	174
Пористость, %	0,45

Таким образом, можно сделать вывод, что семипреги, перерабатываемые безавтоклавным формованием имеют высокие физико-механические свойства, наряду с низкой пористостью. Это позволяет им конкурировать с препрегами, перерабатываемым автоклавным методом формования.

Проведены работы по общей квалификации (паспортизации) углепластиков марок ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200. Определен комплекс физико-механических и эксплуатационных свойств (табл. 4).

Таблица 4

Свойства углепластиков марок ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200
после воздействия эксплуатационных факторов

Свойства	Температура испытания, °С	Контрольный показатель	После термического старения при 120 °С (2000 ч)	После термо-влажностного старения (90 сут)	После экспозиции на влагонасыщение (90 сут)	После экспозиции и на водонасыщение (90 сут)	После экспозиции в топливе ТС-1 (90 сут)	После экспозиции в масле ИПМ-10 (90 сут)
Углепластик марки ВКУ-69								
Прочность при изгибе, МПа	23	1470	1485	1150	1160	1150	1290	1270
	120	1090	1120	650	740	740	930	990
Углепластик марки ВКУ-69/ВТкУ-2.200								
Прочность при изгибе, МПа	23	925	1015	820	980	960	970	945
	120	885	960	585	640	760	850	850

По результатам испытаний углепластиков марок ВКУ-69, ВКУ-69/ВТкУ-2.200 установлено, что сохранение прочности при изгибе после воздействия эксплуатационных факторов, перечень которых представлен в таблицах 4, при температурах испытаний 23 и 120 °С составляет не менее 60 и 66 % соответственно относительно контрольных показателей (по средним значениям).

Также, изготовлены конструктивно-подобные образцы (КПО) конструкций, имеющие криволинейные внутренние и внешние радиусы перегибов. Изготовлены КПО размерами 310×165 мм, толщиной от 2,5 до 10,5 мм в количестве 2 шт. с использованием семипрегов на основе углеродных наполнителей.

Внешний вид полученных КПО с использованием семипрегов углепластиков марок ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200 представлен на рис. 5.

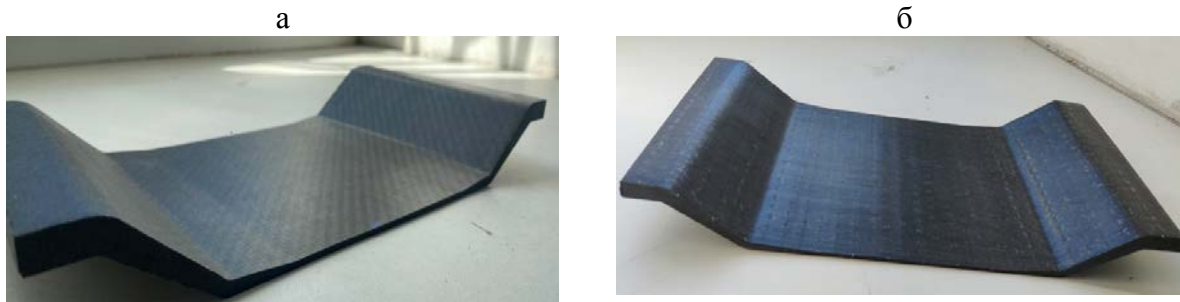


Рис. 5 – а) внешний вид конструктивно-подобного образца с использованием семипрега углепластика марки ВКУ-69/ВТкУ-2.200, б) внешний вид конструктивно-подобного образца с использованием семипрега углепластика марки ВКУ-69

Исследованы следующие свойства образцов, вырезанных из 2-х КПО из различных областей:

- неразрушающий (ультразвуковой) контроль;
- плотность;
- объемная доля пор (ОДП) методом рентгенографическим контролем;

Исследования проводились высокочастотным эхо-импульсным методом неразрушающего контроля с чувствительностью контроля, эквивалентной выявлению плоскодонного отражателя диаметром 5 мм. По результатам контроля КПО дефектов, площадью более чем площадь плоскодонного отражателя диаметром 5 мм, не обнаружено.

В таблице 5 представлены полученные результаты исследований свойств образцов, вырезанных из КПО на основе семипрегов углепластиков марки ВКУ-69 и марки ВКУ-69/ВТкУ-2.200.

Таблица 5

Свойства конструктивно-подобных образцов (КПО) обшивки панели корпусной конструкции с использованием семипрегов марок ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200

Наименование показателя	КПО на основе семипрега ВКУ-69	КПО на основе семипрега ВКУ-69/ВТкУ-2.200
Плотность, кг/м ³	не более 1542	не более 1569
Пористость (объемная доля пор), %	не более 0,38	не более 0,62

На рисунке 6 представлена 3-D визуализация образцов, вырезанных из изготовленных КПО на основе семипрегов углепластиков марок ВКУ-69 и ВКУ-69/ВТкУ-2.200 при проведении рентгеновской компьютерной томографии (РКТ).

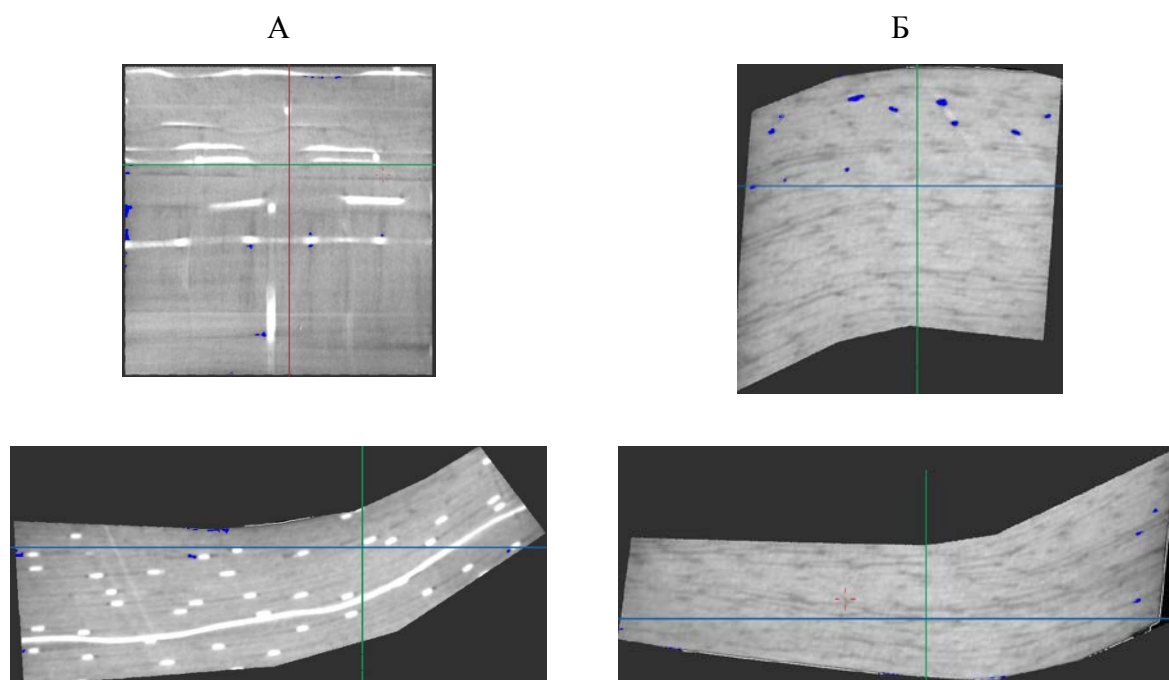


Рис. 6 – А) визуализация образцов, вырезанных из изготовленных КПО на основе семипрегов углепластиков марок ВКУ-69; Б) ВКУ-69/ВТкУ-2.200 при проведении рентгеновской компьютерной томографией (РКТ)

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что семипреги, перерабатываемые безавтоклавным формованием имеют высокие физико-механические свойства, наряду с низкой пористостью. Это позволяет им конкурировать с препрегами, перерабатываемым автоклавным методом формования.

Представляется несомненно важным знание закономерностей процесса и технологии изготовления полимерных композиционных материалов на основе вакуумных технологий формования, в целях получения материала со свойствами, которые от него ожидают.

Литература

1. Терехин Б.П. Технологические особенности изготовления крупногабаритных изделий из стеклопластика. Стеклотекстолиты и другие конструкционные пластики. М.: Оборонгиз, 1960. 168 с.
2. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Исследование технологических параметров автоклавного формования деталей из полимерных композиционных материалов // Клеи, герметики, технологии. 2013. № 8. С. 12–15.
3. Ridgard C. Out of Autoclave Composite Technology for Aerospace, Defense and Space Structures // SAMPE International Symposium. 2009. P. 134–136.
4. Thomas S., Bongiovanni C., Nutt S. R. In Situ Estimation of through-Thickness Resin Flow using Ultrasound // Compo-sites Science and Technology. 2008. V. 68. № 15–16. P. 3093–3098.
5. Grunenfelder L.K., Nutt S.R. Void Formation in Composite Prepregs – effect of Dissolved Moisture // Compo-sites Science and Technology. 2010. V. 70. № 16. P. 2304–2309.
6. Донецкий К.И., Душин М.И., Мищун М.И., Севастьянов Д.В. Некоторые особенности применения семипрегов для вакуумного формования ПКМ (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 12 (60). Ст. 08. <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-8-8.
7. Out-of-autoclave prepregs: Hype or revolution? Composites World [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.compositesworld.com/articles/out-of-autoclave-prepregs-hype-or-revolution> (дата обращения: 14.11.2023).
8. Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Особенности изготовления изделий из ПКМ методом пропитки под давлением. Авиационные материалы и технологии 2012. № 1.

9. Hahn G.L., Bond G.G., Fogarty J.H. Non-autoclave (prepreg) manufacturing technology: part scale-up with CYCOM 5320-1 prepregs. SAMPE 2011. Long Beach, CA.: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering; 2011.

10. Fahrang L., Fernlund G. Void evolution and gas transport during cure in out-of-autoclave prepreg laminates. SAMPE 2011. Long Beach, CA.: Society for the Advancement of Materials and Process Engineering; 2011.

11. Костюков В.И. Стеклопластики на основе капиллярных волокон и микросфер. Научно-технический сборник. Авиационные материалы на рубеже XX-XXI века. М. 1994. ВИАМ, С. 197–203.

12. Душин М.И., Мухаметов Р.Р., Платонов А.А., Меркулова Ю.И. Исследование фильтрационных характеристик армирующих наполнителей и связующих при разработке технологии безавтоклавного формования полимерных композиционных материалов. Авиационные материалы и технологии 2013; № 2;

13. Sloan J. Research sheds light on air and air-bubble behavior in OOA aerospace prepregs. Case Study Post: 6/1/2015.

14. Umemoto Y., Gouke M., Mashima Y. Out of autoclave «semi-preg». Technical development of resin transfer molding // 18th International conference on composite materials. London, January 18-19, 2016.

УДК: 691.175.3

**К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ СТРУКТУРНО-ИМИТАЦИОННОЙ
МОДЕЛИ ВОЛОКНИСТЫХ ГИБРИДНЫХ КОМПОЗИТОВ
КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

А.И. Валиев¹; А.М. Сулейманов¹, д.т.н.

**TO THE ISSUE OF DEVELOPMENT OF STRUCTURAL-
SIMULATION MODEL OF FIBER HYBRID COMPOSITES FOR
STRUCTURAL PURPOSES**

A.I. Valiev¹; A.M. Suleymanov¹, Ph.D. in Technical Sciences

tatcomposite@mail.ru

*¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация*

*¹Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian
Federation*

Аннотация

Представлены результаты исследований по вопросам разработки структурно-имитационной модели волокнистых гибридных композитов конструкционного назначения, которая на этапе проектирования позволяет решить ряд проблем, связанных с деформативностью, межфазным адгезионным взаимодействием.

Ключевые слова:

стеклопластик, углепластик, гибрид

Abstract

The paper presents the results of research on the development of a structural-simulation model of fiber hybrid composites for structural purposes, which at the design stage allows solving a number of problems related to deformability, interfacial adhesive interaction.

Keywords:

fiberglass, carbon fiber, hybrid

Реферат

В исследовании представлены результаты смачиваемости элементарных волокон различной природы с низковязким эпоксидным связующим, выполнены гибридные композиты на основе сочетания стеклянных и углеродных волокон, симметрично относительно срединной плоскости поперечного сечения, методом вакуумной инфузии, выполнены численные эксперименты, натурные испытания гибридных композитов, выявлены входные/выходные данные прогнозирования работоспособности гибридных композитов для построения аналитической модели на основе искусственных нейронных сетей.

Summary

The study presents the results of wettability of elemental fibers of different nature with low-viscosity epoxy binder, hybrid composites based on the combination of glass and carbon fibers, symmetrically relative to the median plane of the cross-section, by vacuum infusion method, numerical experiments, full-scale tests of hybrid composites, input/output data predicting the performance of hybrid composites to build an analytical model based on artificial neural networks are revealed.

Введение

Разработка новых классов композитов, расширение сферы полимерных композитов конструкционного назначения, в частности в сфере строительства, подталкивают развитие исследований по регулированию и прогнозированию их физико-механических свойств, методов расчета [1–3].

Гибридные композиты на основе сочетания различных типов волокон в единой полимерной матрице в строительстве позволяют решить проблему в обеспечении прочности согласно второй группе предельных состояний, по которому элементы конструкций должны удовлетворять нормальным условиям эксплуатации (в частности по деформациям), препятствуя уменьшению долговечности по сравнению с предусматриваемым сроком службы. Достижение предельных деформаций элементов конструкций, устанавливаемых исходя из технологических, конструктивных, эстетико-психологических требований по ГОСТ 27751-2014 и СП 20.13330.2016 (предельные прогибы, нормативные и расчетные значения нагрузок) [4–6].

Разработка научных принципов формирования гибридных (гетероволокнистых) полимерных композиционных материалов конструкционного назначения с прогнозированием их работоспособности является актуальной задачей строительного материаловедения [7–9].

В целях разработки структурно-имитационной модели гибридных (гетероволокнистых) композитов с оптимальным содержанием различных типов волокон в полимерном связующем, межфазным взаимодействием на границе «волокна-матрица», можно выделить несколько основных этапов:

Этап 1 – Разработка численной модели гибридного композита с целью определения оптимального содержания различных наполнителей с последующей верификацией численной модели по результатам натурных испытаний композитов;

Этап 2 – Оценка смачиваемости волокон в полимерном связующем с целью обеспечения межфазной области «волокно-матрица», которая при максимальном эффекте позволяет в значительной степени использовать прочность наполнителя;

Этап 3 – Разработка аналитических моделей по прогнозированию свойств, изготавливаемых гибридных композитов, с использованием средств машинного обучения (искусственных нейронных сетей и др.).

Каждый из указанных этапов исследуется на стыке различных областей наук (физической химии, твердого тела, классической механики и др.), требует современного уровня развития.

Используемые материалы и методы исследования

В качестве волокон в исследовании приняты:

- а) Углеродная ткань Fib Arm Tape 230 (ТУ 1916-018-61664530-2013);
- б) Стекланная ткань Ortex 400 O 250 (ТУ 13.20.46.000-006-52788109-2019).

В качестве материала связующего принята эпоксидная низковязкая смола L (является бисфенольной (A+F) с алифатическим отвердителем GL2 производства R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH.

Оптическим методом с горизонтальным расположением упрощенного стереоскопического микроскопа МПСУ-1 (при увеличении оптической головки в 4,8 крат) путем присоединения адаптера AmScope SLR/DSLR (с увеличением 2×) совместимым с зеркальным фотоаппаратом Nikon D3100 (14,2 мегапикселей) были получены микрофотографии смачивания стекланных, углеродных элементарных волокон с исходными аппретами с низковязкой эпоксидной смолой L.

Гибридные композиты (с однонаправленным армированием) изготавливались методом вакуумной инфузии с использованием мобильной установки для инфузии МВС-20-01. Гибридный композит

состоит из слоев угле- стеклопластика (4 слоя углеродной ткани, 17 слоев стеклянной ткани), симметрично относительно нейтральной оси.

Выполнены численные эксперименты с применением ПК «ANSYS», натурные испытания гибридных композитов на трехточечный изгиб (согласно ГОСТ Р 56805-2015).

Выделены входные/выходные данные, необходимые для прогнозирования упруго-механических характеристик гибридных композитов с использованием искусственных нейронных сетей.

Экспериментальная часть

В рамках выполнения первого этапа выполнена численная модель гибридных композитов, основанная на методе конечных элементов в ПК «ANSYS». Конечная элементная модель гибридного композита представлена на рис. 1 (выполнена половина балки за счет симметрии), напряженно-деформированное состояние гибридного композита при трехточечной схеме нагружения представлена на рис. 2.

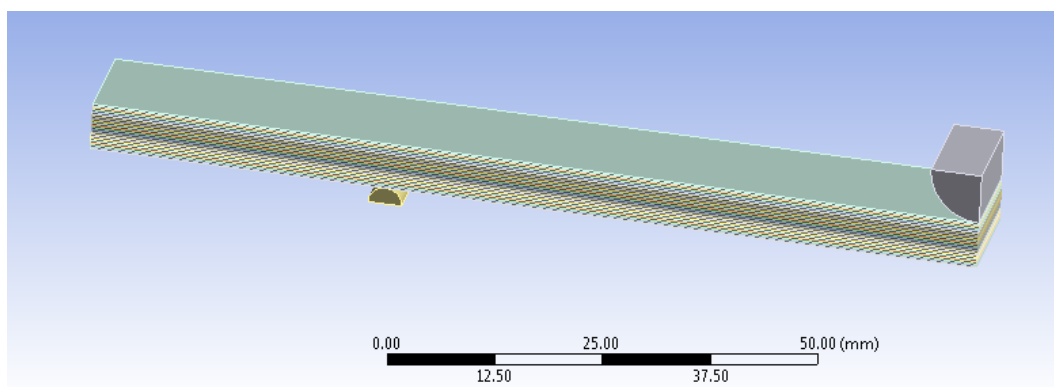


Рис. 1 – Конечно-элементная модель гибридного композита

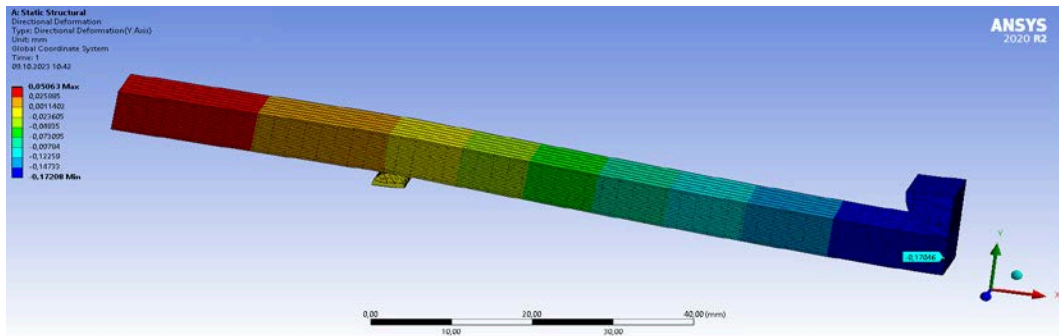


Рис. 2 – Напряженно-деформированное состояние гибридного композита при трехточечной схеме нагружения

Для выполнения второго этапа рассмотрена смачиваемость элементарных стеклянных и углеродных волокон, одна из картин смачивания стеклянного волокна со низковязкой эпоксидной смолой L представлено на рис. 3.



Рис. 3 – Смачивание стеклянного моноволокна, погруженного в смолу L

Результаты определения смачиваемости стеклянных и углеродных элементарных волокон путем определения краевых углов смачивания представлено в таблице 1.

Таблица 1

Поверхность	Краевой угол смачивания, $\theta, ^\circ$
	Смола L
Стеклянное моноволокно	9
Углеродное моноволокно	16

Также выполнены натурные испытания гибридного композита на трехточечный изгиб, диаграмма «напряжение-относительная деформация» представлена на рис. 4.

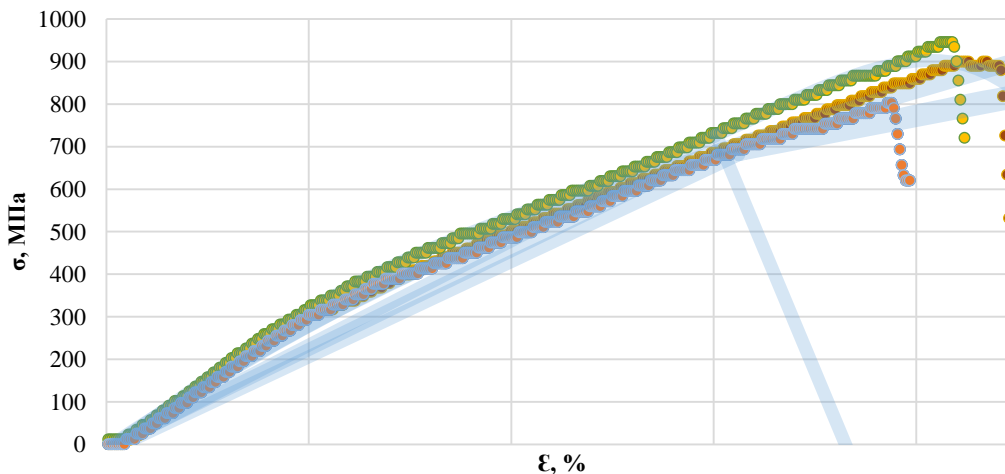


Рис. 4 – Результаты натурных испытаний гибридных композитов при трехточечном изгибе

Результаты определения прогиба гибридного композита по результатам натурных испытаний и численного моделирования при нагрузке $F=20$ Н приведены в таблице 2.

Таблица 2

Материал	w (натурный эксперимент)	w (по результатам расчета в ПК «ANSYS 2020 R2»)
Гибридный композит	0,114	0,170

Обеспечение упруго-механических свойств готового изделия из гибридного композита определяющим образом обеспечивается в межфазной области, которая зависит от смачиваемости волокон в полимерном связующем, также возможно проявление синергетических эффектов (положительных либо отрицательных), которые подразумевают явление, при котором свойство гибридных композитов не определяются по правилу аддитивности (не определяются свойствами отдельно взятых

компонентов), причинами могут служить различие морфологий поверхностей волокон, различия КЛТР и др.

В рамках выполнения третьего этапа выявлены основные входные и выходные данные для прогнозирования упруго-механических характеристик гибридного композита по результатам численных испытаний с использованием искусственных нейронных сетей и представлены на рис. 5 и 6.

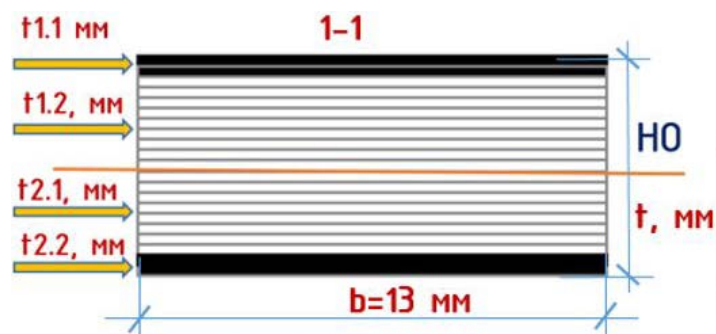


Рис. 5 – Поперечное сечение гибридного композита для аналитической модели

- ⇒ X1 – Общая толщина, t , т.е. количество слоев (стекло- и угле-тканей), мм
- ⇒ X2 – Толщина С(С), $t_{1.1}$, количество стеклотканей в сжатой зоне, мм
- ⇒ X3 – Толщина У(С), $t_{1.2}$, количество углетканей в сжатой зоне, мм
- ⇒ X4 – Толщина С(Р), $t_{2.1}$, количество стеклотканей в растянутой зоне, мм
- ⇒ X5 – Толщина У(Р), $t_{2.2}$, количество углетканей в растянутой зоне, мм
- ⇒ X6 – Пролет, l , стандартное соотношение толщины к длине (1:32), мм
- ⇒ X7 – Стоимость, C , согласно рыночным, мм

Входные данные

- ⇒ Y1 – Нагрузка, F , соответствующая допустимому прогибу согласно СП 20.13330, Н
- ⇒ Y2 – Допустимый прогиб, f , согласно СП 20.13330, мм

Выходные данные

Рис. 6 – Входные/выходные данные для построения аналитической модели с использованием искусственных нейронных сетей

Заключение

Таким образом, для решения научной проблемы по обеспечению прочного взаимодействия компонентов в гибридном композите конструкционного назначения для последующего внедрения, необходимым является:

– оптимальный выбор компонентов (предпочтительно с равным диаметром волокон, близкими значениями КЛТР, обеспечение хорошей смачиваемости поверхностей волокон различной природы в полимерной матрице);

– обеспечение оптимальности содержания слоев гетероволокон симметрично относительно срединной плоскости, подбор схем армирования, материалов оснасток;

– выполнение численных расчетов с последующей верификацией для прогнозирования физико-механических характеристик готового изделия, в том числе с применением машинного обучения.

Литература

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.

2. Цыгвинцев И.В. Применение композитных материалов в строительстве / И.В. Цыгвинцев, П.И. Постникова, И.В. Сенцов // Инновационное развитие. 2017. № 7(12). С. 26–29.

3. Агеева Т.Г., Баринов Д.Я., Просвириков В.М. Определение теплофизических и оптических характеристик гибридных композиционных материалов для крыла суборбитального многоразового космического аппарата туристического класса // XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и

других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, 2017. С. 44–45.

4. Identification of Mechanical Characteristics of a Nonlinear-Viscoelastic Composite by Results of Tests on Shells of Revolution, издательство: Springer Science+Business Media, LLC, New York, Россия, Механика композиционных материалов и конструкций, 2019. С. 171–180.

5. Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1 // Труды ВИАМ. 2022. № 6 (112). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67.

6. Гибридные полимерные композиционные материалы для авиации на основе волокнистых наполнителей (Обзор) / Е.Д. Колпачков, А.О. Курносов, А.П. Петрова, А.Е. Раскутин // Вопросы материаловедения. – 2020. № 1(101). С. 126–138. DOI 10.22349/1994-6716-2020-101-1-126-138.

7. Karamov, R., Akhatov, I., Sergeichev, I.V. Prediction of Fracture Toughness of Pultruded Composites Based on Supervised Machine Learning. Polymers 2022, 14. <https://doi.org/10.3390/polym14173619>.

8. Fernandes, L.A., Silvestre, N., Correia, J.R. Characterization of transverse fracture properties of pultruded GFRP material in tension. Compos. Part B Eng. 2019, 175. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107095.

9. Ramprasad, R.; Batra, R., Pilia, G., Mannodi-Kanakkithodi, A., Kim C. Machine learning in materials informatics: Recent applications and prospects. NPJ Comput. Mater. 2017, 3, 1. DOI: 10.1038/s41524-017-0056-5.

УДК 668.395

МОДИФИЦИРОВАНИЕ СФЕРОПЛАСТИКА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОНСТРУКЦИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.С. Магрицкий¹; А.А. Богачев¹; И.В. Авцынова¹; В.А. Шогенов¹

MODIFICATION OF SPHEROPLASTIC USED IN THE MANUFACTURE OF AEROSPACE STRUCTURES

A.S. Magritsky¹; A.A. Bogachev¹; I.V. Avtsynova¹; V.A. Shogenov¹

chebogachev@yandex.ru, 1709mas97@mail.ru, avcynov1@rambler.ru,
ShogenovVA@technologiya.ru

¹АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», г. Обнинск, Калужская обл., Россия

¹«JSE «Technologiya» named after A.G. Romashin», Obninsk, Kaluga Region, Russia

Аннотация

Объектом исследования является сферопластик, используемый для местного упрочнения панелей сотовых конструкций с целью повышения их прочности и жесткости в зонах установки крепежа и заделки торцевых частей сотовых конструкций различных назначений на АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина». Предметом исследования в данной работе является возможность увеличения физико-механических и технологических характеристик путем наномодифицирования. В работе применялись методы экспериментального исследования упруго-деформационных и реологических свойств модифицированного сферопластика. Показано положительное влияние

наномодифицирования на технологические и эксплуатационные характеристики сферопластика, применяемого при изготовлении интегральных конструкций авиакосмического назначения.

Ключевые слова:

сотовые заполнители, сферопластики, полимерные композиционные материалы, углеродные нанотрубки, фуллерен, модификация

Abstract

The object of the study is spheroplastic used for hardening and filling the end parts of honeycomb structures of various purposes at JSC «ONPP «Technology» named after A.G. Romashin». The subject of the study in this work is the possibility of increasing the physical, mechanical and technological characteristics of this composition by nanomodification. The methods of experimental research of elastic-deformation and rheological properties of the modified spheroplastic were used in this work. The positive effect of nanomodification on technological and operational characteristics of spheroplastic used for local hardening in the manufacture of integrated structures for aerospace purposes, is shown.

Keywords:

cellular structures, spheroplastics, polymer composite materials, carbon nanotubes, fullerene, modification

Применение трехслойных конструкций, элементы которых состоят из двух несущих композитных обшивок и сотового заполнителя между ними, во многом определило успешное развитие авиационной и ракетно-космической техники, а вместе с тем дало толчок развитию технологии клееных тонкостенных конструкций с использованием в качестве материала сотовых заполнителей алюминиевой фольги и полимерной бумаги. Сотовый заполнитель, связывающий оболочки, работает на сдвиг и повышает изгибную жёсткость интегральной конструкции, её эффективность по массе и несущую способность. [1]. Для местного

упрочнения панелей сотовых конструкций с целью повышения их прочности и жесткости в зонах установки крепежа, для заделки торцевых участков, заполнения различных полостей применяют сферопластики, представляющие собой композиционную матрицу, наполненную стеклянными полыми микросферами. [2].

Предметом исследования в данной работе была возможность улучшения физико-механических и технологических характеристик полимерного заполнителя ПЗ-1 (сферопластика), ТУ 1-596-460-2006, путем его модифицирования многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ) и фуллереном (C_{60}). С этой целью применялись методы экспериментального исследования упруго-деформационных и реологических свойств.

Полимерный заполнитель ПЗ-1 представляет собой отверждающуюся пастообразную полимерную композицию на основе модифицированной эпоксидной смолы КДА, стеклянных полых микросфер и отвердителя ТЭАТ-1. Основными свойствами этой пасты являются высокие прочность и теплостойкость, электроизоляционные свойства и низкая плотность.

Образцы модифицировались путем введения в композицию различного количества МУНТ и фуллерена C_{60} непосредственно в процессе приготовления пасты ПЗ-1.

Используемые нанотрубки были получены высокотемпературным каталитическим разложением из углеводородных газов в присутствии катализатора – переходных металлов (Ni-Fe).

Такие нанотрубки обладают целым рядом преимуществ [3, 4]:

- они достаточно легко диспергируют в модифицированной эпоксидной смоле (около 1 часа);
- отличаются повышенной жесткостью.

В качестве другого наномодификатора был использован фуллерен C_{60} . Фуллерен получают термическим разложением графита, он отличается повышенной жесткостью и плотностью, а также высоким объёмным модулем сжатия. [5]

В многочисленных опубликованных работах по наномодификации полимерных композиционных материалов и клеевых композиций, используемых при изготовлении конструкций из них, показано положительное влияние нанодобавок на упруго-прочностные свойства материалов [6–9].

По данным литературных источников, оптимальная концентрация углеродных наномодификаторов в связующих и клеях для изготовления ПКМ должна быть в диапазоне от 0,5 до 6 %. В нашей работе наномодификаторы вводились в сферопластик ПЗ-1 в количестве 0,5, 1, 3 %.

Для равномерного распределения МУНТ в объеме пасты ПЗ-1 был выбран механический метод перемешивания (механическая мешалка) с нагреванием.

При введении МУНТ в пасту ПЗ-1 было выявлено, что при механическом перемешивании без нагревания образовывались крупные конгломераты вводимых частиц, в отличие от образцов, которые подвергались воздействию повышенной температуры при перемешивании. В связи с этим, для равномерного введения МУНТ в пасту ПЗ-1 было выбрано перемешивание при нагревании.

При введении нанонаполнителя в смолу КДА м наблюдается увеличение вязкости смеси. Повышение температуры до 60 °С приводило к уменьшению вязкости до исходных значений.

В соответствии с требованиями технических условий (ТУ 1-596-460-2006) оценивались плотность и предел прочности при сжатии, а также были проведены испытания на определение предела прочности при отрыве

и дифференциальная сканирующая калориметрия исследуемого полимерного наполнителя.

Испытания на определение предела прочности при сжатии (ГОСТ 4651-2014) пасты ПЗ-1 (исходной и модифицированных) и предела прочности при отрыве (ГОСТ 14760-69) проводились на испытательных машинах И1147М-50-03-1 и И1147М-50-02-1, соответственно, при двух температурных режимах $t=t_{\text{комнатная}}(20-25)^\circ\text{C}$ и $t=80,0^\circ\text{C}$. Результаты испытаний представлены на рисунках 1–4.

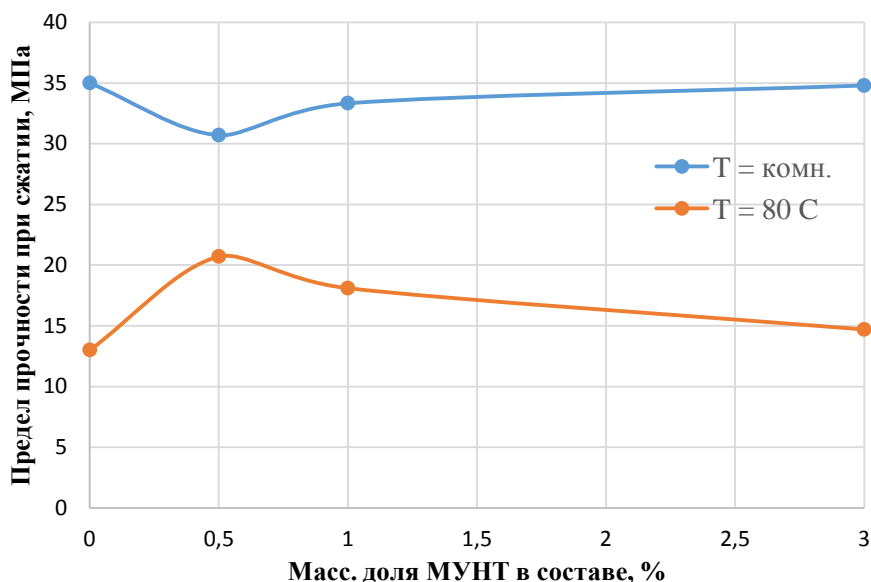


Рис. 1 – Зависимость предела прочности при сжатии пасты ПЗ-1 от содержания МУНТ

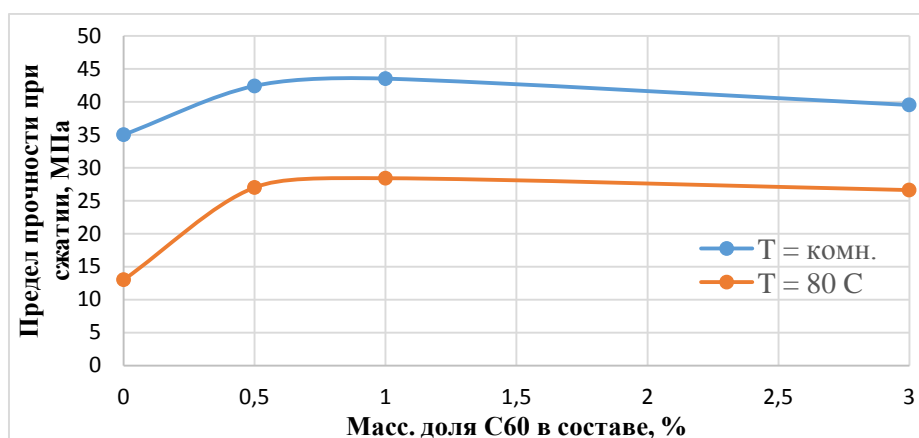


Рис. 2 – Зависимость предела прочности при сжатии пасты ПЗ-1 от содержания фуллерена

Показатели предела прочности при сжатии возрастают при введении фуллерена в количестве 0,5–1 % на 20 % при комнатной температуре, а при испытаниях при $t=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличиваются в 2 раза. При этом, введение углеродных нанотрубок практически не оказывает влияния на этот параметр при комнатной температуре, а при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к его повышению в 1,5 раза.

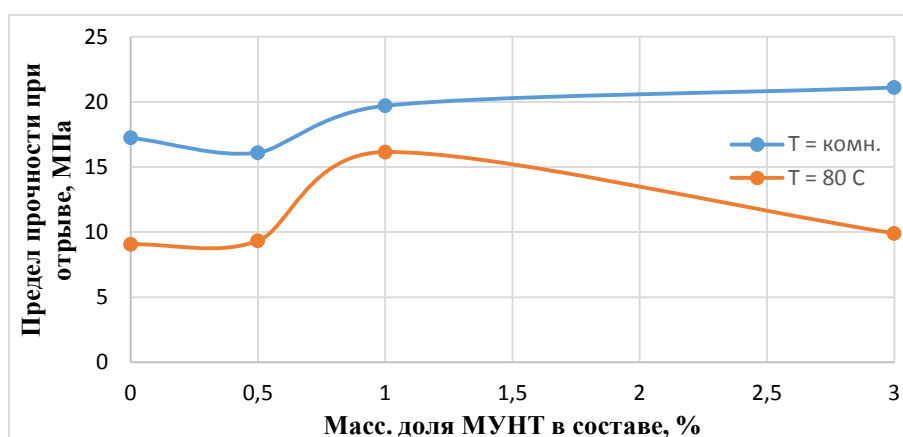


Рис. 3 – Зависимость предела прочности при отрыве пасты ПЗ-1 от содержания МУНТ в ней

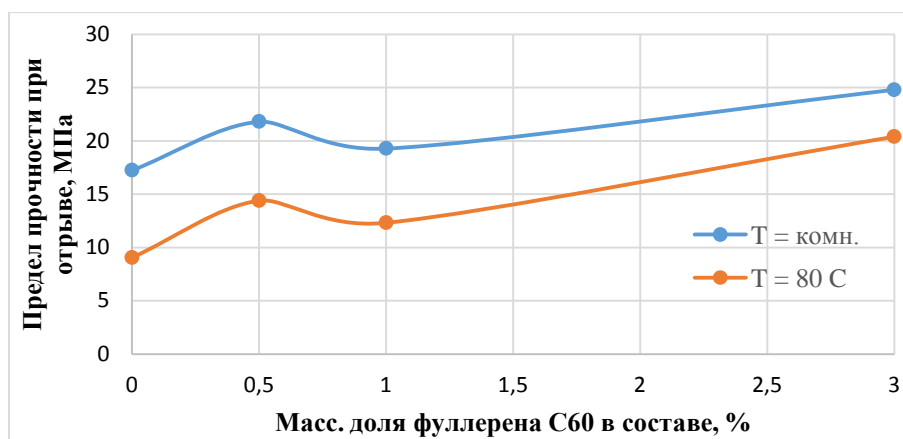


Рис. 4 – Зависимость предела прочности при отрыве пасты ПЗ-1 от содержания фуллерена

Так же, как и при определении прочности на сжатие, значения прочности на отрыв для образцов, модифицированных МУНТ (1 %), возрастают только при проведении испытаний при повышенной температуре. А введение в полимерный наполнитель ПЗ-1 0,5 %

фуллеренов приводит к росту прочности на отрыв уже при комнатной температуре, а при испытаниях при $t=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ показатель увеличивается более, чем в 2 раза.

Испытания на определение плотности пасты ПЗ-1 (исходной и модифицированных) проводились путём обмера и взвешивания образцов в соответствии с требованиями ГОСТ 15139-69. Результаты испытаний представлены на рисунках 5, 6.

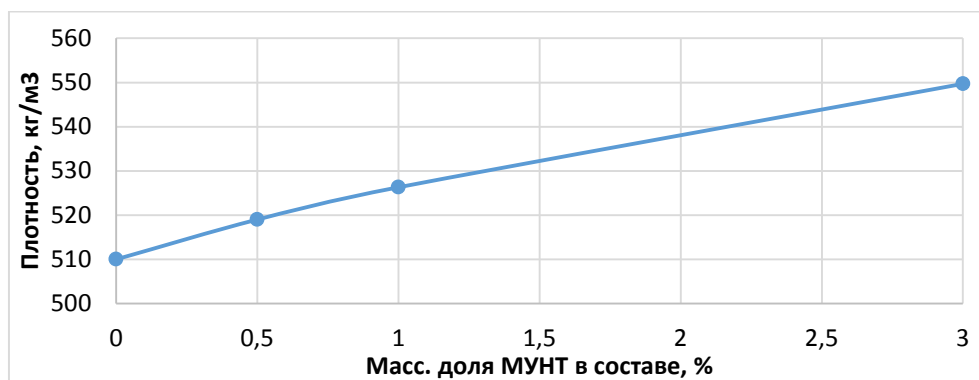


Рис. 5 – Зависимость плотности пасты ПЗ-1 от содержания УНТ в ней.

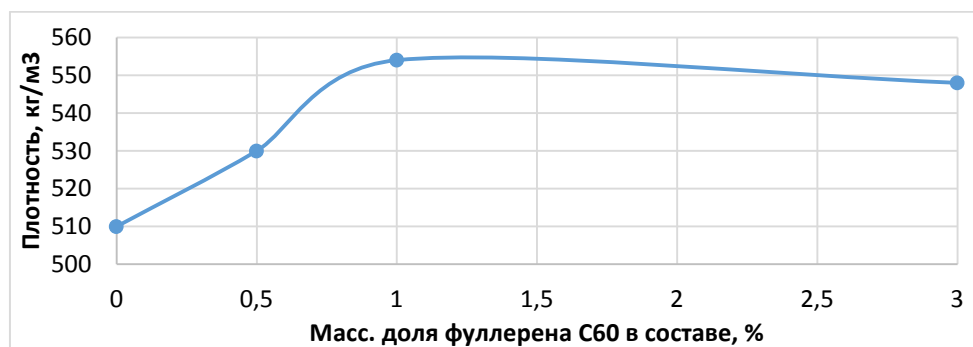


Рис. 6 – Зависимость плотности пасты ПЗ-1 от содержания фуллерена

Влияние наномодифицирования на характеристические температуры отверждения исследовали с помощью метода дифференциальной сканирующей калориметрии на калориметре ДСК-500 в соответствии с ГОСТ 55134-2012. Было установлено, что введение углеродных нанотрубок не оказывает существенного влияния на параметры

отверждения, тогда как модифицирование ПЗ-1 фуллеренами приводит к снижению температур начала и максимума пика отверждения на 30–40 °С, что может оказать влияние на режим отверждения при использовании наномодифицированного полимерного заполнителя.

Сводные данные по модифицированию пасты ПЗ-1 представлены в таблицах 1, 2 и на рисунках 13, 14.

Таблица 1

Результаты испытаний пасты ПЗ-1 с различными концентрациями МУНТ

Массовая доля МУНТ, %	0	0,5	1	3
Сжатие, МПа	35	30,7	33,33	34,8
Сжатие T = 80 °С, МПа	13	20,7	18,1	14,7
Отрыв, МПа	17,24	16,1	19,7	21,1
Отрыв T = 80 °С, МПа	9,06	9,33	16,15	9,9
Плотность, кг/м ³	510	519	526,3	549,7
Δотрыв, %		-6,6	14,3	22,4
Δотрыв при 80 °С, %		3,0	78,3	9,3
Δсжатие, %		-12,3	-4,8	-0,6
Δсжатие при 80 °С, %		59,2	39,2	13,1

Таблица 2

Результаты испытаний пасты ПЗ-1 с различными концентрациями С₆₀

Массовая доля С ₆₀ , %	0	0,5	1	3
Сжатие, МПа	35	42,4	43,5	39,5
Сжатие T = 80 °С, МПа	13	27	28,4	26,6
Отрыв, МПа	17,24	21,8	19,3	24,8
Отрыв T = 80 °С, МПа	9,06	14,4	12,32	20,4
Плотность, кг/м ³	510	530	554	548
Δотрыв, %		26,5	11,8	43,9
Δотрыв при 80 °С, %		58,9	36,0	125,2
Δсжатие, %		21,1	24,3	12,9
Δсжатие при 80 °С, %		107,7	118,5	104,6

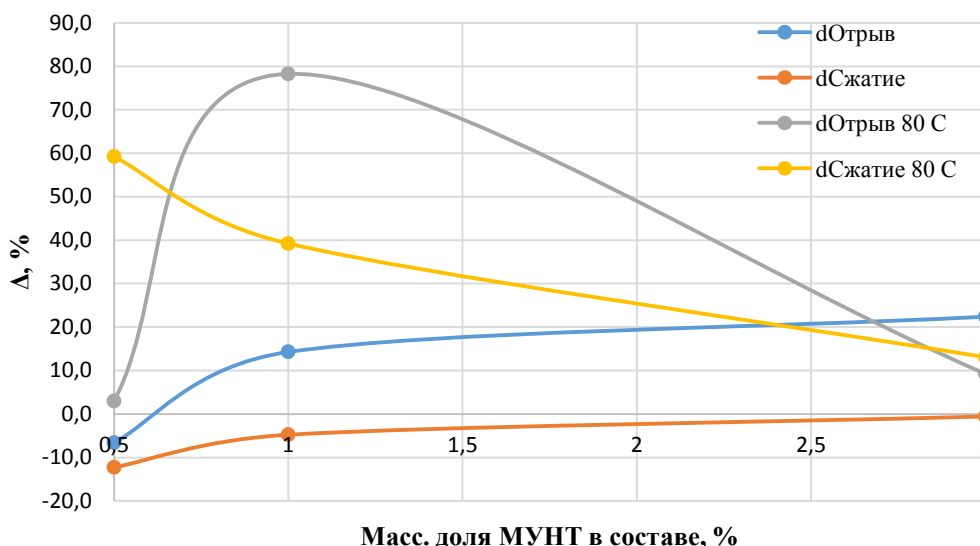


Рис. 13 – Зависимость изменения исследуемых параметров (%) от количества введенных УНТ

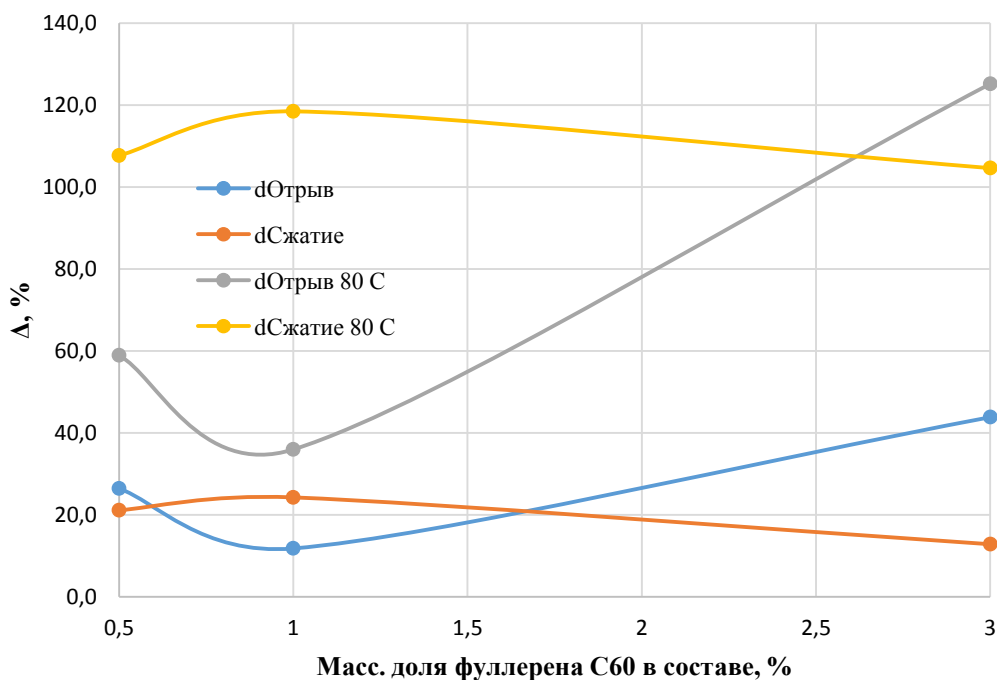


Рис. 14 – Зависимость изменения исследуемых параметров (%) от количества введенных C₆₀

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии наномодификаторов на технологические и эксплуатационные характеристики пасты ПЗ-1, применяемой в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» в интегральных конструкциях авиакосмического

назначения, таких как ракета-носитель “Ангара” и новейшие перспективные летательные аппараты.

На основании проведенных исследований показана возможность улучшения физико-механических и технологических характеристик пасты ПЗ-1 путем её модифицирования углеродными нанотрубками и фуллереном. Введение в полимерный наполнитель ПЗ-1 фуллерена C_{60} в различных концентрациях оказало наибольшее влияние на показатель предела прочности при сжатии.

В результате исследования было выявлено, что введение МУНТ в пасту ПЗ-1 приводит к увеличению физико-механических характеристик под воздействием повышенной температуры, а именно предела прочности при отрыве, наряду с небольшим увеличением плотности и незначительным уменьшением значений предела прочности при сжатии.

Введение фуллерена C_{60} в пасту ПЗ-1 способствует значительному росту значений пределов прочности как при отрыве, так и при сжатии, в условиях воздействия повышенной температуры.

Наиболее эффективной концентрацией МУНТ для модифицирования пасты ПЗ-1 в ходе нашей работы оказалась 0,5 %. Такая добавка позволила увеличить предел прочности при сжатии при 80 °С на 39,2 %, в то же время при комнатной температуре изменения данной характеристики были незначительны по сравнению с исходной пастой ПЗ-1. Было установлено увеличение предела прочности при отрыве при комнатной температуре на 14,3 %, а при 80 °С на 78,3 % по сравнению с исходным сферопластиком.

Оптимальной концентрацией фуллерена C_{60} для модифицирования пасты ПЗ-1 является 3 %. Введение этого наномодификатора в указанном количестве позволяет увеличить предел прочности при сжатии при комнатной температуре на 12,9 %, а предел прочности при отрыве на 43,9%. При проведении прочностных испытаний при 80 °С определяемые

пределы прочности возросли более чем в 2 раза по сравнению со значениями для немодифицированной пасты ПЗ-1.

Полученных данных, однако, недостаточно, чтобы сделать окончательный вывод о наиболее эффективной концентрации наномодификатора. Необходимо рассмотреть более широкий диапазон концентраций, что будет сделано в следующих научных работах.

Литература

1. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: НОТ, 2008. 822 с.

2. Campbell F.C. Manufacturing Processes For Advanced Composites, Elsevier Inc. - New York, USA, 2004. 517 p.

3. Соколов И.И., Минаков В.Т. Сферопластики авиационного назначения на основе эпоксидных клеев и дисперсных наполнителей (www.viam.ru/public).

4. Соколов И.И., Минаков В.Т. Сферопластики авиационного назначения на основе эпоксидных клеев и дисперсных наполнителей // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. № 5. С. 22–26.

5. Соколов И.И. Сферопластики холодного отверждения на основе клеевых связующих для изделий авиационной техники// «Клеи. Герметики. Технологии», 2013. № 3.

6. Fan-Long J., Soo-Jin P. A review of the preparation and properties of carbon nanotubes-reinforced polymer composites // Carbon Letters. 2011. V. 12. № 2. P. 57–69.

7. Шпилевский Э.М. Фуллерены – новые молекулы для новых материалов. Наука и инновации. 2006. № 5 (39).

8. Гуняев Г.М., Каблов Е.Н., Ильченко С.И. и др. Структурная модификация полимерных и композиционных материалов углеродных наночастицами. Теория и практика технологий производства изделий из

композиционных материалов и новых металлических сплавов (ТМ1ММ): Труды Международной конференции, Москва, 27–30 авг., 2003. М.: Знание, 2004. С. 82–89.

9. Хвостов С.А. Принципы модификации углеродными наночастицами эпоксидных связующих и технология получения композитов на их основе: дисс. канд. техн. наук: 05.17.06 / Хвостов Станислав Александрович – Барнаул, 2007. 119 с.

УДК 678.8

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

П.В. Капустина¹; Е.В. Овчарик¹; М.А. Ключникова¹; И.М. Гурьева¹;
Е.В. Седов¹, к.т.н.; С.А. Ведерникова¹; А.А. Узких¹; Е.А. Чугунова¹

FEASIBILITY ASSESSMENT FOR MANUFACTURING AND QUALITY CONTROL OF INTEGRAL CARBON-FIBER COMPOSITE STRUCTURES

P.V. Kapustina¹, E.V. Ovcharik¹, M.A. Klyuchnikova¹, I.M. Guryeva¹,
E.V. Sedov¹, S.A. Vedernikova¹, E.A. Chugunova¹

bvn@vniitf.ru

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»

¹ FSUE «RFNC – VNIITF named after Academ. E.I. Zababakhin»

Аннотация

В работе показана возможность изготовления конструктивно-подобного элемента консоли крыла интегрального исполнения с низким профилем из углепластика на основе препрега марки ВКУ-29/ВТкУ-3 методом термокомпрессионного формования. Приведены результаты определения механических свойств углепластика после ускоренных испытаний. Опробованы методы неразрушающего контроля качества материала консоли.

Ключевые слова:

конструктивно-подобный элемент консоли крыла, интегральная конструкция, углепластик, препрег, термокомпрессионный метод, неразрушающий контроль

Abstract

The feasibility of manufacturing a structurally-similar low-profiled integrated wing element made of carbon-fiber composite based on VKU-29/VTkU-3 prepreg by thermal compression moulding is reported. The mechanical properties of carbon-fiber composite after short-time tests are presented. Non-destructive testing of the wing material was performed.

Keywords:

structurally-similar wing element, integral structure, carbon fiber composite, prepreg, thermal compression moulding, non-destructive testing

Summary

The aircraft wing element manufacturing technology was elaborated using mockup test sample by designing reinforcement schemes for unidirectional prepreg, and by designing and engineering the implementation/moulding of an integral structure of cellular cross-section with the use of embedded elements made of thermally expandable materials of different chemical nature.

The given paper determined the mechanical parameters of polymer composite material (PCM) based on VKU-29/VTkU-3 prepreg from standard samples both in the original state and after artificial ageing. After the ageing, tensile strengths are decreased by the average of 20% and are equal to 1,770 MPa, while Young's modulus values are decreased by the average of 11% and remain at the level of 120 GPa.

The roughness of structurally-similar wing element shaping surface was assessed ($Ra = 0.37 \mu\text{m}$).

Non-destructive testing revealed the main controlled defects of the carbon fiber composite.

Введение

Полимерные композиционные материалы, в частности углепластики, прочно завоевали место среди конструкционных материалов в авиационной промышленности. Их применение в конструкциях летательных аппаратов позволяет снизить общую массу конструкции, повысить ресурс эксплуатации изделия, увеличить прочность и стойкость к факторам окружающей среды. Применение высокопрочных и высокомодульных углепластиков на основе эпоксидных связующих позволяет изготавливать такие высоконагруженные агрегаты летательного аппарата, как консоли крыла (КК) [1, 2].

По комплексу конструкционных свойств углепластики существенно превосходят традиционные конструкционные материалы – стали, алюминиевые и титановые сплавы. Повышенные показатели прочности и модуля упругости при растяжении при меньшей массе и возможность регулирования свойств ПКМ в различных направлениях за счёт схемы укладки волокнистого наполнителя в разных частях летательного аппарата являются главными преимуществами таких материалов перед металлами [3]. Применение ПКМ позволяет использовать сложные аэродинамические профили с целью повышения аэродинамического качества летательного аппарата для увеличения дальности полета либо массы доставляемой или используемой полезной нагрузки [4].

Высокий модуль упругости и повышенная прочность при растяжении позволяют углепластикам иметь определённое преимущество перед металлами при эксплуатации летательных аппаратов в условиях высоких нагрузок. К сожалению, эти преимущества проявляются только при условии их оптимального сочетания с элементами металлической конструкции. При этом образуется интегральная конструкция, собранная из набора элементов (неотверждённых, частично или полностью),

произведенная различными технологическими способами и сформированная в единое целое за один технологический цикл [3].

Принцип изготовления такого рода конструкций позволяет получить сложную высоконагруженную композитную конструкцию с максимально возможным количеством входящих в неё элементов без механической обработки деталей. При этом важная роль отводится качественной подготовке технологической оснастки. Соблюдение всего комплекса технологических мероприятий даёт возможность в полной мере использовать преимущества не повреждённого механической обработкой конструкционного ПКМ и обеспечивает снижение массы интегральных конструкций с одновременным повышением их жёсткости, прочности и технологичности [3].

В соответствии с исходными данными перед нами была поставлена задача разработать технологию изготовления консоли крыла из углепластика, представляющую собой коробчатую многостеночную конструкцию, состоящую из замкнутой обшивки, формирующей внешние обводы, лонжеронов, обеспечивающих необходимые прочностные и жесткостные характеристики, а так же металлического кронштейна. Обшивка и лонжероны должны формоваться за один технологический цикл, таким образом получается консоль в виде единой детали-моноблока. Металлический кронштейн должен быть интегрирован в моноблок либо при его формовании, либо устанавливаться в моноблок на клей.

В данной работе приведены результаты исследований по оценке возможности изготовления и контроля качества интегральной конструкции, такой как КК летального аппарата.

При выборе материалов и технологии основное внимание было направлено на отечественные разработки ведущих предприятий авиационной отрасли.

Изготовление конструктивно-подобного элемента консоли крыла

С целью минимизации последствий ошибочных конструктивно-технологических решений на ранних этапах разработки технологии изготовления консоли было принято решение отработку технологии выполнять на макетных образцах (с габаритными размерами 280×280 мм и высотой профиля 30 мм) с последующим контролем качества конструкции методами неразрушающего контроля.

В качестве материала консоли выбрали однонаправленный препрег углепластика марки ВКУ-29/ВТкУ-3 ТУ 1-595-11-1635-2016.

Согласно конструкторской документации (КД), консоль крыла состоит из внешней обшивки и трёх коробчатых лонжеронов различного сечения, стенки которых примыкают друг к другу.

Для обеспечения разработки макетного образца консоли были разработаны раскрой и схема армирования с расчётным количеством слоёв. Выбор схемы армирования конструктивных элементов проводили с учётом принципов рационального проектирования, обеспечивающих наибольшую прочность вдоль линии действия сил. Так, обшивка консоли состоит из семи слоёв препрега со схемой армирования: $45^\circ/0^\circ/+45^\circ/90^\circ/+45^\circ/0^\circ/-45^\circ$; каждый лонжерон состоит из 11 слоёв препрега со схемой армирования: $+45^\circ/+45^\circ/0^\circ/-45^\circ/-45^\circ/0^\circ/-45^\circ/-45^\circ/0^\circ/+45^\circ/+45^\circ$. В центральном лонжероне между каждым слоем препрега снизу и сверху дополнительно предусмотрено по два слоя препрега в направлении $0^\circ/0^\circ$.

Схематичное расположение слоёв препрега в сечении макетного образца приведено на рисунке 1.

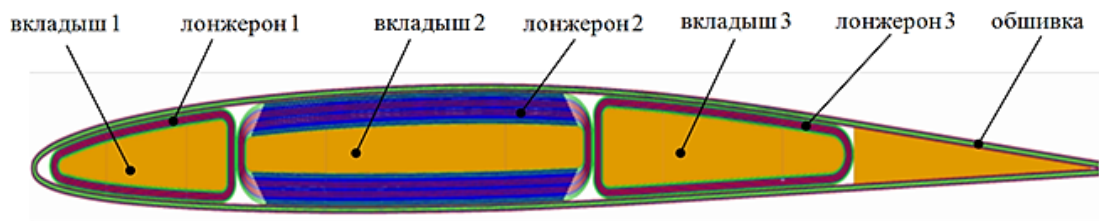


Рис. 1 – Схематичное расположение слоёв препрега в сечении макетного образца

Для обеспечения возможности изготовления конструктивно-подобного элемента консоли была спроектирована и изготовлена пресс-форма, формообразующая поверхность которой повторяет наружный аэродинамический профиль (шероховатость формообразующей поверхности Ra 1,25). Конструкции пресс-формы и полимерных вкладышей к пресс-форме (формирующих внутренний профиль лонжеронов) представлены на рисунке 2.

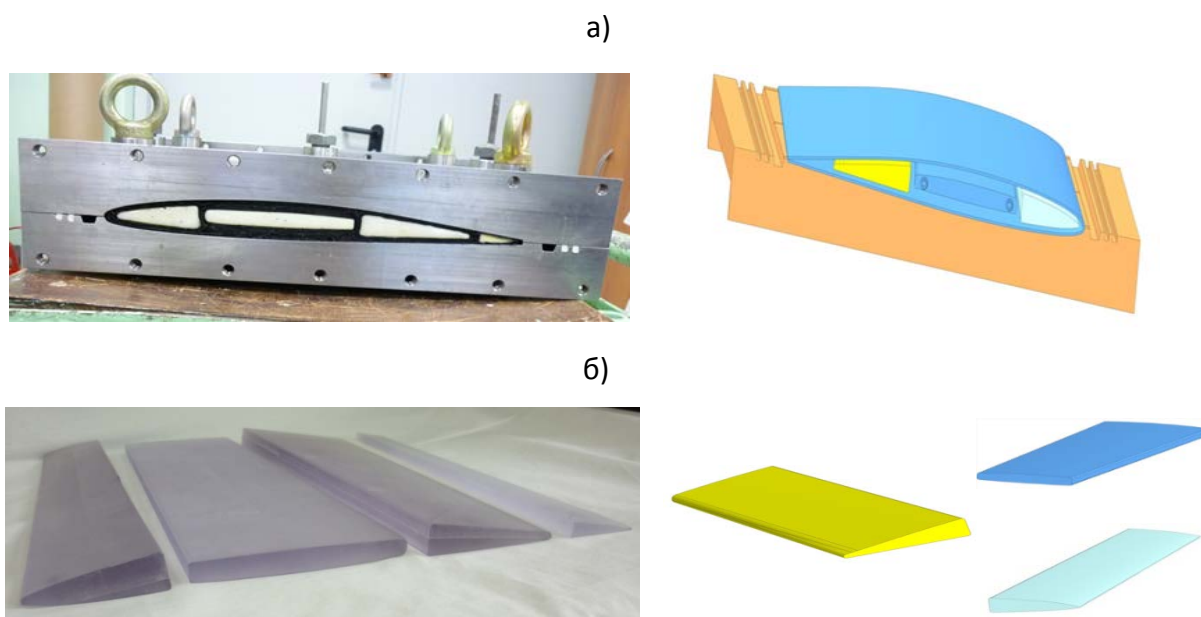


Рис. 2 – Пресс-форма для макета консоли крыла (а) и полимерные вкладыши (б)

В качестве материалов для полимерных вкладышей применяли модельную плиту из пенополиуретана марки Т260 и силикон Силагерм 8040 ТУ 2513-009-01296014-2015 ($\alpha = 280 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$).

С целью предотвращения прилипания препрега к пенополиуретановым вкладышам, на формообразующие поверхности вкладышей наносили антиадгезионное покрытие марки MOLD S20 (производитель «Полидел»).

Слои препрега раскраивали по шаблонам выкройки под углами 0° , 45° , 90° . Раскроенные слои препрега укладывали в соответствии со схемой армирования сначала на полимерные вкладыши, затем формировали обшивку консоли и помещали заготовку детали в пресс-форму. В местах соединения вкладышей с субпреформами и обшивки образуются Т-образные зоны, которые мы заполнили жгутами и лентами из препрега.

Внешний вид заполненных Т-образных зон приведён на рисунке 3.

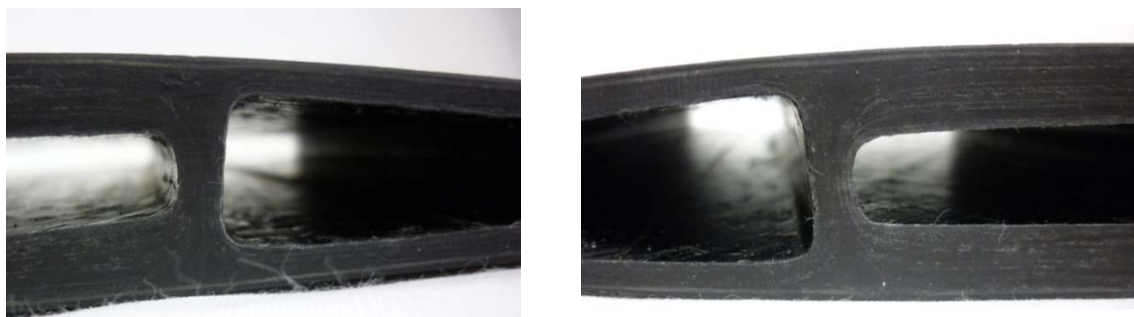


Рис. 3 – Внешний вид заполненных Т-образных зон

Формование макетного образца проводили термокомпрессионным методом, за один технологический цикл. При термокомпрессионном формовании под действием повышенной температуры (180°C) происходит увеличение объёма помещённого внутрь полимерного вкладыша, благодаря чему на внутренние слои углепластика оказывается давление, связующее в препреге полимеризуется и формируются силовые элементы (лонжероны).

По завершении технологического процесса формования, согласно КД, полимерные вкладыши извлекали из конструктивно-подобного элемента (рис. 4).



Рис. 4 – Конструктивно-подобный элемент консоли крыла

Определены механические параметры стандартных образцов углепластика марки ВКУ-29/ВТкУ-3 в исходном состоянии и после искусственного старения, имитирующего условия хранения и эксплуатации изделия. Значения прочности при растяжении после ускоренных испытаний уменьшаются в среднем на 20 % и составляют 1770 МПа, значения модуля упругости при растяжении уменьшается в среднем на 11 % и сохраняются на уровне 120 ГПа. Таким образом, материал показал высокий уровень сохранения свойств при воздействии факторов внешней среды.

Значение шероховатости (Ra) формообразующей поверхности макетного образца консоли составляет 0,37 мкм.

Методы неразрушающего контроля качества макетного образца консоли

Как правило, при формировании интегральных конструкций сложно реализовать нормированное давление по всей поверхности структурных элементов и в зонах их сопряжения. Поэтому очень важно иметь возможность контролировать качество материала (на наличие дефектов: разрушений, непрочности, трещин, инородных включений) во всех зонах таких конструкций [5].

Для контроля качества монолитных изделий из углепластика в практике неразрушающего контроля (НК) широко используется эхо-

импульсный, импедансный [5, 6] и радиографический методы [7–10]. В рамках работы была оценена возможность применения данных методов для контроля конструктивно-подобного элемента консоли крыла.

Эхо-импульсный метод основан на излучении в объект контроля импульса ультразвуковых волн и регистрации эхосигнала от дефектов и противоположной поверхности. Метод применим для выявления непрочности, расслоений, включений, трещин, пустот и пористости.

С целью определения приемлемых режимов контроля качества эхо-импульсным методом проведены исследования макетного образца консоли с применением ультразвуковых дефектоскопов с фазированными решётками и с одноэлементными преобразователями, возбуждающими в объекте продольные и поперечные волны. При исследовании фазированными решетками применяли частоты 1 МГц и 5 МГц, в случае с одноэлементными преобразователями применяли частоты 1 МГц, 5 МГц, 10 МГц для ввода продольных волн и 1 МГц, 5 МГц для ввода поперечных волн.

Использование ультразвукового дефектоскопа с фазированными решетками для НК макетного образца позволяет обнаружить разно-ориентированные дефекты, расположенные на различных глубинах, а также облегчает интерпретацию результатов контроля сложнопрофильного конструктивно-подобного элемента.

Импедансный метод контроля основан на различии механических импедансов бездефектной и дефектной зон контролируемого объекта. Импедансным методом контролируют ПКМ для выявления расслоений и непрочности.

Отработка режимов контроля качества макетного образца импедансным методом проводили с использованием акустического дефектоскопа. Измерения выполняли по размеченным участкам с двух

сторон поверхности образца. По результатам исследования построена картограмма с результатами акустического сопротивления (рис. 5).

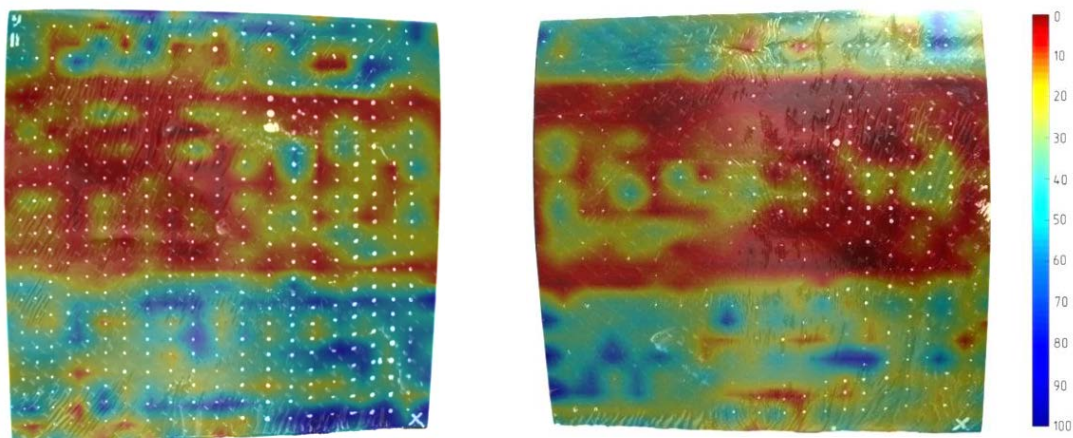


Рис. 5 – Картограмма распределения акустического сопротивления

На образцах макетного образца выявлены участки с неравномерным распределением акустического сопротивления с учётом толщины контролируемого слоя (от 3 до 5 мм). Уменьшение акустического сопротивления (изменение цветовой гаммы от синей к красной) обусловлено либо наличием внутренних несплошностей, либо кривизной поверхности конструктивно-подобного элемента.

Радиографический метод основан на регистрации и анализе проникающего сквозь объект контроля ионизирующего излучения. Областью применения радиографического метода контроля ПКМ является обнаружение пустот, пористости и инородных включений. Дефекты типа трещин, расслоений, разрыва волокон, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением просвечивания, данным методом могут быть не обнаружены.

Контроль качества макетного образца консоли крыла радиографическим методом проводили на рентгентелевизионном (РТ) комплексе с цифровым детектором, обеспечивающим мгновенное получение цифрового рентгеновского изображения.

Чувствительность РТ контроля материала образца толщиной от 1,2 до 4,6 мм составила 0,5 мм, а в области силового элемента (лонжерона 2) – 1,45 мм.

Фрагмент рентгеновского изображения макетного образца (центральный участок) приведён на рисунке 6.

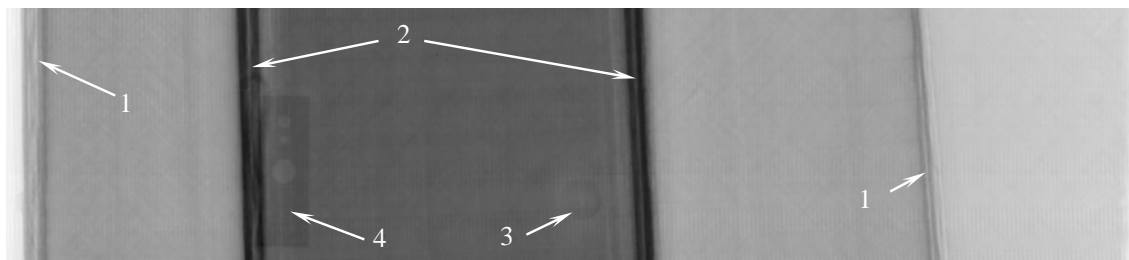


Рис. 6 – Фрагмент рентгеновского изображения макетного образца: 1 – непроклеи; 2 – расслоение; 3 – вмятина от штучера; 4 – настроечный образец

Рассмотренные методы неразрушающего контроля являются перспективными при контроле качества интегральных конструкций из углепластика. Исследования в этих направлениях будут продолжены.

Заключение

В результате проделанной работы изготовлены конструктивно-подобные элементы консоли крыла по препреговой технологии и опробованы некоторые методы неразрушающего контроля.

Полученные результаты выявили ряд вопросов на всех этапах работ, касающихся проектирования, изготовления оснастки, технологических приёмов работы с препрегом, контроля качества, решение которых позволит обозначить пути дальнейшего развития данной технологии.

Сделан вывод о принципиальной возможности изготовления высоконагруженной сложнопрофильной конструкции с низким профилем на основе препрега ВКУ-29/ВТкУ-3.

Литература

1 Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.

2 Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К. Влияние климатических факторов и механического нагружения на свойства углепластика на эпоксидном связующем // Пластические массы. 2012. № 2. С. 3–7.

3 Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5(111). С. 87–95. URL: <http://www.viam-works.ru>.

4 Нагорнов А.Ю. Флаттер беспилотного летательного аппарата из композиционных материалов с двухбалочным оперением // Труды МАИ. 2020. №113. URL: <http://www.trudymai.ru>.

5 Мурашов В.В., Мишуров К.С. Оценка прочностных характеристик углепластиков акустическим методом. // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34), С. 81–84.

6 Диков И.А., Яковлева С.И., Бойчук А.С., Чертищев В.Ю. Классификация дефектов в 2D-армированных полимерных композиционных материалах (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>.

7 Босси Р.Х., Джорджесон Г.Е. Неразрушающий контроль композиционных материалов // В мире неразрушающего контроля. 2019. Т 22, № 4. С. 46.

8 Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Диков И.А. Контроль монолитных деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ, ультразвуковым методом неразрушающего контроля с использованием фазированных решеток // ТестМат. Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего

контроля в аэрокосмической отрасли: материалы X всероссийской конференции / ФГУП «ВИАМ». М.: ВИАМ, 2018. С. 18.

9 Мурашов В.В., Мишуров К.С. Оценка прочностных характеристик углепластиков акустическим методом // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1(34), С. 81–84.

10 Косарина Е.И., Крупнина О.А., Демидов А.А., Турбин Е.М. цифровая радиография в неразрушающем контроле авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. С. 562–574.

Системные требования: Intel Pentium; 1,3 ГГц и выше; Windows 7/10; Adobe Reader 6.0 и выше; дисковод CD-ROM.

Использованное программное обеспечение: Microsoft Office Word 2010

Статьи представлены в авторской редакции

За содержание статей, точность приведенных фактов и цитирование несут ответственность авторы публикаций

Объем издания: 12 Мб.

Тираж 100 экз.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Государственный научный центр Российской Федерации (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ)

Изд-во НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ

admin@viam.ru