

УДК 620.187:669.017.165

Г.Г. Асланян¹, Д.И. Сухов¹, П.Б. Мазалов¹, Е.А. Сульянова¹**ФРАКТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА СИСТЕМЫ Co–Cr–Ni–W–Ta, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-3-10

Выполнено фрактографическое исследование образцов сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta, полученных методом селективного лазерного сплавления в горизонтальном и вертикальном направлении относительно платформы построения после горячего изостатического прессования. Проведено исследование микроструктуры вблизи изломов в целях выяснения уровня пористости и типа разрушения. Установлена зависимость характера разрушения образцов от их направления выращивания. Для всех образцов наблюдается вязкий характер разрушения при испытаниях на длительную прочность.

Ключевые слова: кобальтовый сплав, селективное лазерное сплавление, длительная прочность, излом, разрушение, направление выращивания.

G.G. Aslanyan¹, D.I. Sukhov¹, P.B. Mazalov¹, E.A. Sulyanova¹**FRACTOGRAPHIC STUDY OF Co–Cr–Ni–W–Ta ALLOY SAMPLES OBTAINED BY SELECTIVE LASER MELTING**

Fractographic investigation of Co–Cr–Ni–W–Ta alloy samples obtained by selective laser melting and having horizontal and vertical orientation on a build platform is performed. The samples underwent hot isostatic pressing. The microstructure near the fractures was investigated and type of destruction and porosity were determined. The dependence of the samples orientation on their rupture character is investigated. All samples exhibit viscous rupture during long-term strength test.

Keywords: cobalt alloy, selective laser melting, long-term strength, destruction, fracture, growth.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Успешное развитие отечественного авиастроения предполагает разработку и внедрение новых материалов и технологий [1–7]. Все более широкое распространение в отечественной промышленности получают методы аддитивных технологий, обладающие рядом преимуществ по сравнению с традиционными технологиями «вычитания»: высокий коэффициент использования материала, изготовление деталей сложной формы за один технологический цикл, усложнение геометрической формы деталей без увеличения стоимости их производства [8–10].

Селективное лазерное сплавление (СЛС) является наиболее перспективным способом изготовления изделий из металлопорошковых композиций [1]. Однако использование метода СЛС для ряда жаропрочных никелевых сплавов, работающих в интервале температур от 800 до 1100°C, выявлено, что в структуре синтезированного материала

помимо пор образуются микротрещины, формирующие сетку с выходом на поверхность [11–13]. Это обычно несвариваемые сплавы с высоким содержанием γ' -фазы. Микротрещины не могут быть устранены с помощью горячего изостатического прессования из-за проникновения рабочей среды (аргона) в них и последующей декомпрессии при приложении давления. Для устранения таких дефектов структуры применяют вакуумно-термическую обработку [13]. В целом механизм влияния микротрещин на свойства синтезированного материала до конца не изучен.

В качестве альтернативы жаропрочным никелевым сплавам применительно к аддитивным технологиям рассматривают сплавы на основе кобальта системы Co–Cr, легированные тугоплавкими элементами. Они являются перспективными материалами для производства деталей газотурбинных двигателей (ГТД) и характеризуются высокой прочностью, коррозионной стойкостью и высоким сопротивлением ползучести.

Кобальтовые сплавы обладают повышенным сопротивлением горячей коррозии благодаря высокому содержанию хрома. Ведущие зарубежные компании активно применяют кобальтовые сплавы в аддитивных технологиях – например, топливные форсунки двигателя GE9X изготовлены из сплава на основе системы Co–Cr–Mo методом СЛС [14].

В настоящее время известны основные требования, предъявляемые к перспективным двигателям, предназначенным для истребителей пятого поколения. Одним из таких требований является следующее: для повышения оперативности действий самолет должен иметь сверхзвуковой крейсерский режим полета при работе двигателей на бесфорсажном режиме, т. е. двигатели должны обладать большой лобовой тягой на сверхзвуковой скорости без включения форсажа, а значит, высокой температурой газа перед турбиной. Таким образом, жаропрочные кобальтовые сплавы благодаря своим уникальным свойствам представляют значительный интерес для авиадвигателестроения. Однако широкое распространение в промышленности кобальтовых сплавов, легированных тугоплавкими элементами, сдерживается вследствие того, что их эксплуатационные свойства, в том числе прочностные характеристики, и характер разрушения недостаточно изучены [5–10].

При расчетах на прочность и при конструировании элементов ГТД одной из важнейших характеристик материалов является длительная прочность. При испытаниях на длительную прочность оценивается способность металла сопротивляться механическому разрушению под действием длительно приложенной постоянной нагрузки. Разрушение является результатом совокупности различных процессов, происходящих в структуре сплава. Одни процессы требуют значительного, другие – короткого времени для своего развития, а некоторые из них ослабляют внешние границы зерен и связаны с химическими изменениями (окисление металла или одного из составляющих компонентов сплава по внешним границам зерен). Долговечность многих конструкций обусловлена главным образом процессом превращения имеющегося в материале зародыша трещины в микротрещину, рост которой приводит к окончательной поломке и разрушению деталей. Таким образом, актуальна задача установления фундаментальных явлений, которые определяют процесс разрушения.

Во ФГУП «ВИАМ» разработан сплав на основе кобальта (системы Co–Cr–Ni–W–Ta), оптимальный комплекс свойств которого обеспечивается за счет получения синтезированного материала методом СЛС. Поскольку данный сплав предназначен для изготовления деталей ГТД, работающих под нагрузкой до температуры 1100°C, то основные требования, предъявляемые к нему, – это высокий предел длительной прочности и сопротивление ползучести при высоких температурах в интервале 800–1100°C. При испытаниях на длительную прочность оценивают способность металла сопротивляться

механическому разрушению под действием длительно приложенной постоянной нагрузки. Особый интерес представляет выявление причин разрушения синтезированного материала при испытаниях на длительную прочность при высокой температуре.

Целью данной работы является изучение общих закономерностей разрушения сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta в результате испытаний на длительную прочность, а также определение влияния ориентации образцов относительно платформы построения при СЛС на характер их разрушения.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 10.4. «Технологии получения би- и полиметаллических естественноармированных металлических материалов методом прямого лазерного синтеза из металлических порошков» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [2].

Материалы и методы

Для исследования выбрали образцы из экспериментального сплава системы Co–Cr–Ni, легированные тугоплавкими элементами W и Ta. Основа материала исследованных образцов содержала Co и Cr. Соотношение компонентов в выбранной основе является типичным для литейных кобальтовых сплавов. Для стабилизации высокотемпературной аустенитной структуры кобальтовой матрицы (γ' -фазы) с гранецентрированной кубической кристаллической решеткой и подавления ее превращения в гексагональную структуру при низких температурах в сплав добавлен никель; в состав сплава также введены W и Ta.

При добавлении хрома в процессе нагрева образуется защитная оксидная пленка, которая увеличивает коррозионную стойкость и жаростойкость сплава. Вольфрам обеспечивает сплаву твердорастворное упрочнение. С целью улучшения характеристик длительной прочности в сплав введен тантал. Содержание углерода выбрано минимальным для литейных кобальтовых сплавов для достижения комплекса характеристик длительной прочности, хорошей пластичности и свариваемости.

Выплавку сплава проводили в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 с получением прутковых шихтовых заготовок трех составов. Металлопорошковые композиции получали методом атомизации расплава на установке ALD VIGA 2B (Германия), предназначенной для вакуумной индукционной плавки и газового распыления порошков металлов, на технологической базе НЦ ПМ ПНИПУ.

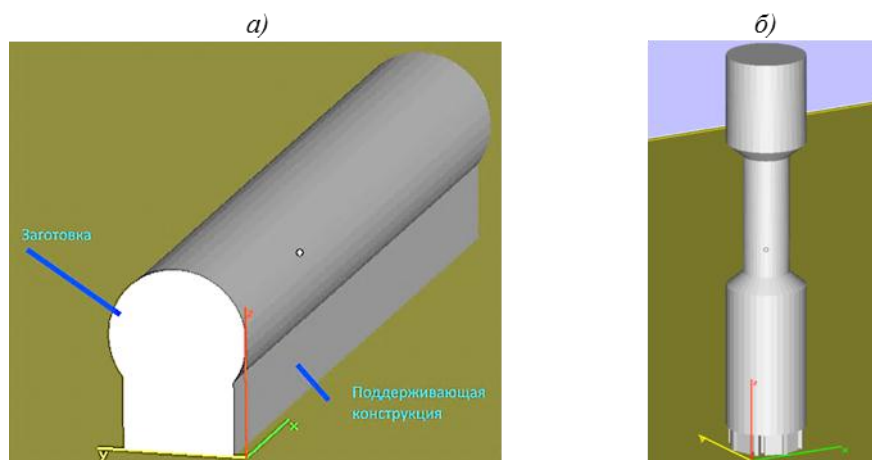


Рис. 1. Модели заготовок с горизонтальной (а) и вертикальной (б) ориентацией относительно платформы построения [15]

Подготовку 3D-моделей образцов проводили с помощью программного обеспечения Materialise Magics Software. Модели заготовок образцов представлены на рис. 1 [15]. Заготовки образцов для исследований получены методом СЛС на установке Concept Laser M2 Cusing из металлопорошковой композиции сплава системы Co–Cr–Ni–W–Ta в атмосфере азота. Для испытаний на длительную прочность согласно ГОСТ 1497–84 изготавливали по 3 образца для каждой температуры и каждого вида ориентации относительно платформы построения.

Для устранения пористости заготовки подвергали горячему изостатическому прессованию [16] и обрабатывали на металлорежущем оборудовании для придания им необходимой формы для испытаний.

Испытания на длительную прочность проводили на испытательных машинах фирмы Zwick/Roell серии KAPPA DS согласно ГОСТ 10145–81 при температурах 800 и 1100°C с нагрузкой 220 и 25 МПа соответственно. Для фактографических исследований отобрали четыре образца. Условия испытаний, время до разрушения, удлинение (δ), сужение (ψ) и ориентация образцов относительно платформы построения приведены в таблице.

Свойства образцов, полученных методом селективного лазерного сплавления, после испытаний на длительную прочность

Условный номер образца	Ориентация образца	Температура испытания, °C	Нагрузка, МПа	Время до разрушения, ч	δ	ψ
					%	
1	Горизонтальная	800	220	260	58	56
2	Вертикальная			59	48	77
3	Горизонтальная	1100	25	25	31	27
4	Вертикальная			141	28	18,5

Фрактографический анализ образцов проводили с применением сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-6490LV. Анализ поперечных микрошлифов образцов выполнен на растровом электронном микроскопе Hitachi SU8010.

Результаты и обсуждение

Изломы образцов 1 и 2 после испытаний на длительную прочность при температуре 800°C с нагрузкой 220 МПа представлены на рис. 2, а, г. Структура изломов свидетельствует о вязком характере разрушения образцов. Вязкое разрушение характеризуется ямочным («чашечным») изломом (рис. 2, б, д). Микроуглубления на поверхности излома (ямки) возникают в результате образования, роста и слияния микропустот. Глубина ямки определяется способностью металла к локальной пластической деформации. В некоторых ямках (рис. 2, в, е) присутствуют частицы предположительно карбидной фазы.

В изломе образца 1 с горизонтальной ориентацией относительно платформы построения (рис. 2, а–в) наблюдаются единичные поры. Строение излома плотное, без рыхлот. В изломе образца 2 с вертикальной ориентацией относительно платформы построения (рис. 2, г–е) наблюдаются многочисленные поры со средним размером от 10 до 50 мкм. Разрушение образца 2 прошло с формированием излома «чашка–конус», что типично для пластичных материалов. Матрица излома представлена равноосными ямками. В данном образце наблюдается наибольшая степень утонения поперечного сечения образца вблизи излома.

Время до разрушения образца 1 более чем в 4 раза превышает таковое для образца 2. Предполагается, что образец 2 разрушился быстрее по причине наличия в нем микропор.

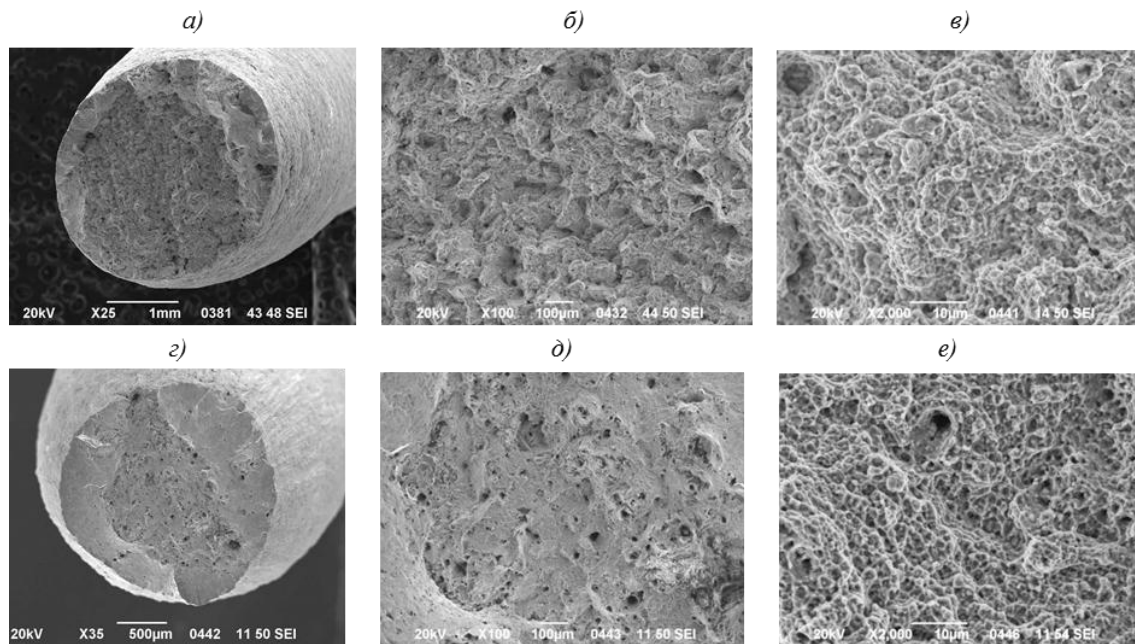


Рис. 2. Изломы образцов 1 (а–в) и 2 (з–е) после испытаний на длительную прочность при температуре 800°C:

а, з – общий вид изломов; б, в, д, е – строение изломов

Общий вид изломов образцов 3 и 4 после испытаний на длительную прочность при температуре 1100°C с нагрузкой 25 МПа представлен на рис. 3. Характер разрушения образцов вязкий. Наблюдается выраженная «овальность» сечения образца 3 с горизонтальной ориентацией относительно платформы построения, приобретенная в ходе испытания. Излом данного образца рыхлый, пористый, в нем присутствуют пустоты и полости (рис. 3, б, в). Строение излома образца 4, имеющего вертикальную ориентацию относительно платформы построения, приведено на рис. 3, г. Излом данного образца имеет более плотное строение, чем излом образца 3 (рис. 3, д, е).

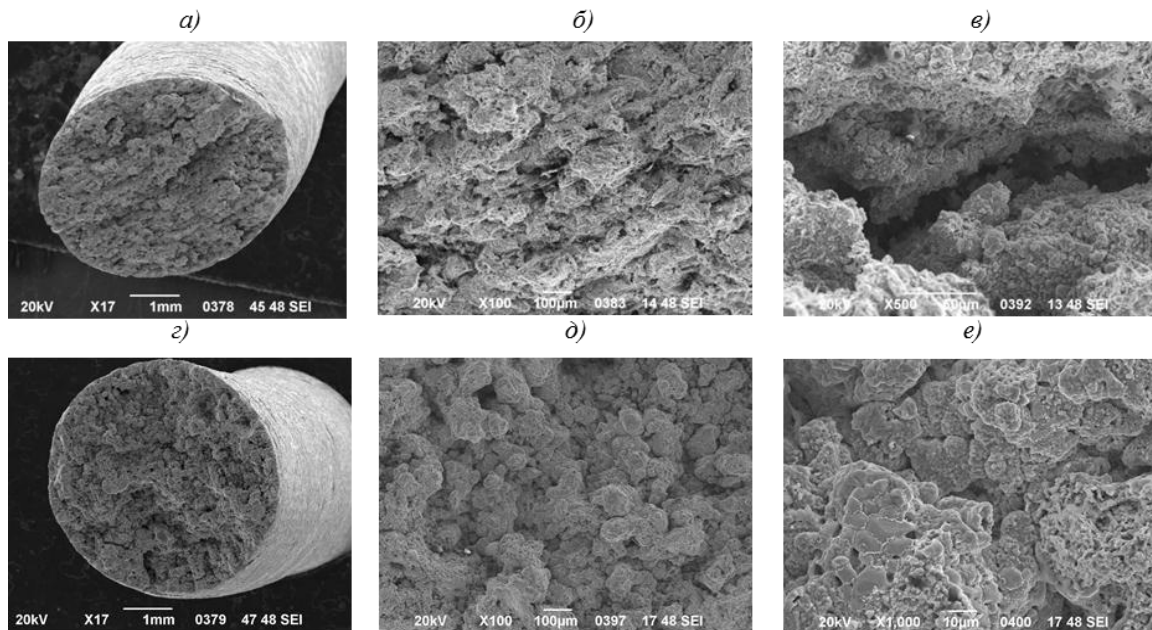


Рис. 3. Изломы образцов 3 (а–в) и 4 (г–е) после испытаний на длительную прочность при температуре 1100°C:

а, г – общий вид изломов; б, в, д, е – строение изломов

Для исследования микроструктуры образцов вблизи излома после испытаний на длительную прочность изучены поперечные микрошлифы образцов (рис. 4 и 5). Наиболее плотное строение без пор и рыхлот имеет образец 1, испытанный при температуре 800°C. В образцах, разрушенных при температуре 1100°C, обнаружены трещины, расположенные вблизи поверхности излома (рис. 5).

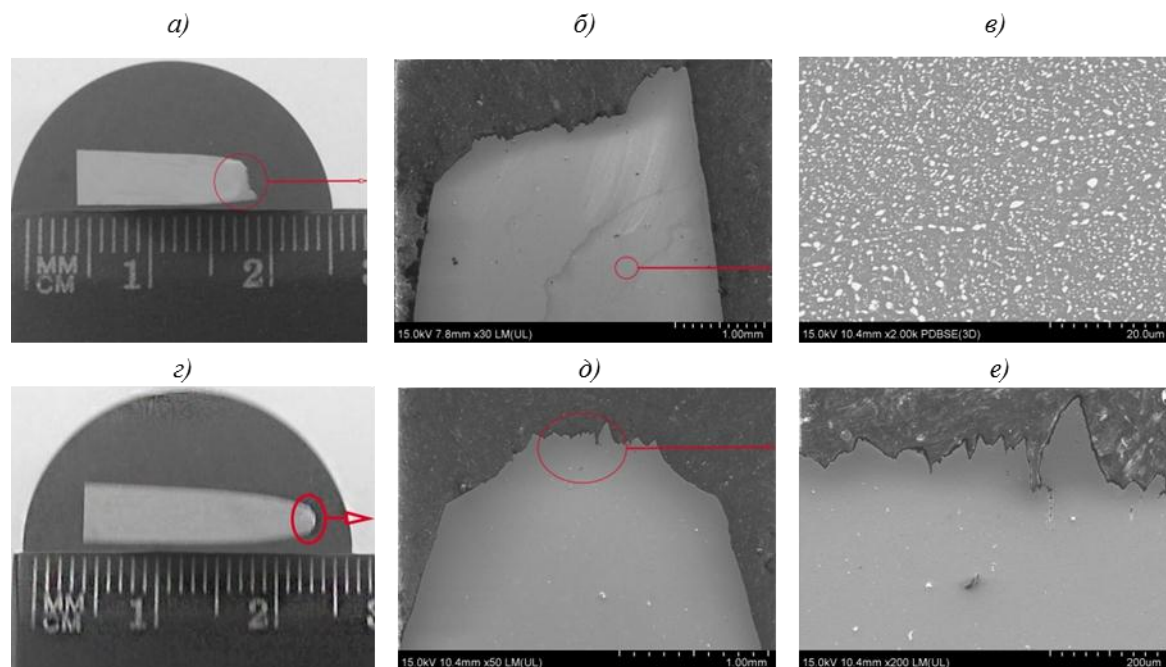


Рис. 4. Поперечные сечения рабочих частей образцов 1 (а–в) и 2 (г–е) вблизи излома и их микроструктура:

а, г – общий вид; б, д – профиль излома; в, е – микроструктура

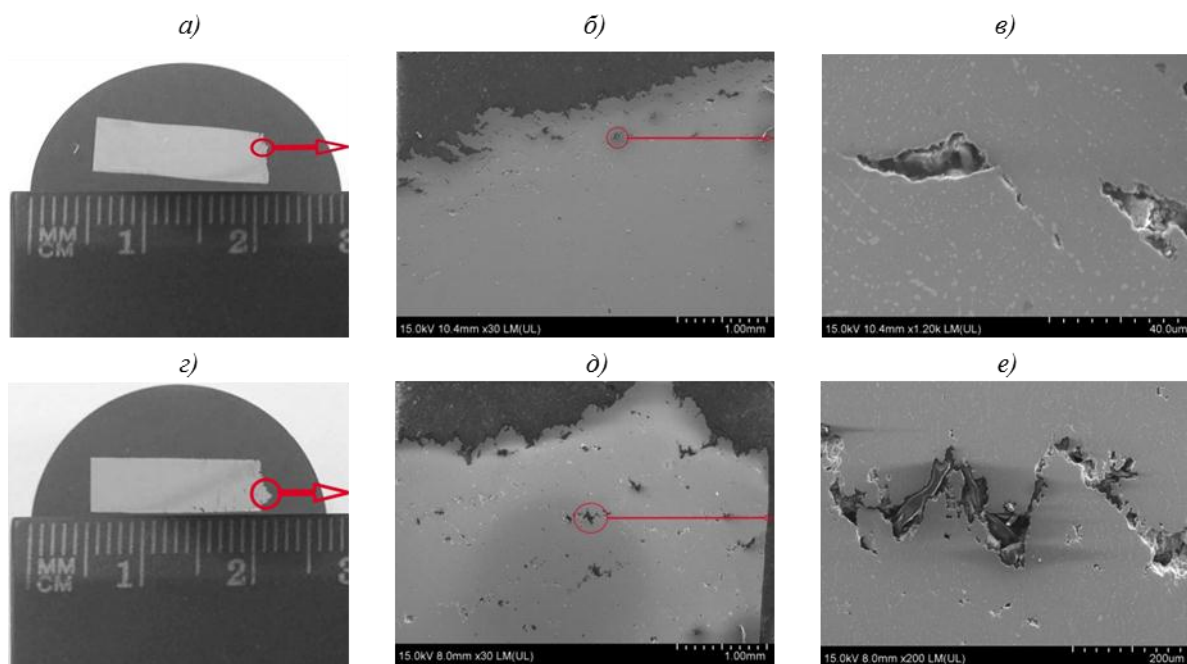


Рис. 5. Поперечные сечения рабочих частей образцов 3 (а–в) и 4 (г–е) вблизи излома и их микроструктура:

а, г – общий вид; б, д – профиль излома; в, е – микроструктура

Известно, что механизм зарождения трещин одинаков как при хрупком, так и при вязком разрушении. Возникновение микротрещин чаще происходит благодаря скоплению движущихся дислокаций (пластической деформации) перед препятствием (границами зерен, межфазными границами, перед всевозможными включениями и т. д.). При вязком разрушении величина пластической зоны, идущей впереди распространяющейся трещины, велика, а сама трещина затупляется у своей вершины. Вязкое разрушение обусловлено малой скоростью распространения трещины.

Трещины в образце, ориентированном горизонтально относительно платформы построения (рис. 5, в), расположены преимущественно в слоях синтезированного материала и идут по границам зерен, сформированных в процессе термической обработки материала. Зигзагообразная форма трещины в образце, ориентированном вертикально (рис. 5, е), позволяет сделать вывод о взаимодействии трещины с неоднородностями структуры образца. Предполагается, что в образцах 3 и 4 зарождение трещин проходило на дефектах структуры, а их рост проходил вдоль границ зерен структуры.

В образцах, полученных методом СЛС, присутствуют значительные сжимающие напряжения [17], которые способствуют торможению процесса диффузионной ползучести при высоких температурах. Время до разрушения образцов, выращенных вертикально относительно платформы построения, в процессе испытаний при высоких температурах (1100°C) в 4–5 раз превышает таковое для образцов, выращенных горизонтально. Предполагается, что данный эффект обусловлен ориентацией кристаллографической текстуры материала [18, 19] относительно направления приложенной к образцу нагрузки. В образцах, ориентированных вертикально, эти направления совпадают, благодаря чему данные образцы способны выдерживать нагрузку более длительное время.

В образцах, выращенных горизонтально относительно платформы построения, направление кристаллографической текстуры и приложенной к образцу нагрузки взаимно перпендикулярны, и данные образцы разрушаются при испытаниях с идентичной приложенной нагрузкой значительно быстрее.

Заключения

Установлено, что характер разрушения всех образцов вязкий. Повышение нагрузки с 25 до 220 МПа не оказывает значительного влияния на характер разрушения образцов. Структура поверхности изломов образцов после испытаний при температуре 1100°C более рыхлая, чем структура изломов образцов, испытанных при температуре 800°C. После испытаний при 1100°C в рабочей части образцов на некотором удалении от поверхности разрыва наблюдаются зигзагообразные трещины.

Время до разрушения во время испытаний при 800°C образца, ориентированного горизонтально относительно платформы построения, более чем в 4 раза превышает таковое для образца, ориентированного вертикально. Предполагается, что образец с вертикальной ориентацией разрушился быстрее по причине наличия в нем микропор, локализованных в рабочей части образца.

Время до разрушения во время испытаний при 1100°C образца, ориентированного вертикально относительно платформы построения, более чем в 5 раз превышает таковое для образца, ориентированного горизонтально.

Характер разрушений свидетельствует об анизотропии свойств разнонаправленных образцов. Предполагается, что более высокая длительная прочность вертикально ориентированного образца обусловлена как сжимающими напряжениями, так и кристаллографической текстурой материала, ориентированной параллельно приложенной к образцу нагрузке.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ВИАМ» Н.А. Ходыреву за получение образцов для исследования, И.С. Мазалову за полезное обсуждение результатов работы и к.т.н. А.Г. Евгенову за ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. №31. С. 43–47.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки и разливки современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 68–78.
4. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 105–117.
5. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // Крылья Родины. 2010. №4. С. 31–33.
6. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Металлургия литейных жаропрочных сплавов // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 125–132.
7. Кишкин С.Т., Каблов Е.Н. Литейные жаропрочные сплавы для турбинных лопаток // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М.: ВИАМ, 2002. С. 48–58.
8. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы нового поколения // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 27–44.
9. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
10. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
11. Hagedorn Y.-C., Risse T., Meiners W. et al. Processing of Nickel Based Superalloy MAR M-247 by means of High Temperature – Selective Laser Melting (HT-SLM) // High Value Manufacturing. 2014. P. 291–295. DOI: 10.1201/b15961-54.
12. Marchese G., Basila G., Bassini E. et al. Study of the Microstructure and Cracking Mechanism of Hastelloy X Produced by Laser Powder Bed Fusion // Materials. 2018. Vol. 11. P. 106–118. DOI: 10.3390/ma11010106.
13. Петрушин Н.В., Евгенов А.Г., Заводов А.В., Тренингов И.А. Структура и прочность жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ, полученного методом селективного лазерного сплавления на монокристаллической подложке // Материаловедение. 2017. №11. С. 19–26.
14. 3D Printing Industry [Электронный ресурс]. URL: <http://3dprintingindustry.com/news/general-electrics-ge9x-engine-undergoes-testing-3d-printed-components-104180/> (дата обращения: 27.02.2019).
15. Евгенов А.Г., Лукина Е.А., Асланян И.Р. Структура и свойства сплавов на основе никеля, полученных методом СЛС // Аддитивные технологии: настоящее и будущее: матер. II Междунар. конф. М.: ВИАМ, 2016. Ст. 1 (CD).
16. Овсепян С.В., Ахмедзянов М.В., Мазалов И.С., Расторгуева О.И. Легирование углеродом сплава системы Ni–Co–Cr–W–Ti, упрочняемого химико-термической обработкой // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 21–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-21-24.
17. Karpov I.D., Em V.T., Mazalov P.B., Sulyanova E.A. Characterisation of residual stresses by neutron diffraction at the research reactor IR-8 of NRC «Kurchatov Institute» // Journal of Physics Conference Series. November, 2018. 1109: SP012046. DOI: 10.1088/1742-6596/1109/1/012046.
18. Wei H.L., Mazumder J., DebRoy T. Evolution of solidification texture during additive manufacturing // Scientific Reports. 2015. Vol. 5. Art. No. 16446. DOI: 10.1038/srep16446.
19. Тренингов И.А., Филонова Е.В., Медведев П.Н., Лукина Е.А. Закономерности формирования текстуры и микротекстуры в жаропрочном никелевом сплаве в процессе селективного лазерного сплавления // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №1–2. Ст. 02. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 27.02.2019).

УДК 621.791.14

М.М. Бакрадзе¹, М.Д. Пантелеев¹, А.А. Скупов¹,
В.Е. Белозор², П.А. Пономарев²

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ СТП, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-11-20

Исследовано влияние параметров режима сварки трением с перемешиванием (СТП) алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469 на шероховатость поверхности шва и механические характеристики сварных соединений. Получены математические (регрессионные) модели зависимостей прочности и шероховатости от параметров процесса СТП. Для каждого из исследуемых сплавов установлена область режимов СТП, обеспечивающих шероховатость поверхности сварного шва $R_z \leq 50$ мкм и прочность сварного соединения на уровне 0,75–0,8 от прочности основного материала.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, регрессионная модель, алюминий-литиевые сплавы, механические свойства, усталостные характеристики.

М.М. Bakradze¹, М.Д. Panteleev¹, А.А. Skupov¹, В.Е. Belozor², Р.А. Ponomarev²

FSW-JOINTS MECHANICAL CHARACTERISTICS OPTIMIZATION BY MODERN COMPUTING SYSTEMS

The influence of the friction stir welding parameters of aluminum-lithium alloys V-1461 and V-1469 on welded joint surface roughness and mechanical properties has been investigated. Experiment planning was carried out and mathematical models for the dependencies of strength and roughness on the parameters of the FSW process were developed. For each of the studied alloys a welding parameter range has been established, which ensures an increased purity of the weld surface after welding ($R_z \leq 50$ μm), absence of defects and the welded joint strength level about 0,75–0,8 of the base metal strength.

Keywords: friction stir welding, regression model, aluminum-lithium alloys, mechanical properties, fatigue characteristics.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) [Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)]; e-mail: bauman@bmstu.ru

Введение

Для обеспечения возрастающих требований к надежности, ресурсу и весовой эффективности современных летательных аппаратов происходит постоянное совершенствование химического состава алюминиевых сплавов по легирующим элементам и примесям, технологических процессов и технологий их производства [1–3]. Повышенные

конструктивно-технологические и эксплуатационные требования к конструкции воздушного судна, а также современные возможности создания и производства материалов обуславливают переход к применению новых материалов с заданными физико-механическими свойствами, к которым относятся высокомодульные алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности. Важно отметить, что создание высокоэффективных изделий авиационной техники невозможно без успешного решения вопросов, связанных с технологическими процессами их переработки [4–9].

Одним из основных векторов развития металлургии алюминиевых сплавов, направленных на повышение весовой эффективности изделий авиационной и космической техники, является создание высокопрочных деформируемых термически упрочняемых алюминиевых сплавов системы Al–Cu–Li и разработка современных технологий получения их неразъемного соединения. При этом сварка является основным технологическим процессом получения таких соединений.

В то же время изготовление крупногабаритных сварных конструкций традиционными методами сварки плавлением из высокопрочных алюминий-литиевых сплавов связано с серьезными трудностями вследствие их низкой стойкости к образованию горячих трещин и разупрочнению под воздействием термического цикла [10–12].

Решить указанные проблемы и повысить свойства сварных соединений сплавов системы Al–Cu–Li можно, используя перспективный технологический процесс соединения в твердой фазе – процесс сварки трением с перемешиванием (СТП) [13].

Способ СТП был запатентован в СССР в 1965 г. [14] и обладает рядом преимуществ, которые обусловлены соединением в твердой фазе. К ним относятся: малое тепловложение при сварке и, соответственно, малое разупрочнение в зоне термического влияния (ЗТВ); низкие остаточные напряжения в сварном соединении, приводящие к минимизации деформации, что особенно важно при производстве крупногабаритных сварных конструкций из термически упрочняемых алюминиевых сплавов [15, 16]. Помимо этого, способ СТП обеспечивает высокую стабильность размеров и воспроизводимость процесса, отсутствие выгорания легирующих элементов и отсутствие внутренних дефектов типа пор и трещин, а также значительное снижение энергетических затрат. Технологический процесс СТП может успешно применяться для соединения алюминиевых сплавов, относящихся к категории несвариваемых методами сварки, когда вынужденно применяются заклепочные соединения. Это значительно упрощает технологию сборки, позволяет повысить уровень ее автоматизации и снизить массу конструкции. При этом применение СТП для соединения листов из алюминиевых сплавов, легированных литием, позволяет повысить коэффициент прочности соединения до 80% от прочности основного материала [17].

Формирование сварного соединения при СТП происходит в результате разогрева металла в зоне сварки до пластического состояния за счет трения и перемещения под высоким давлением в объеме, ограниченном рабочими поверхностями инструмента и подкладки. Основными параметрами СТП являются скорость вращения (ω) инструмента, скорость линейного перемещения инструмента (скорость сварки $V_{св}$), а также усилие прижатия инструмента (рис. 1).

Перечисленные параметры определяют условия фрикционного нагрева металла в зоне сварки и существенно влияют не только на значения и ориентацию сил, действующих на пластифицированный металл, но и на количественное фазовое состояние шва и околошовной зоны [18]. Именно поэтому важнейшим этапом разработки технологии СТП является выбор параметров режима сварки, которые определяют не только производительность изготовления сварной конструкции в целом, но и уровень механических свойств соединений [19, 20]. Поэтому эффективный поиск оптимальных

диапазонов параметров режима сварки необходим для обеспечения сбалансированного комплекса эксплуатационных, технологических и ресурсных характеристик сварной конструкции.

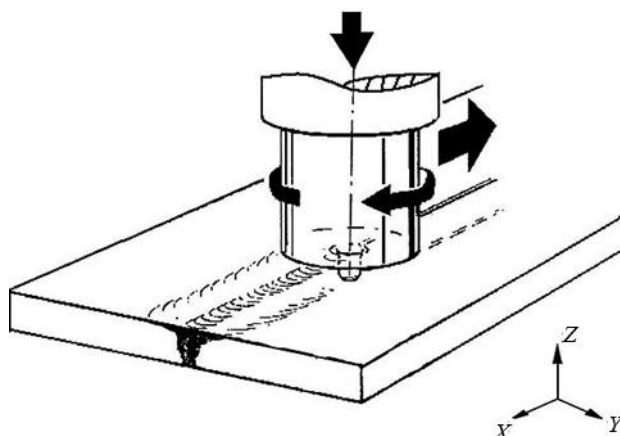


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием [17]

Целью данной работы является определение параметров режима СТП листовых полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов В-1461 и В-1469, обеспечивающих уровень прочности сварных соединений не ниже 0,7 от прочности основного металла в сочетании с характеристиками малоциклового усталости на уровне не ниже 150 тыс. циклов. Подобный ресурс особенно важен для конструкций толщиной <5 мм, когда последующая механическая обработка сварных соединений может быть затруднена.

Материалы и методы

Выбор оптимальных режимов сварки основан на поиске экстремума целевой функции предела прочности при разрыве и шероховатости поверхности. Предел прочности при разрыве однозначно характеризует статическую прочность сварного соединения. В качестве косвенного показателя долговечности сварного соединения принято значение шероховатости поверхности, поскольку, во-первых, высокие значения шероховатости поверхности снижают циклическую прочность, во-вторых, способ СТП позволяет получать гладкую поверхность без дополнительной механической обработки.

Целевую функцию строили на основе регрессионного анализа путем обработки результатов эксперимента [21, 22]. Предварительно определяли диапазон технологических параметров сварки сплавов В-1461 и В-1469, обеспечивающий бездефектное формирование сварного соединения.

Изготовленные из сварных соединений образцы испытывали на статическое растяжение и малоцикловую усталость. Переменными параметрами выбраны скорость вращения и линейное перемещение инструмента.

Предел прочности при разрыве (σ_B) сварных соединений определяли в соответствии с ГОСТ 6996–66.

Шероховатость поверхности шва в зоне воздействия рабочего инструмента измеряли с использованием конфокального лазерного сканирующего микроскопа OLYMPUS LEXT OLS3100.

Испытания по определению малоциклового усталости сварных соединений проводили согласно ГОСТ 25.502–79.

Для фрактографического анализа сварных соединений использовали сканирующий электронный микроскоп Verios 460 XHR в соответствии с требованиями ММ1.2 020–2002.

Эксперименты выполняли на образцах из листов толщиной от 3 до 4 мм сплавов В-1461-Т1 и В-1469-Т1.

Для сварки использовали лабораторную установку СТП на базе вертикального фрезерного станка; сварку проводили с использованием серийного инструмента производства АО «ВНИИАлмаз».

Результаты и обсуждение

Зависимости шероховатости и прочности сварных соединений от параметров режима СТП нелинейны и существует область с максимальными (минимальными) значениями. Для исследования подобных нелинейных зависимостей необходимо применение как минимум трех уровней варьирования (ПФЭ 3²) на основании результатов девяти проведенных экспериментов для каждого сплава. Результаты проведения эксперимента по матрице плана второго порядка В₂ представлены в табл. 1 [23].

Таблица 1

Матрица плана второго порядка В₂

Условный номер образца	План эксперимента	
	X_1	X_2
1	–	–
2	+	–
3	–	+
4	+	+
5	–	0
6	+	0
7	0	–
8	0	+
9	0	0

Скорость вращения инструмента ω (фактор X_1) варьировалась в пределах 515–790 об/мин, скорость сварки $V_{св}$ (фактор X_2) – в пределах 64–112 мм/мин. Результаты планирования эксперимента по определению предела прочности при разрыве (σ_B) и шероховатости поверхности шва в зоне воздействия рабочего инструмента (R_z) для каждого сплава представлены в табл. 2. Последовательность проведения экспериментов рандомизирована.

Таблица 2

Результаты планирования эксперимента

Условный номер образца	Сплав В-1469		Сплав В-1461	
	σ_B , МПа	R_z , мкм	σ_B , МПа	R_z , мкм
1	395	82	380	77
2	375	91	360	99
3	405	89	365	125
4	415	66	390	101
5	415	70	385	78
6	420	54	390	71
7	405	74	395	68
8	425	67	400	96
9	435	48	410	54

Обработку результатов эксперимента (табл. 3) и последующее построение системы линий уровня (рис. 2 и 3) проводили в программе «Statistica».

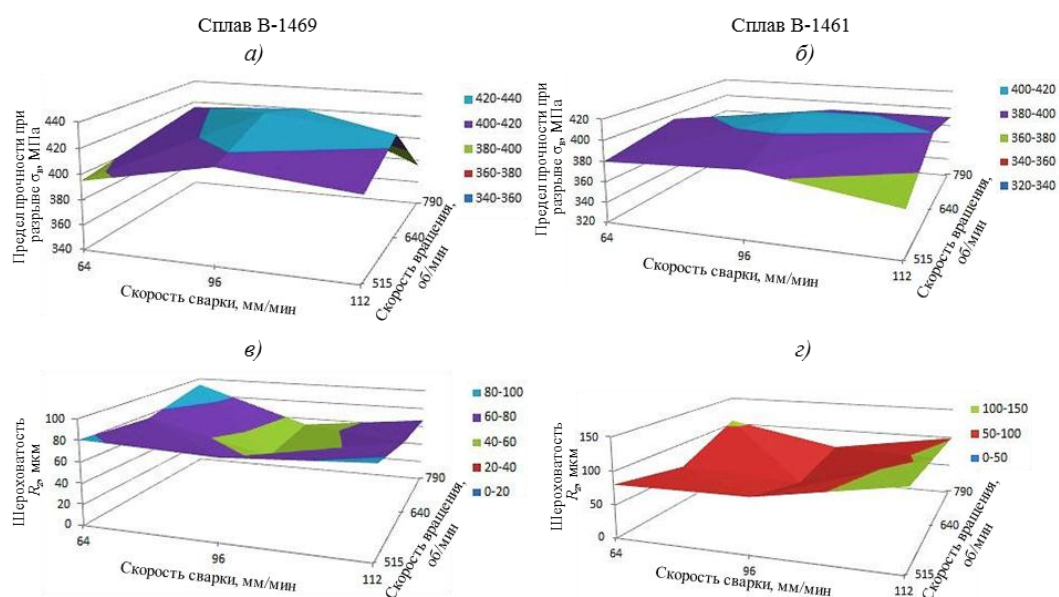


Рис. 2. Зависимости предела прочности при разрыве (а, б) и шероховатости поверхности (в, г) для сварного соединения сплавов В-1469 и В-1461 от режимов сварки трением с перемешиванием

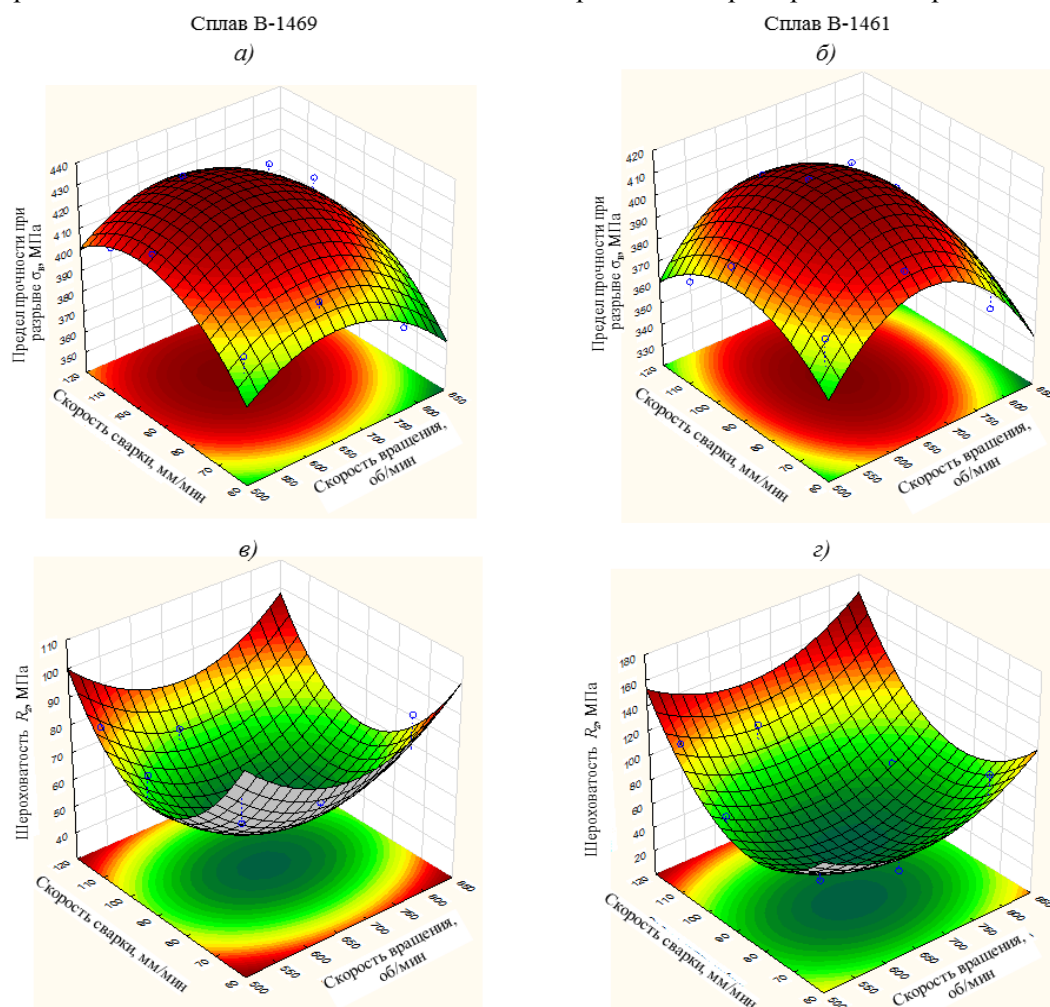


Рис. 3. Поверхности функций отклика предела прочности при разрыве (а, б) и шероховатость поверхности (в, г) в исследуемой области режимов сварки трением с перемешиванием для сплавов В-1469 и В-1461

Таблица 3

Результаты вычисления коэффициентов модели

Коэффициенты регрессии	Функция отклика для сплава			
	B-1469		B-1461	
	$\sigma_{в.св.}$, МПа	R_z , мкм	$\sigma_{в.св.}$, МПа	R_z , мкм
b0	-105,677	525,01	-131,14	709,662
b1	0,991832	-0,70125	1,34465	-1,0407
b2	4,488076	-5,2476	2,18065	-7,8716
b12	0,00237	-0,00248	0,003331	-0,00346
b11	-0,00093	0,000682	-0,00125	0,001029
b22	-0,03147	0,037977	-0,02387	0,060547

С учетом коэффициентов из табл. 3, соответствующие зависимости могут быть представлены в виде:

для сплава B-1469

$$\sigma_{в} = -105,677 + 0,9918V_{св} + 4,488\omega + 0,00237V_{св} \cdot \omega - 0,00093V_{св}^2 - 0,03147\omega^2, \quad (1)$$

$$R_z = 525,01 - 0,70125V_{св} - 5,2476\omega - 0,00248V_{св} \cdot \omega + 0,000682V_{св}^2 + 0,037977\omega^2;$$

для сплава B-1461

$$\sigma_{в} = -131,14 + 1,34465V_{св} + 2,18065\omega + 0,003331V_{св} \cdot \omega - 0,00125V_{св}^2 - 0,02387\omega^2, \quad (2)$$

$$R_z = 709,662 - 1,0407V_{св} - 7,8716\omega - 0,00346V_{св} \cdot \omega + 0,001029V_{св}^2 + 0,060547\omega^2.$$

Для каждой модели рассчитана дисперсия адекватности и дисперсия ошибок, определяющая меру рассеяния, вызванного экспериментальной ошибкой, по формулам:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n p_i (Y_i' - \hat{Y}_i)^2; \quad (3)$$

$$S_{ош}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{p_i} (Y_{ij} - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n p_i - n}, \quad (4)$$

где $\hat{Y}_i$ – значение величины Y , предсказанное полученной эмпирической моделью для каждого из значений X_i ; Y_i' – среднее значение функции отклика в i -ом опыте; n – число опытов; p_i – число параллельных измерений в i -ом опыте.

Адекватность моделей проверяли по критерию Фишера (табл. 4):

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_{ош}^2}. \quad (5)$$

Таблица 4

Критерии Фишера для разработанных моделей

Сплав	Модель функции	Расчетное значение критерия F_p	Табличное значение F_p
B-1469	Модель σ	2,159	2,227
	Модель R_z	1,316	
B-1461	Модель σ	2,172	
	Модель R_z	0,526	

Видно, что наибольшее влияние на шероховатость лицевой поверхности сварных соединений (и как следствие – на усталостную долговечность [24]) оказывает скорость сварки, так как перед ней стоит наибольший коэффициент Фишера. При этом модели менее чувствительны к изменению скорости вращения инструмента.

Для полученных поверхностей отклика найдены (табл. 5) экстремумы и соответствующие им значения скорости сварки и скорости вращения инструмента.

Таблица 5

Экстремумы функций σ_b и R_z для сплавов В-1469 и В-1461

Сплав	Функция	Значение	ω	$V_{св}$
В-1469	σ	435	655,5	96
	R_z	47	680,1	91
В-1461	σ	413	660	92
	R_z	45	646	84

В табл. 6 представлены наиболее высокие значения механических характеристик сварных соединений, получение которых возможно при соблюдении режимов, соответствующих расчетным значениям.

Таблица 6

Механические свойства сварных соединений сплавов В-1469 и В-1461

Сплав	σ_b , МПа*	$k=\sigma_{b,св}/\sigma_b$
В-1469	<u>415–440</u> 435	0,8
В-1461	<u>390–400</u> 395	0,75

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Анализ полученных результатов показывает, что область минимальной шероховатости $R_z \leq 50$ мкм располагается внутри области $\sigma_{b,св}/\sigma_b \leq 0,8$. Полученные зависимости позволяют при заданных параметрах режима прогнозировать значения шероховатости и прочности сварного шва применительно к используемому инструменту.

Известно, что при увеличении шероховатости поверхности деталей снижаются их усталостные характеристики [25]. При СТП формируется специфическая поверхность шва – более грубая, чем исходная поверхность листа. Поэтому при условии отсутствия внутренних дефектов малоцикловая усталость (МЦУ) сварного образца будет предопределяться именно морфологией лицевой поверхности шва, которая может быть охарактеризована параметром шероховатости R_z , меняющимся в зависимости от режима сварки. Для установления характера этой зависимости испытывали образцы из сплавов В-1469 и В-1461 на МЦУ при напряжении $\sigma_{\max}^{\text{нetto}} = 196$ МПа. Полученные результаты представлены на рис. 4.

Установлено, что сварные соединения сплавов В-1469 и В-1461 с шероховатостью поверхности швов $R_z \leq 50$ мкм показывают высокие значения МЦУ: более 300 тыс. циклов без разрушения для сплава В-1461 и более 150 тыс. циклов для сплава В-1469.

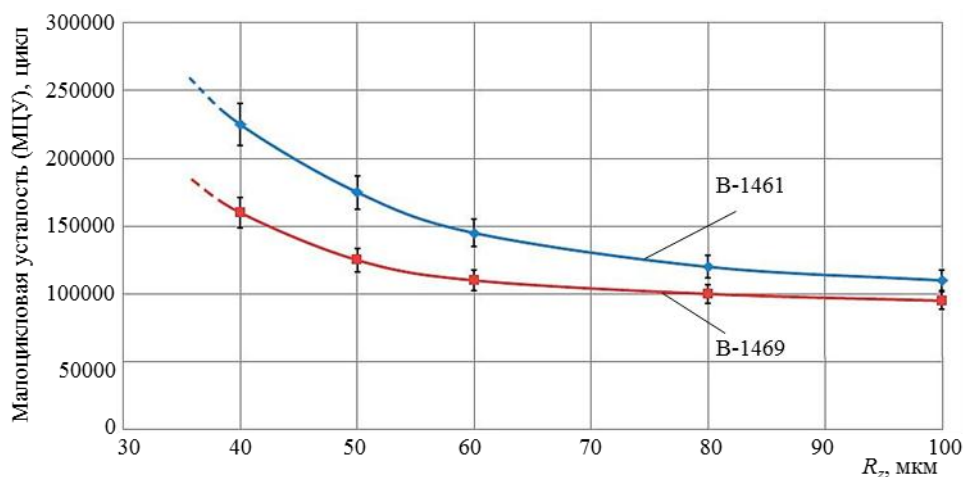


Рис. 4. Зависимость МЦУ от шероховатости поверхности сварных соединений сплавов В-1469 и В-1461 (при напряжении $\sigma_{\max}^{\text{нетто}} = 196$ МПа)

Фрактографический анализ сварных соединений сплавов В-1469 и В-1461 после испытаний на МЦУ показал, что очаги изломов непосредственно связаны с неровностями сварного шва. При шероховатости лицевой поверхности сварного шва $R_z \leq 50$ мкм в изломах сварных образцов наблюдается один развитый очаг разрушения. Разрушение сварного соединения сплава В-1469 развивается от усталостных трещин (рис. 5).

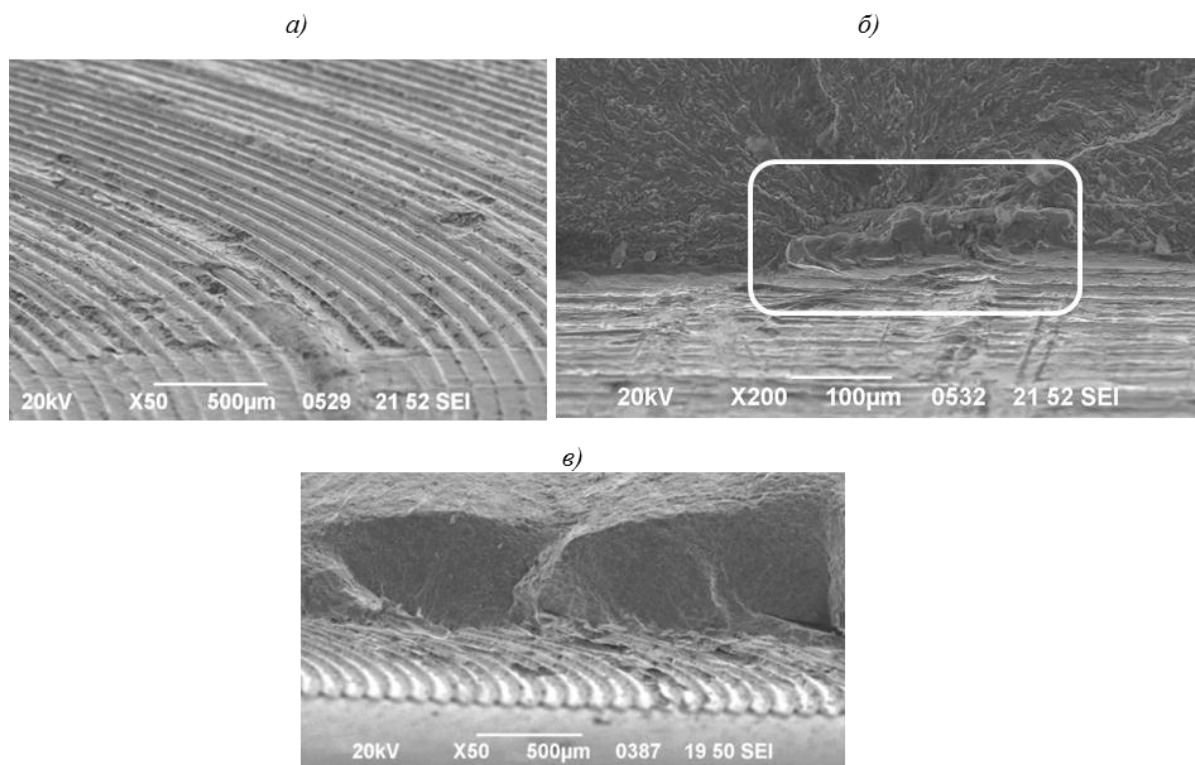


Рис. 5. Сварное соединение сплава В-1469 (а) с одноочаговым (б) и многоочаговым характером разрушения (в)

При шероховатости лицевой поверхности шва $R_z \geq 60$ мкм очагами разрушения сварных образцов являются грубые неровности сварного шва и разрушение становится многоочаговым, развиваясь на все сечение образца.

Заключения

1. Построены математические (регрессионные) модели зависимостей прочности и шероховатости поверхности соединений, выполненных СТП, от технологических параметров сварки – скорости сварки ($V_{св}$) и скорости вращения инструмента (ω).
2. Определена область режимов СТП для алюминий-литиевых сплавов В-1469 и В-1461, обеспечивающих прочность сварного соединения на уровне 0,75–0,8 от прочности основного материала и значения МЦУ более 300 тыс. циклов без разрушения (при напряжении $\sigma_{\max}^{\text{нетто}} = 196$ МПа).
3. Применение режимов СТП с пониженной шероховатостью поверхности позволяет повысить характеристики сопротивления усталости сварных соединений.
4. Установленные зависимости МЦУ от шероховатости сварных соединений сплавов В-1469 и В-1461 позволят прогнозировать потенциальный ресурс сварных соединений и при необходимости вводить мероприятия по улучшению чистоты поверхности сварных швов.
5. Определено критическое значение шероховатости ($R_z \leq 50$ мкм) поверхности сварных швов, выполненных СТП, при котором меняется характер разрушения сварных соединений с многоочагового до одноочагового и происходит повышение характеристик сопротивления усталости сварных соединений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. №8 (884). С. 86–91. DOI: 10.17580/tsm.2016.08.13.
3. Пантелеев М.Д., Бакрадзе М.М., Скупов А.А., Щербakov А.В., Белозор В.Е. Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава В-1579 // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-11-17.
4. Антипов В.В., Серебrenникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Козлова О.Ю., Пантелеев М.Д., Осипов Н.Н., Клычев А.В. Технологические особенности изготовления деталей из алюминий-литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №10 (70). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-17-26.
5. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
6. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 3–10.
8. Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
9. Ключкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П., Бурляева И.П., Овсянников Б.В. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 8–12.
10. Шалин Р.Е., Ефремов И.С., Яровинский Ю.Л., Лукин В.И. Опыт проектирования и изготовления крупногабаритных конструкций из алюминий-литиевых сплавов изделий ракетно-космической техники // Сварочное производство. 1996. №11. С. 14–18.

11. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В., Лавренчук В.П., Котельникова Л.В., Оглодков М.С. Повышение надежности сварных соединений из высокопрочного алюминиево-литиевого сплава В-1461 // Сварочное производство. 2010. №11. С. 14–17.
12. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Антипов В.В., Клочков Г.Г., Скупов А.А. Влияние термической обработки на структуру сварных соединений листов из сплава В-1469 системы Al–Cu–Li, полученных лазерной сваркой // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 9–18. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-9-18.
13. Petrovic M., Veljic D., Rakin M. et al. Friction-stir welding of high-strength aluminium alloys and a numerical simulation of plunge stage // Materials in technology. 2012. Vol. 46. No. 3. P. 215–221.
14. Способ сварки металлов трением: а.с. 195846 СССР; опубли. 04.05.67.
15. Mishra R.S., Ma Z.Y. Friction stir welding and processing // Journal Material Science Engineering. 2005. Vol. 50. P. 1–78.
16. Штрикман М.М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений // Сварочное производство. 2007. №9. С. 35–40.
17. Бецофен С.Я., Сбитнева С.В., Пантелеев М.Д., Бакрадзе М.М., Долгова М.И., Кабанова Ю.В. Исследование формирования фазового состава сплава системы Al–Cu–Li В-1469 в процессе сварки трением с перемешиванием // Металлы. 2018. №6. С. 54–63.
18. Силис М.И., Елисеев А.А., Силис В.Э. и др. Особенности структуры сварных соединений алюминиевых сплавов, полученных фрикционной сваркой // Металловедение и термическая обработка. 2009. №4. С. 34–39.
19. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Алексеев А.А., Лукина Е.А. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al–Cu–Mg–Li–Zn // Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 15–19.
20. Yanfeng D., Zhijie T., Peitao G., Yanhua Z. Effect of process parameters on weld quality by friction stir welding of 2219 aluminum alloy // China Welding. 2011. Vol. 20. No. 2. P. 12–16.
21. Лукин В.И., Саморуков М.Л., Ковальчук В.Г. Моделирование ротационной сварки трением высокожаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // Сварочное производство. 2016. №11. С. 12–18.
22. Саморуков М.Л. Аналитический подход к математическому моделированию температурной составляющей ротационной сварки трением // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №9. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 31.10.2018).
23. Должанский Ю.М., Новик Ф.С., Чемлева Т.А. Планирование эксперимента при исследовании и оптимизации свойств сплавов: методич. пособие. М.: ВИАМ, 1974. 132 с.
24. Lukin V.I., Ioda E.N., Skupov A.A., Panteleev M.D., Ovchinnikov V.V., Malov D.V. Effect of the surface roughness of friction stir welded joints on the fatigue characteristics of welded joints in V-1461 and V-1469 aluminium-lithium alloys // Welding International. 2017. Vol. 31:12. P. 974–978. DOI: 10.1080/09507116.2017.1369062.
25. Хейвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости. М.: Машиностроение, 1969. 503 с.

УДК 678.8

Б.С. Кири¹, С.Л. Лонский¹, Г.Н. Петрова¹, А.Е. Сорокин¹**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ
НА ОСНОВЕ ПОЛИЭФИРЭФИРКЕТОНОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-21-29

Статья посвящена разработке материалов для 3D-печати методами селективного лазерного спекания (SLS) и послойного наплавления (FDM) на основе полиэфирэфиркетон¹ов зарубежного производства.

Технологии 3D-печати позволяют изготавливать авиационные детали и конструкции сложной геометрической формы за единый технологический цикл с минимальными трудовыми затратами при минимальном количестве отходов.

Приведены результаты исследования свойств композиций для переработки SLS- и FDM-методами на основе полиэфирэфиркетон¹ов производства фирмы Zypeek (Китай) марок 550PF и 330UPF, а также производства компании Victrex (Англия) марок 90G, 150G и 380G. Сформулированы основные требования к таким композициям и принципы их подготовки к переработке.

Ключевые слова: полиэфирэфиркетон, аддитивные технологии, селективное лазерное спекание, 3D-печать, послойное наплавление, послойный синтез.

B.S. Kirin¹, S.L. Lonskii¹, G.N. Petrova¹, A.E. Sorokin¹**MATERIALS FOR THE 3D-PRINTING
ON THE BASIS OF POLYETHERETHERKETONES**

Development of foreign production polyetheretherketon materials for the 3D printing by the selection laser baking (SLS) and fiber fusing (FDM) methods of on the basis of polyetheretherketones of foreign production.

3D-technologies allow to make aviation details and designs of the composite geometry for a uniform production cycle with minimum labor costs and quantity of a wastage.

Results of compositions properties research for processing by SLS- and FDM-methods on the basis of polyetheretherketon of Zypeek (China) brands 550PF and 330UPF and also production of the Victrex company (England) brands 90G, 150G and 380G has been shown in article. The main requirements to such compositions and the principles of their preparation for processing has been formulated.

Keywords: polyetheretherketone, additive technologies, selection laser sintering, 3D-printing, layer-by-layer fusing, rused deposition molding.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

На современном уровне развития авиационной промышленности особое значение приобретают перспективные инновационные технологии, потенциал которых позволяет одновременно повышать эксплуатационные свойства материалов и увеличивать их технологичность [1–4]. Важными аспектами производства также становятся экологичность и безотходность. Такие технологии, как правило, базируются на широком использовании информационных технологий, систем автоматизации и искусственного

интеллекта, позволяющих оперативно осуществлять подстройку технологического процесса под требования конкретного момента и свойства новых материалов [5–9].

Огромным потенциалом для решения подобных задач обладают 3D-технологии благодаря своей универсальности, широким возможностям адаптации, малой доле отходов и высокой степени автоматизации. Рынок таких технологий и материалов для них непрерывно растет [10–15].

Наиболее распространенными методами 3D-печати термопластичных материалов в настоящее время являются: послойное наплавление (FDM-печать) и селективное лазерное спекание (SLS-печать). В первом случае полуфабрикатом для 3D-печати является полимерный филамент, во втором – порошковая композиция.

Выбор того или иного метода 3D-печати для изготовления конкретных изделий обычно обусловлен рядом факторов, таких как свойства исходного материала и конечного изделия, его конфигурация и требуемая производительность процесса. Так, изделия, полученные FDM-методом, часто требуют дополнительной механической обработки из-за высокой шероховатости поверхности и необходимости печати не входящих в конструкцию детали поддерживающих элементов. Кроме того, филамент для FDM-печати производится на экструзионных линиях с высокими допусками по диаметру, что требует существенных расходов на его получение из гранулированного или порошкообразного сырья.

В то же время при SLS-печати предъявляются достаточно высокие требования к качеству полимерных материалов, так что печать из обычных полимерных порошков, представленных на рынке, далеко не всегда возможна.

Российский рынок полимерных материалов и оборудования для 3D-печати характеризуется высокой насыщенностью предложений импортных решений в области материалов общего назначения и ограничениями в области высокотехнологичной продукции. Таким образом, санкционные ограничения, установленные рядом зарубежных государств, не позволяют отечественным предприятиям закупать современные высокоэффективные конструкционные полуфабрикаты для аддитивных технологий и установки для изготовления изделий. При этом отечественные разработки в данной области представлены на рынке фрагментарно и не позволяют решать стоящие перед промышленностью задачи.

В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на разработку отечественных высокоэффективных материалов для аддитивных технологий, способных составить успешную конкуренцию импортным аналогам.

В настоящее время одними из перспективных материалов для 3D-печати являются полиэфирэфиркетоны [16–19]. Их достоинства – высокие физико-механические свойства и термостабильность, стойкость к агрессивным средам, химическая инертность – определяют круг задач, которые могут быть решены благодаря применению этих материалов. В частности, полиэфирэфиркетоны (polyetheretherketon – ПEEK) применяют при изготовлении деталей авиационной техники, работающих под механическими нагрузками при повышенных температурах. В то же время серьезным недостатком ПEEK является трудность его переработки в изделия и полуфабрикаты, связанная с очень высокими для термопласта температурами кристаллизации и плавления, невозможностью эффективного растворения в растворителях, трудностью измельчения в дробилках, склонностью к накоплению статического электричества порошками и рядом других факторов [20–23].

Полиэфирэфиркетоны (как FDM (филамент), так и SLS (порошок)) перерабатываются в изделия методами 3D-печати. Требования к филаменту включают, прежде всего, соблюдение допусков на его диаметр (порядка $1,75 \pm 0,1$ мм – для большинства

3D-принтеров) и температуру плавления. Для переработки SLS-порошков особое значение имеют фракционный состав, сферичность и шероховатость частиц полимера.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Для изготовления полуфабрикатов для 3D-печати в работе использовали полиэфирэфиркетоны производства Англии и Китая марок Victrex 90G, 150G, 380G и Zureek 550PF и 330UPF соответственно.

Фракционный состав порошкового полиэфирэфиркетона исследовали методом сканирующей электронной микроскопии с помощью микроскопа TESCAN VEGA 3 XMU в режиме вторичных электронов при увеличениях от $\times 200$ до $\times 10000$.

Для исследования фракционного состава опытные образцы порошков полиэфирэфиркетона наносили на поверхность токопроводящего скотча на основе углерода, после чего на их поверхность в вакуумной установке для магнетронного напыления Q150R ES наносили слой золота. Количественную обработку полученных данных фракционного состава проводили с применением программного обеспечения анализа изображений ImageScope Color по МИ1.2.042–2011.

Температуры стеклования, кристаллизации и плавления определяли по ГОСТ Р 55134–2012, температуру деструкции – по ГОСТ 29127–91.

Угол естественного откоса определяли по ГОСТ 27802–93, насыпную плотность – по ГОСТ 11035.1–93, диаметр филамента – по ГОСТ 33694–2015, влажность – по ГОСТ Р 56721–2015.

Результаты и обсуждение

В данной работе проведены исследования, направленные на разработку требований к композициям на основе РЕЕК для переработки методами FDM и SLS. Переработку термопластичных композиций методом FDM-печати осуществляли на их полуфабрикатах – филаментах (экструдатах). Образцы полимерных филаментов для 3D-печати получали экструзией на двухшнековом экструдере. Для исследований выбрали РЕЕК фирмы Victrex марок 90G, 150G и 380G.

Установлено, что одним из определяющих факторов для получения качественного экструдата для использования в FDM-технологии является влажность исходного материала. Для полиэфирэфиркетонов влажность гранулята составляет около 0,3–0,4% (по массе).

Высокая температура переработки полимера (до 450°C) приводит к чрезвычайно интенсивному испарению содержащейся в нем влаги с образованием дефектов в виде пузырьков и раковин, что требует предварительной продолжительной сушки. При этом уже после нескольких часов пребывания РЕЕК на открытом воздухе влажность высушенного материала возрастает настолько, что в экструдате начинают образовываться дефекты. Поэтому, если нет возможности использовать материал непосредственно после сушки, его следует хранить в герметичной емкости не более 1 сут.

Для переработки филамента FDM-методом определяющее значение имеет стабильность геометрических размеров филамента и отсутствие дефектов. Жесткие требования предъявляются, прежде всего, к соблюдению допусков на диаметр филамента, а также к качеству его поверхности – наличию пор, раковин и посторонних включений.

Однако проведенные исследования показали, что полученный филамент обладает значительной разнотолщиной, не всегда удовлетворительной с точки зрения его

переработки на FDM-принтере. В настоящее время общепринятым требованием к качеству филамента является разнотолщинность в пределах до $\pm 0,1$ мм (диаметр филамента $1,75 \pm 0,1$ мм), что в большинстве случаев обеспечивает получение на принтере качественных образцов или изделий. Полученные в данной работе образцы филамента характеризовались разнотолщинностью от 0,09 до 0,16 мм. По-видимому, причина этого – особенности технологии получения изделий методом экструзии, в частности использование метода свободной калибровки стренг полимера с последующим охлаждением на воздухе. Опробованная в ходе работы схема водяного охлаждения не позволила улучшить качество филамента из-за слишком активного протекания процессов кристаллизации на входе в охлаждающую ванну, приводящих к короблению филамента. Следовательно, проблема снижения разнотолщинности филамента требует применения калибраторов специальной конструкции с охлаждением стренги полимера в контакте с металлической термостатируемой оснасткой.

Результаты измерения диаметров филаментов PEEK приведены в табл. 1.

Таблица 1

Разнотолщинность филаментов на основе различных марок полиэфирэфиркетонов фирмы Victrex (Англия)

Марка материала	Диаметр, мм
Victrex 90G	$1,74 \pm 0,09$
Victrex 150G	$1,83 \pm 0,09$
Victrex 380G	$1,77 \pm 0,16$

Из приведенных данных видно, что филамент, полученный из PEEK марки Victrex 150G, не удовлетворяет требованиям по диаметру, а филамент PEEK на основе марки Victrex 380G – по точности соблюдения размеров. Различия в качестве полученных материалов объясняются, по-видимому, различиями в вязкоупругом течении расплавов различных марок PEEK, что приводит к более интенсивным релаксационным изменениям стренг для марок с большей упругой составляющей течения.

Результаты исследования температур плавления, кристаллизации и деструкции исследуемых филаментов PEEK методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Температурные переходы филаментов различных марок полиэфирэфиркетонов фирмы Victrex (Англия)

Марка материала	Температура кристаллизации, °C	Температура плавления, °C	Температура деструкции, °C
Victrex 90G	302	342	568
Victrex 150G	307	344	574
Victrex 380G	301	342	577

Из полученных данных видно, что переработка всех марок PEEK возможна в одних и тех же температурных интервалах, однако на практике установлено, что марки с большей молекулярной массой имеют существенно большую вязкость расплава, что требует коррекции температур переработки в сторону их увеличения. Согласно полученным данным, показатель текучести расплавов марок Victrex 90G, 150G и 380G при 360°C составляет 120; 56 и 31 г/10 мин, а марок Zypreek 550PF и 330UPF: 7 и 45 г/10 мин соответственно.

Таким образом, для переработки композиций полиэфирэфиркетона методом FDM филамент на основе PEEK должен удовлетворять следующим требованиям:

- диаметр филамента $1,75 \pm 0,1$ мм;
- температура плавления $350 \pm 15^\circ\text{C}$.

Для реализации этих показателей перед переработкой филамента необходима сушка PEEK. Экструзионная линия по производству филамента должна комплектоваться калибратором. Температуры переработки материала зависят от его молекулярной массы: с ее возрастанием значения температуры увеличиваются.

В работе также проведены исследования, направленные на разработку технических требований для применения композиций PEEK для переработки методом SLS.

Ранее во ФГУП «ВИАМ» проводились работы по переработке порошковых материалов на основе PEEK различных марок в образцы методом лазерного SLS. В ходе работ возник ряд технологических проблем, не позволяющих получать на существующем оборудовании образцы со стабильными свойствами. Так, в ходе разравнивания новых слоев материала ножом установки на поверхности материала возникали дефекты в виде полос и задигов, что не давало возможности равномерно наносить новые слои образцов. Образование таких дефектов связано с комкованием материала (рис. 1).



Рис. 1. Комкование порошка полиэфирэфиркетона в камере построения образца

С целью улучшения технологичности существующих порошков для SLS на базе марок полиэфирэфиркетонa Zypeek 550PF и 330UPF проведены исследования их гранулометрических характеристик. Распределение частиц по размерам изучали методом сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что указанные марки материалов существенно различаются по гранулометрическому составу: материал марки 330UPF имеет вдвое меньший средний размер частиц по сравнению с материалом марки 550PF. Кроме того, существенно различаются интервалы распределения размеров. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Размеры частиц порошков различных марок полиэфирэфиркетонa
фирмы Zypeek (Китай)**

Марка материала	Размер частиц, мкм		
	$D_{\min}$	$D_{\text{ср}}$	$D_{\max}$
Zypeek 550PF	17,2	40,3	69,9
Zypeek 330UPF	8,7	19,1	32,1

Описанные ранее технологические проблемы наблюдаются для ряда различных порошков и не коррелируют напрямую с данными по размеру частиц. Тем не менее одним из требований к SLS-композициям является минимальная полидисперсность частиц. Существует также минимальный размер частиц, менее которого переработка порошков методом SLS не рекомендуется. Данный размер варьируется от 60 до 120 мкм в зависимости от типа материала и конкретных условий проведения процесса. Таким

образом, в дальнейшей работе рекомендуется выбирать марки РЕЕК с бóльшим размером частиц и минимальной полидисперсностью.

Исходя из теоретических представлений о процессе, определяющей технологической характеристикой для процесса разравнивания слоев полимера при переработке методом SLS является сыпучесть порошка. Результаты исследования сыпучести методом определения угла естественного откоса приведены на рис. 2.

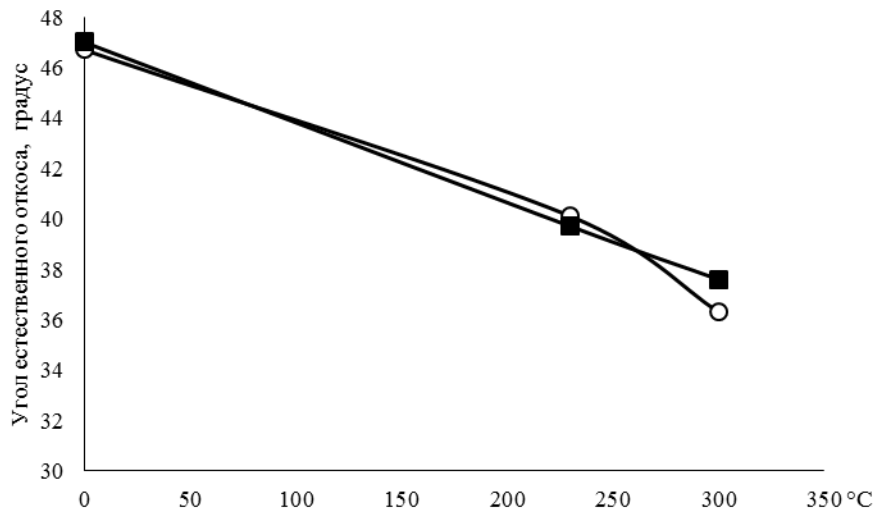


Рис. 2. Зависимость угла естественного откоса порошков полиэфирэфиркетона марки Zureek 550PF от температуры термообработки:

○ — в исходном состоянии; ■ — после сушки

Известно, что сыпучесть порошков существенно зависит от их насыпной плотности, поэтому в работе проведены исследования по направленному регулированию насыпной плотности порошков РЕЕК с целью увеличения их сыпучести. Для этого порошки подвергали термообработке в термошкафу. Установлено, что термообработка позволяет существенно повысить насыпную плотность композиций, при этом сушка материала также оказывает положительное влияние на сыпучесть. Результаты приведены на рис. 2–4. Таким образом, результаты исследований могут быть использованы на практике для регулирования сыпучести композиций для SLS.

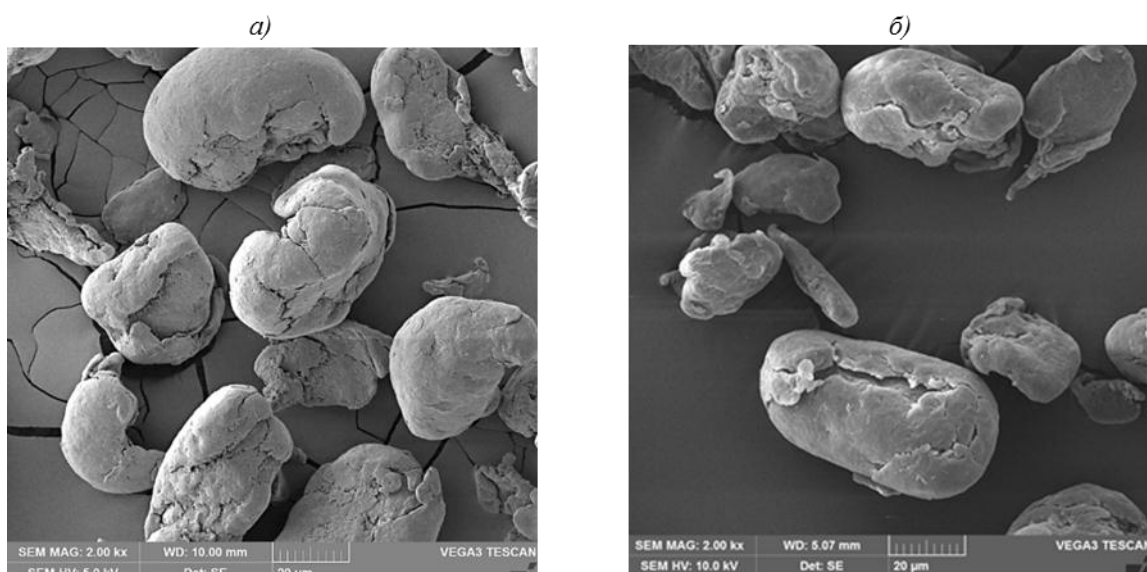


Рис. 3. Частицы полиэфирэфиркетона марки Zureek 550PF до (а) и после отжига (б)

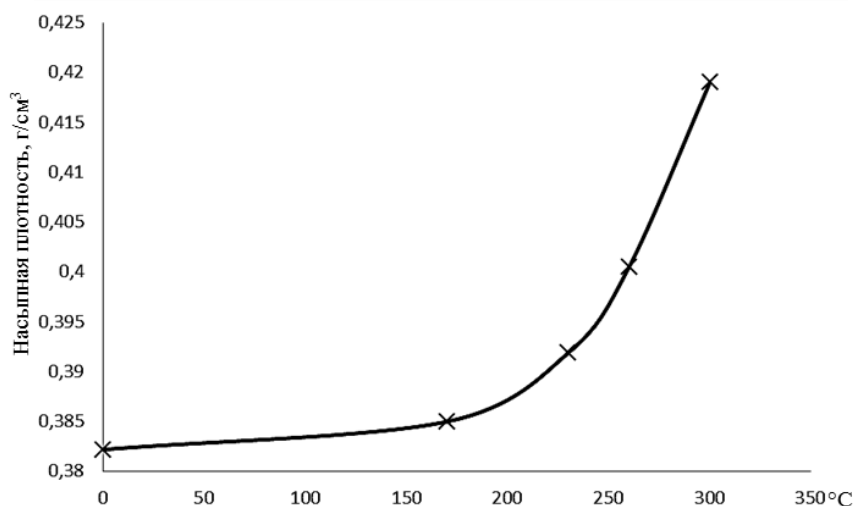


Рис. 4. Зависимость насыпной плотности порошка полиэфирэфиркетона от температуры отжига при продолжительности отжига 15 ч

В результате отжига удалось существенно (до 14%) повысить насыпную плотность РЕЕК, при этом сыпучесть материала выросла приблизительно на 25%. Данный эффект связан с резким увеличением скорости кристаллизации РЕЕК при повышенных температурах, что приводит к росту плотности частиц за счет большей упорядоченности структуры кристаллических областей – на кривой ДСК наблюдается увеличение пика кристаллизации. Дальнейший рост продолжительности выдержки или температуры отжига лимитируется появлением признаков деструкции полимера (изменение цвета), что приводит к ухудшению физико-механических свойств изделия.

Важным фактором, влияющим на сыпучесть порошков полимеров, является форма их частиц, шероховатость и наличие дефектов на поверхности. Как видно из приведенных на рис. 3 микрофотографий, РЕЕК производства компании Zypeek состоят в основном из эллиптических частиц различных размеров с небольшой (до 5%) примесью удлинённых вытянутых частиц, которые должны оказывать негативное влияние на сыпучесть композиции. Их выделение из основной фракции полимера или использование порошка без такой примеси должно существенно повысить технологичность материала.

На микрофотографиях также видно, что дефектность поверхности и размеры частиц снижаются после термообработки (рис. 3), что открывает определенные возможности по улучшению технологичности композиций после предварительной подготовки порошков.

В данной работе исследовано влияние влажности порошков РЕЕК на их сыпучесть. Результаты исследования влажности приведены в табл. 4.

Таблица 4

Влажность различных марок полиэфирэфиркетонов фирмы Zypeek (Китай)		
Марка материала	Влажность, %	Остаточная влажность после 3 ч сушки, %
Zypeek 550PF	0,42	0,02
Zypeek 330UPF	0,41	0,02

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сформулировать основные требования к композициям для переработки методом SLS на основе РЕЕК:

- фракционный состав 60–100 мкм (80%);
- частицы преимущественно сферической формы;
- насыпная плотность $\geq 0,35$ г/см³.

Кроме того, необходимо отметить, что большое значение для качественной переработки порошков PEEK методом SLS имеет предварительная подготовка материала – сушка, фракционирование, отжиг и т. п. Проведение предварительной подготовки материала на основании анализа данных его входного контроля позволяет существенно повысить технологичность.

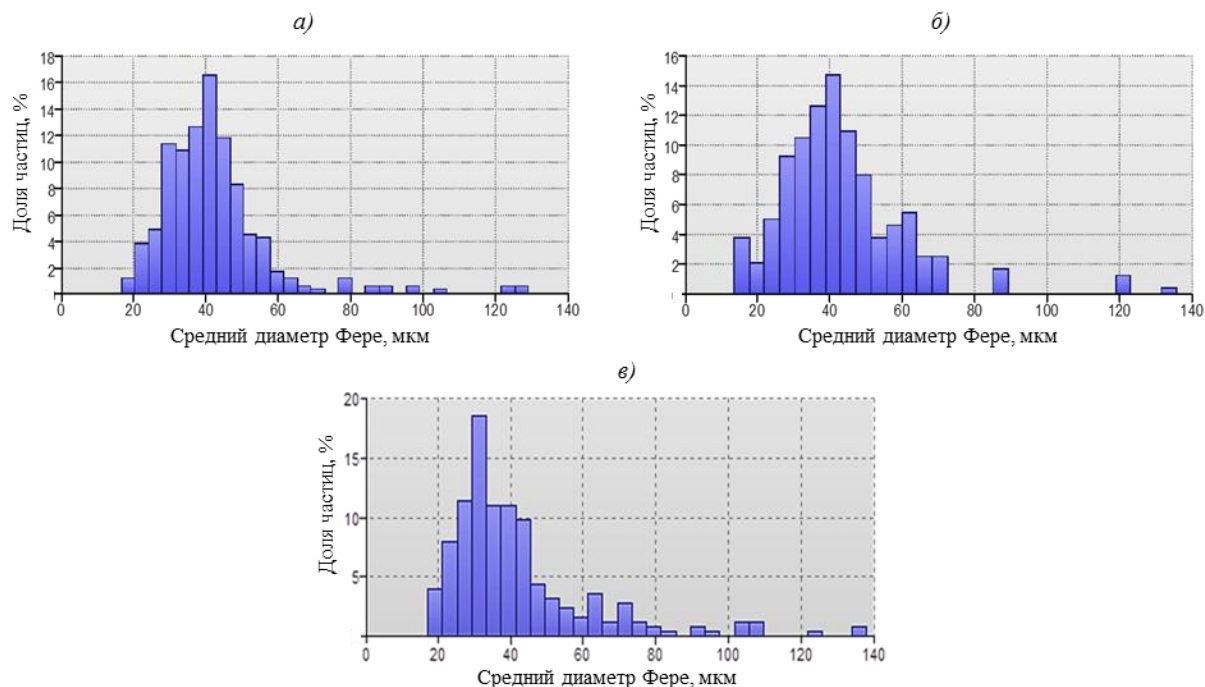


Рис. 5. Гистограммы распределения частиц по размерам порошка полиэфирэфиркетона марки Zureek 550PF до (а) и после (б) измельчения в дробилке и после отжига (е)

В то же время проведенные в работе исследования, направленные на регулирование фракционного состава порошков методом измельчения в дробилках специальной конструкции, показали, что технологии, традиционно используемые для таких порошков термопластов, как полиамид или поливинилхлорид, не позволяют эффективно управлять фракционным составом PEEK из-за его очень высоких физико-механических характеристик. Так, на рис. 5 приведены гистограммы распределения частиц по размерам порошка PEEK марки Zureek 550PF до и после измельчения в роторной дробилке в течение 1 ч при скорости вращения 550 об/мин.

Заключения

Проведена сравнительная оценка импортных PEEK производства Англии и Китая в качестве материалов для аддитивных технологий.

Установлено, что исследованные промышленные марки PEEK импортного производства не могут эффективно перерабатываться методом SLS без предварительной подготовки из-за их недостаточной сыпучести. Эти материалы требуют предварительной подготовки перед переработкой. Полученные для переработки методом послойного наплавления полуфабрикаты обладают значительной разнотолщинностью, что свидетельствует о необходимости совершенствования технологии их изготовления.

Сформулированы основные требования к полуфабрикатам на основе PEEK для SLS- и FDM-методов 3D-печати.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России // *Сб. науч.-информ. материалов*. 3-е изд. М.: ВИАМ. 2015. 720 с.
3. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // *Интеллект и технологии*. 2015. №2 (11). С. 52–55.
4. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. №5. С. 8–18.
5. Bikas H., Stavropoulos P., Chrysosolouris G. Additive manufacturing methods and modeling approaches: a critical review // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 83. P. 389–405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.
6. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Сорокин А.Е., Сапего Ю.А. Современные способы переработки термопластов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2017. №11 (59). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.05.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-7-7.
7. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
8. Николаев А.Ф. Термостойкие полимеры. Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1988. С. 3–11.
9. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 822 с.
10. Головкин Г.С. Технологические свойства термопластичных связующих для армированных пластиков // *Пластические массы*. 2005. №1. С. 35–40.
11. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Старостина И.В. Литые термопласты для изделий авиационной техники // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2016. №6. С. 10–15.
12. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы на их основе. СПб.: Профессия, 2006. С. 33–346.
13. Сорокин А.Е., Афоничева О.В., Краснов А.П. и др. Влияние молекулярной массы и методов переработки на свойства полиарилата ДВ // *Сб. тез. IX симпозиума «Современная химическая физика»*. Туапсе, 2011. С. 156–157.
14. Петрова Г.Н., Старостина И.В., Румянцева Т.В., Сапего Ю.А. Эффективность повышения качества изделий из поликарбоната термообработкой // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2017. №9 (57). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-9-6-6.
15. Тростянская Е.Б., Степанова М.И., Рассохин Г.И. Теплостойкие линейные полимеры. РГАСХМ: Ростов н/Д, 2002. С. 3–22.
16. Киринов Б.С., Мишкин С.И., Тихонов Н.Н., Осипчик В.С. Разработка материалов на основе полимолочной кислоты с улучшенными технологическими свойствами // *Пластические массы*. 2013. №9. С. 61–64.
17. РЕЕК™ – polymer für hohe Beanspruchungen // *Galvanotechnik*. 2004. Vol. 95. No. 3. С. 779.
18. Мажилин П.Ю. Полифениленсульфид в авиационной промышленности // *Полимерные материалы*. 2003. №2. С. 22–24.
19. Un polymère pour applications «haute température» // *Matériaux et Techniques*. 2003. Vol. 91. No. 3–4. P. 52–53.
20. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия, 2008. 199 с.
21. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
22. Buznik V.M., Kablov E.N. Arctic materials science: current state and prospects // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2017. T. 87. No. 5. P. 397–408.
23. Лазарева Т.К., Ермакин С.Н., Костягина В.А. Проблемы создания композиционных материалов на основе конструкционных термопластов // *Успехи в химии химической технологии*. 2010. Т. 24. №4. С. 58–63.

УДК 678.8

М.А. Илюхина¹, Д.Н. Смирнов¹, Я.А. Брык¹

СВОЙСТВА ВУЛКАНИЗАТОВ НА ОСНОВЕ СИЛОКСАНОВЫХ И ТИОКОЛОВЫХ КАУЧУКОВ, НАПОЛНЕННЫХ ДИАТОМИТОМ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-30-37

Проведено исследование физико-механических и технологических свойств опытных композиций на основе кремнийорганических и полисульфидных низкомолекулярных каучуков холодной вулканизации, наполненных диатомитом в сравнении с серийными герметиками. Показана возможность применения диатомита разных марок в составе герметиков. Отмечены преимущества и недостатки данных композиций. Показана возможность расширения области применения герметиков, наполненных диатомитом. Приведены характеристики применяемых диатомитов.

Ключевые слова: силоксановый каучук, тиоколовый каучук, компаунд, герметик, физико-механические свойства, диатомит, наполнитель, вулканизат.

M.A. Ilyukhina¹, D.N. Smirnov¹, Ya.A. Bryk¹

PROPERTIES OF CURED SILICONE AND POLYSULFIDE SEALANT FILLED WITH DIATOMITE

Research of mechanical and technological properties of skilled compositions on the basis of the silicone and polysulfide low-molecular rubbers of cold curing filled with diatomite in comparison with serial sealant. Possibility of application of diatomite of different brands as a part of sealant is shown. Positive tendencies and shortcomings of these compositions are noted. Possibility of expansion of scopes of sealant filled with diatomite is shown. Characteristics of applied diatomites are specified.

Keywords: siloxane rubber, thiokol rubber, compound, sealant, physical-mechanical properties, diatomite, filler, cured stock.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Конструирование принципиально новых авиационных изделий возможно только после внедрения в производство функциональных материалов новых типов, в том числе полимерных. Важным классом полимерных функциональных материалов являются герметизирующие материалы (герметики). Они применяются в самых различных областях техники, во многом обеспечивая работоспособность конструктивных элементов и узлов самолетов, вертолетов, космической техники, топливных отсеков и кессон-баков, водонепроницаемых перегородок, трубопроводов, химических аппаратов и т. п. [1–4].

Известно, что улучшение технических характеристик полимерных материалов может быть достигнуто путем введения в полимерную матрицу добавок специального назначения – наполнителей. Однако, в случае введения активных наполнителей (т. е. ингредиентов, повышающих упругодеформационные свойства), могут возникнуть трудности при переработке полимеров. В этом случае следует добавлять в композицию

так называемые неактивные (инертные) наполнители. Они улучшают технологические характеристики, но в ряде случаев снижают прочностные показатели полимерных композиций. Поэтому для достижения оптимальных свойств наполненных полимеров необходимо грамотно применять наполнители различных типов. Это во многом справедливо и для герметизирующих материалов.

Применение природных минералов, во многом сочетающих свойства активных и инертных наполнителей, является перспективным для модификации полимеров специального назначения.

Для герметизирующих материалов, в том числе и на основе кремнийорганических и полисульфидных низкомолекулярных каучуков, получаемых методом холодной вулканизации, возможна модификация композиций наполнителями, в том числе полученными из природных минералов. Такой подход представляется весьма актуальным. Целью данной работы является проведение комплексных испытаний герметизирующих материалов на основе кремнийорганических и полисульфидных (тиоколовых) каучуков, содержащих функциональные наполнители, полученные из природных минералов, а также установление возможности модификации герметиков наполнителями указанных типов.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.2. «Эластомерные и уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

В качестве перспективных наполнителей для герметизирующих материалов необходимо отметить специально подготовленные наполнители природного происхождения. В качестве такого материала особый интерес представляет диатомит, который используется в различных отраслях промышленности, в том числе химической. Несколько месторождений диатомита расположены на территории России, а это значит, что имеется устойчивая природная сырьевая база. Вместе с тем отсутствуют данные о его применении в рецептурах герметиков и компаундов [5–11].

Диатомит – это минерал природного происхождения из класса опалинов, получаемый путем многостадийного измельчения, фракционирования и сушки природной породы. Диатомит (кизельгур, горная мука, целит) представляет собой механическую смесь остатков водорослей и микроорганизмов. Структура диатомита состоит из рыхлых и слабо агломерированных частиц. Фракционный состав диатомита находится в интервале значений – от 3 до 1 мм. Он может содержать малые дозировки опала глобулярного типа, а также минеральные добавки. Цвет диатомита варьируется от белого до темно-серого или бурого. Темный и бурый цвет диатомита связан с наличием органических примесей, в том числе растительных. Такой большой разброс по цвету позволяет получать материалы различной цветовой гаммы, что немаловажно при разработке герметиков. Основными свойствами диатомита являются: низкая плотность, высокая теплопроводность, химическая стойкость, отсутствие склонности к слипанию и слеживаемости, легкая диспергируемость при обработке на любом смесительном оборудовании. Высушенный тонкомолотый диатомит применяется в качестве наполнителя в целях:

- снижения плотности готовых изделий;
- повышения деформационно-прочностных показателей;
- повышения теплопроводности и температуропроводности;
- снижения стоимости изделий.

В настоящее время диатомит широко применяется в таких отраслях народного хозяйства, как сельское хозяйство, животноводство (кормовая добавка) и агрохимия,

что подтверждает его нетоксичность. Диатомит, полученный на месторождениях Ульяновской области, применяется в качестве осушителей и катализаторов газообразования. Диатомит содержит порядка 80–85% аморфного оксида кремния. В случае преобладания мелкодисперсных частиц диатомит приобретает абразивные свойства. Это дает возможность применять его в полирующих пастах, чистящих и моющих средствах, а также для производства оптического волокна, жидкого стекла, изготовления красок, газобетона, теплоизоляционного кирпича, глазури, в производстве жидких силикатов, строительных тепло- и звукоизоляционных материалов, инсектицидов и других материалов [12, 13].

В данной работе исследованы характеристики композиций, в которых в качестве полимерной основы выбраны силоксановые и тиоколовые каучуки, наполненные диатомитом марок Ц-2, МЦ и NDP-D (производитель – ООО «ПК КВАНТ», который является ведущим производителем диатомита в России) с различными характеристиками. Эти марки диатомита выбраны из общего числа выпускаемых марок (Ц-1, Ц-2, МЦ, ФБ, ФМ, NDP-D и др.), как наиболее полно соответствующие по своим характеристикам, позволяющим получить вулканизаты с пониженной плотностью без снижения физико-механических характеристик, – для применения в составе силоксановых и тиоколовых герметиков [14–20].

Для исследования свойств вулканизатов на основе силоксановых и тиоколовых герметиков, наполненных диатомитом, использовали следующие методы испытаний для определения:

- внешнего вида и механических примесей;
- жизнеспособности многокомпонентных систем;
- условной прочности и относительного удлинения при разрыве;
- кажущейся плотности.

В табл. 1 представлены физико-химические характеристики диатомита марок Ц-2, МЦ и NDP-D.

Таблица 1

Физико-химические характеристики диатомита

Свойства	Значения свойств для диатомита марки			
	Ц-2	МЦ	NDP-D-700	NDP-D-230
Объемная масса, %	290–310	250–280	550–800	200–230
Удельная поверхность, см ² /г	12000–15000	25000–27000	2000–5000	30000–33000
Истинная плотность, кг/м ³	2020	2030	2160	2060

Результаты

В данной работе исследовали композиции, аналогичные по составу серийным силоксановым компаундам и герметикам типа ВИКСИНТ и полисульфидным герметикам, в которых наполнитель в составе компаундов и герметиков полностью заменен на диатомит. Изучено несколько партий диатомита марок Ц-2, МЦ, NDP-D-700 и NDP-D-230, отличающихся по степени дисперсности, удельной поверхности, объемной массе, истинной плотности и другим характеристикам.

Изготовлены опытные композиции, наполненные диатомитом, всех перечисленных марок. Исследованы их технологические и механические характеристики как в исходном состоянии, так и после теплового старения, в сравнении с характеристиками серийных материалов. Отмечено, что диатомит хорошо вводится в полимерную матрицу с получением однородной консистенции без комков и сгустков, при этом опытные

герметизирующие пасты хранятся не менее 1 года без изменения текучести и свойств изготавливаемых из них вулканизатов.

По результатам проведенных исследований выбраны опытные композиции с наиболее высокими показателями, соответствующими уровню показателей серийных компаундов и герметиков, выпускаемых в настоящее время.

Сравнительные характеристики серийного силоксанового компаунда ВИКСИНТ К-68 и двух опытных композиций (на основе низкомолекулярного силоксанового каучука – СКТН), аналогичных ему по составу, наполненных диатомитом марки Ц-2 (образцы: №1 – без прокаливания, №2 – прокаленные), представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические и технологические свойства композиций, наполненных диатомитом марки Ц-2, в исходном состоянии и после хранения герметизирующей пасты в течение 1 года

Свойства	Значения свойств для				
	компаунда ВИКСИНТ К-68 в исходном состоянии и после хранения	опытной композиции			
		1		2	
		СКТН (100 мас. ч.)+ +диатомит Ц-2 №1 (60 мас. ч.)+ +катализатор 68		СКТН (100 мас. ч.)+ +диатомит Ц-2 №2 (60 мас. ч.)+ +катализатор 68	
		в исходном состоянии	после хранения	в исходном состоянии	после хранения
Внешний вид	Вязкотекучая паста			Густая тиксотропная паста	
Жизнеспособность, ч	0,5–6,0	1,0–2,0	1,0–2,0	1,0–2,0	1,0–2,0
Условная прочность при разрыве, МПа	≥1,70	2,03–2,94	2,1–3,2	2,28–3,50	2,25–3,62
Относительное удлинение в момент разрыва, %	≥80	80–100	80–100	40–70	44–70
Плотность вулканизата, г/см ³	1,02–1,10	0,87	0,85–0,87	0,8–0,9	0,82–0,9
Твердость по Шору А, усл. ед.	45–65	60–65	60–67	60–65	62–67

Сравнительные характеристики серийного силоксанового герметика ВИКСИНТ У-10-80 и трех опытных композиций (аналогичных ему по составу), наполненных диатомитом марок Ц-2 и МЦ, представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Физико-механические и технологические свойства композиций в исходном состоянии и после воздействия температуры, наполненных диатомитом марок Ц-2 и МЦ

Свойства		Значения свойств для			
		герметика ВИКСИНТ У-10-80	опытной композиции		
			3	4	5
			СКТН (100 мас. ч.)+ +диатомит Ц-2 №2 (60 мас. ч.)+ +вулканизующие агенты	СКТН (100 мас. ч.)+ +диатомит Ц-2 №3 (60 мас. ч.)+ +вулканизующие агенты	СКТН (100 мас. ч.)+ +диатомит МЦ (60 мас. ч.)+ +вулканизующие агенты
Внешний вид		Вязкотекучая паста	Густая тиксотропная паста		Вязкотекучая паста
Жизнеспособность, ч		2,0–8,0	3,0–5,0	6,5–9,0	4,0–6,0
Условная прочность при разрыве, МПа		≥1,80	1,92–2,38	2,60–2,71	2,46–2,63
Относительное удлинение в момент разрыва, %		≥160	160–200	220–240	280–300
Плотность вулканизата, г/см ³		1,97	0,8–0,9	1,23	1,28
Твердость по Шору А, усл. ед. (эластичность)	в исходном состоянии	≥35	40–45	40–42	40–45
	после выдержки при 350°C в течение 3 ч без воздуха	≥18 (эластичный)	25–30 (эластичный)	28–30 (эластичный, немного потрескался)	15–18 (эластичный)

Таблица 4

Физико-механические и технологические свойства композиций в исходном состоянии и после воздействия температуры, наполненных диатомитом марок Ц-2 и МЦ, после хранения герметизирующей пасты в течение 1 года

Свойства		Значения свойств для			
		герметика ВИКСИНТ У-10-80	опытной композиции		
			3	4	5
			СКТН (100 мас. ч.)+ +диатомит Ц-2 №2 (60 мас. ч.)+ +вулканизирующие агенты	СКТН (100 мас. ч.)+ +диатомит Ц-2 №3 (60 мас. ч.)+ +вулканизирующие агенты	СКТН (100 мас. ч.)+ +диатомит МЦ (60 мас. ч.)+ +вулканизирующие агенты
Внешний вид		Вязкотекучая паста	Густая тиксотропная паста		Вязкотекучая паста
Жизнеспособность, ч		2,0–8,0	2,5–5,0	6,0–8,0	3,5–6,0
Условная прочность при разрыве, МПа		≥1,80	2,0–2,4	2,6–2,75	2,5–2,6
Относительное удлинение в момент разрыва, %		≥160	160–200	220–240	280–300
Плотность вулканизата, г/см ³		1,97	0,8–0,9	1,2–1,25	1,25–1,28
Твердость по Шору А, усл. ед. (эластичность)	в исходном состоянии	≥35	40–45	40–45	40–47
	после выдержи при 350°C в течение 3 ч без воздуха	≥18 (эластичный)	25–30 (эластичный)	28–30 (эластичный, немного потрескался)	15–20 (эластичный)

Проведенные исследования показали, что жизнеспособность, механические и технологические свойства опытных композиций, наполненных диатомитом, находятся на требуемом для компаундов и силиконовых герметиков уровне. Прочностные показатели опытных силиконовых композиций превышают требования Технических условий на серийные компаунды и герметики типа ВИКСИНТ – в 1,5–2 раза. Наблюдается также значительное снижение плотности (с 40 до 65%) полученных вулканизатов по сравнению с серийными материалами при той же степени наполнения, что немаловажно при применении данных материалов в составе различных летательных конструкций.

Использование диатомита в составе полисульфидных герметиков выбрано по нескольким причинам: во-первых, он обладает диэлектрическими свойствами, во-вторых, низкой стоимостью, в-третьих, диатомит имеет низкую насыпную плотность – его плотность в среднем составляет 0,5–0,7 г/см³, что может привести к снижению плотности герметика.

В данной работе исследованы три экспериментальные композиции полисульфидных герметиков, наполненных диатомитом с разной удельной поверхностью, – это марки NDP-D-230 и NDP-D-700.

Составы герметизирующих паст приведены в табл. 5.

Таблица 5

Состав герметизирующих паст

Компонент	Содержание опытной композиции, мас. ч.		
	6	7	8
Тиокол II-НТ	100,0	100,0	100,0
Диатомит NDP-D-230	30,0	–	30,0
Диатомит NDP-D-700	–	30,0	20,0
Раствор фенолформальдегидной смолы	5,2	5,2	7,5

В качестве вулканизирующей системы использована вулканизирующая паста, содержащая бихромат натрия промышленного производства и ускоритель вулканизации – дифенилгуанидин.

Соотношение компонентов для всех трех опытных композиций герметизирующих паст при изготовлении полисульфидного герметика приведено в табл. 6.

Таблица 6

**Соотношение компонентов опытных композиций полисульфидных герметиков
для изготовления образцов**

Компонент	Содержание компонента, мас. ч.
Герметизирующая паста (опытные композиции 6, 7, 8)	100,0
Вулканизирующая паста	12,0
Дифенилгуанидин	0,4

Из полученных опытных композиций полисульфидных герметиков изготовлены образцы для определения механических и диэлектрических свойств. Кроме того, приведено сравнение с серийными полисульфидными герметиками ВИТЭФ-1НТ (ТУ1-595-28-708–2003) и УТ-32НТ (ТУ1-595-28-912–2000). Полученные результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7

**Механические и диэлектрические свойства полисульфидных герметиков
в исходном состоянии**

Свойства	Значения свойств* для				
	герметика		опытной композиции		
	ВИТЭФ-1НТ	УТ-32НТ	6	7	8
Условная прочность в момент разрыва, МПа	<u>2,6–2,8</u> 2,7	<u>2,3–2,5</u> 2,4	<u>1,4–1,8</u> 1,6	<u>1,5–1,9</u> 1,7	<u>1,8–2,1</u> 2
Относительное удлинение в момент разрыва, %	<u>210–300</u> 255	<u>380–420</u> 400	<u>180–210</u> 195	<u>130–150</u> 140	<u>80–110</u> 95
Относительная остаточная деформация после разрыва, %	0	0	<u>2–10</u> 6	<u>2–7</u> 5	0
Прочность связи при отслаивании герметика от алюминиевого анодированного сплава Д16-АТ, кН/м	<u>3,4–3,6</u> 3,5	<u>3,7–3,9</u> 3,8	<u>2,0–2,2</u> 2,1	<u>1,9–2,0</u> 2,0	<u>2,2–2,4</u> 2,3
Характер отслаивания герметика от алюминиевого анодированного сплава Д16-АТ по ГОСТ 21981–76	Отслаивание по поверхности «сетка–герметик» (СГ)		Отслаивание по поверхности «герметик–подложка» (ГМ)		
Твердость герметика по Шору А, усл. ед. (не менее)	<u>40–45</u> 43	<u>41–47</u> 44	<u>48–53</u> 51	<u>56–63</u> 60	<u>52–58</u> 55
Удельное объемное электросопротивление ρ_v , Ом·см	$8,9 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$0,9 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{11}$
Удельное электросопротивление ρ_s , Ом·см	$1,5 \cdot 10^{12}$	$2,9 \cdot 10^{12}$	$2,1 \cdot 10^{12}$	$2,3 \cdot 10^{12}$	$2,9 \cdot 10^{12}$

* В числителе – минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние.

Проведенные исследования показали, что благодаря введению большого количества диатомита удается на один порядок повысить удельное объемное электросопротивление герметика, однако при этом механические и адгезионные свойства ухудшаются.

Обсуждение и заключения

Проведено опробование диатомита в составе герметизирующих материалов. Показана возможность применения диатомита в качестве наполнителя в рецептурах силиконовых компаундов и герметиков.

Показано, что время жизнеспособности опытных композиций силиконовых герметиков, наполненных диатомитом, соответствует требованиям работы с компаундами и герметиками; однако следует отметить, что серийные материалы имеют больший разброс по времени жизнеспособности, что немаловажно при нанесении этих материалов на поверхности с большой площадью.

Механические свойства вулканизатов опытных образцов, наполненных диатомитом, в исходном состоянии находятся на высоком уровне и соответствуют требованиям по уровню условной прочности, относительному удлинению, твердости и плотности, предъявляемым к компаундам и герметикам типа ВИКСИНТ.

Отмечено снижение плотности вулканизатов опытных образцов, наполненных диатомитом, в 1,15–1,35 раза по сравнению с серийными компаундами и в 1,5–2,5 раза по сравнению с серийными герметиками типа ВИКСИНТ.

Герметизирующие пасты опытных композиций на основе силиконовых каучуков обладают консистенцией от вязкотекучей до тиксотропной, что позволяет расширять границы их применения и использовать данные материалы как для заливки зазоров, так и для обволакивания различных поверхностей.

Показана принципиальная возможность применения диатомита в рецептуре тиоколовых герметиков. Применение диатомита в качестве наполнителя тиоколов, позволяет повысить диэлектрические свойства вулканизатов, однако такие герметики обладают слишком высокой вязкостью и не технологичны при нанесении. Тиоколовые герметики, наполненные диатомитом, обладают низкой адгезией к алюминиевому сплаву Д16-АТ в сравнении с серийными герметиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
4. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S1. С. 3–9.
5. Шарова И.А., Петрова А.П. Обзор по материалам международной конференции по клеям и герметикам (WAC-2012, Франция) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. 2013. №8. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2018).
6. Низковязкая силиконовая композиция: патент 2356117 Рос. Федерация; заяв. 20.06.07; опубл. 20.05.09.
7. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. №11. С. 2–16.
8. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал*. 2013. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2018).
9. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник Российской академии наук*. 2012. №6. Т. 82. С. 520–530.
10. Гладков С.А. Состояние сырьевой базы и возможное будущее отрасли производства герметиков и клеев // *Тез. докл. Междунар. науч.-технич. конф. «Современные достижения в области клеев и герметиков. Материалы, сырье, технологии»*. 2013. Дзержинск. С. 6.
11. Велиев М.Г., Шатинова М.И., Ибрагимова А.И. Получение термостойких и адгезионных композиционных материалов на основе кремнийорганических оксидов // *Тез. докл.*

- Междунар. науч.-технич. конф. «Современные достижения в области клеев и герметиков. Материалы, сырье, технологии». 2013. Дзержинск. С. 14.
12. Логанина В.И. Теплоизоляционные сухие строительные смеси с применением модифицированного диатомита // Современные научные исследования и инновации. 2014. №10. С. 2.
 13. Митрошин И.А. Теплоизоляционные материалы на основе диатомита: автореф. ... канд. техн. наук. Саранск, 2007. С. 2–4.
 14. Кравченко И.Н., Мясников А.В., Клименко А.А. и др. Обоснование выбора герметиков для изоляции неподвижных фланцевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №8. С. 7–12.
 15. Нефедов Н.И., Семенова Л.В. Тенденции развития в области конформных покрытий для влагозащиты и электроизоляции плат печатного монтажа и элементов радиоэлектронной аппаратуры // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 50–52.
 16. Чайкун А.М., Наумов И.С., Елисеев О.А. Фторсилоксановые резины: некоторые аспекты применения // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 35–36.
 17. Елисеев О.А., Наумов И.С., Смирнов Д.Н., Брык Я.А. Резины, герметики и огне-теплозащитные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 437–451. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-437-451.
 18. Думанский А.М., Неповинных В.И., Русин М.Ю., Терехин А.В. Оценка предельного состояния герметиков в конструкциях летательных аппаратов // Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №2. С. 31–38.
 19. Дементьева Л.А., Серезенков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Свойства и назначение композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал. 2014. №8. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-6-6.
 20. Романов С.В., Панов К.А., Тимакова К.А. Полимочевины – новый перспективный класс связующих для клеев, герметиков, покрытий // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №1. С. 2–8.

УДК 678.8

А.А. Евдокимов¹, И.Н. Гуляев¹, И.В. Зеленина¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И МИКРОСТРУКТУРЫ ОБЪЕМНО-АРМИРОВАННОГО УГЛЕПЛАСТИКА

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-38-47

Исследованы зависимости физико-механических свойств углепластика, изготовленного с применением объемно-армированной преформы, от вида плетения волокон в преформе. Показано, что углепластик, полученный на основе преформ ортогональной структуры, обладает лучшими характеристиками, чем углепластик, полученный на основе преформ сатиновой структуры армирования. Приведены микрофотографии полученных углепластиков и микрофотографии отдельных филаментов используемого углеродного волокна. Даны рекомендации по улучшению значений физико-механических характеристик исследуемых материалов.

Ключевые слова: углепластик, объемно-армированная преформа, физико-механические характеристики, филамент.

A.A. Evdokimov¹, I.N. Gulyaev¹, I.V. Zelenina¹

INVESTIGATION OF THE PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF VOLUME-REINFORCED CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC

Devoted to the study of the dependence of the physicomechanical properties of carbon-fiber reinforced plastic made using volume-reinforced preform on the type of weaving of fibers in the preform. It is shown that carbon fiber reinforced plastic obtained on the basis of the preforms of the orthogonal structure has better characteristics than carbon fiber reinforced plastic obtained on the basis of the preforms of the satin reinforcement structure. Micrographs of the obtained carbon fiber reinforced plastic and micrographs of individual filaments of carbon fiber used are shown. Recommendations are given to improve the values of the physicomechanical characteristics of the materials under study.

Keywords: carbon-fiber reinforced plastic, volume-reinforced preform, physicomechanical characteristics, filament.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время в иностранных компаниях наметился тренд на изготовление ответственных деталей авиационного назначения из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с применением объемно-армированных цельнотканых преформ – углеродных и стеклянных [1–3]. В первую очередь речь идет об использовании цельнотканых объемных преформ для изготовления лопаток вентилятора авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), что вполне успешно решено консорциумом General Electric и Snecma для двигателя LEAP-X [4, 5]. В отличие от лопатки, изготовленной для двигателя GE90 методом ручной выкладки препрега и автоклавным формованием, которая подвержена расслоению и имеет низкую стойкость к ударным нагрузкам и усталостному разрушению, лопатка, выполненная на основе объемной тканой преформы, обладает более высокими механическими свойствами по толщине (в гораздо

меньшей степени подвержена расслоению) и лучшими прочностными свойствами при попадании в нее посторонних предметов [6, 7].

Отечественная промышленность также осваивает технологию изготовления изделий авиационного назначения из ПКМ с применением цельнотканых преформ [8–11]. Так, во ФГУП «ВИАМ» в настоящее время проводится работа по изготовлению рабочего колеса центробежного компрессора (РКЦК) из ПКМ с температурой эксплуатации до 300°C, с лопаточными элементами на основе объемно-армированной тканой преформы для применения в конструкции перспективного вертолетного двигателя. Для обеспечения необходимого КПД вертолетного двигателя, РКЦК, согласно проведенным газодинамическим расчетам, должно выдерживать >40000 об/мин, что налагает особые требования к прочностным характеристикам материала и конструкции лопаточного элемента в целом. Прежде всего, материал должен обладать сравнительно высокими характеристиками при 20°C при растяжении ($\sigma_b \geq 400$ МПа, $E_b \geq 50$ ГПа) и сдвиге в плоскости листа ($\tau_{12} \geq 45$ МПа, $G_{12} \geq 4$ ГПа). При этом изготовление лопаточных элементов должно производиться из углеродных волокон подходящей прочности и жесткости.

Подобную работу по изготовлению РКЦК из углепластика проводили во ФГУП «ВИАМ» в 2013–2014 годах [12]. Разработанная технология изготовления лопаточного элемента предусматривала ручную выкладку тканого наполнителя в пресс-форму с образованием заготовки, на которую помещают расчетное количество связующего, после чего пресс-форму герметично закрывают, производят нагрев и пропитку углеродного наполнителя связующим. После проведения пропитки и формования полученный лопаточный элемент извлекают из пресс-формы. Сложность изготовления лопаточного элемента заключается в том, что сборку заготовки лопаточного элемента производят из выкроек углеродной ткани, сделанных в соответствии с картой раскроя габаритом от 2 до 15 см² и скрепленных между собой аэрозольным клеящим составом. С учетом малых размеров выкроек, сборка заготовки представляет собой довольно кропотливый и трудоемкий процесс ручной выкладки, что ведет к увеличению себестоимости изготовления лопаточного элемента и РКЦК в целом. Еще одним негативным аспектом этой технологии является необходимость применения аэрозольного клея, имеющего достаточно низкую температуру деструкции, что приводит к повышенной пористости при формовании лопаточного элемента.

В данной работе предложено избежать сложностей изготовления, выявленных в работе [12], путем применения тканой углеродной преформы. Технологический процесс изготовления лопаточного элемента существенно упрощается за счет исключения трудоемких операций его предварительного раскроя и сборки и заключается: в укладке углеродной преформы в пресс-форму, добавлении связующего, пропитке и формовании с последующей термообработкой извлеченного из пресс-формы лопаточного элемента.

Материалы и методы

Для решения задачи обеспечения рабочей температуры эксплуатации конструкции до 300°C, при разработке материала использовано порошковое фталонитрильное связующее марки ВСН-31, способное обеспечить температуру эксплуатации углепластика не ниже 320–350°C и хорошо зарекомендовавшее себя ранее [13–16].

Для обеспечения предъявляемых к материалу физико-механических характеристик должны использоваться углеродные волокна с прочностью при растяжении не менее 4500 МПа и модулем упругости при растяжении не менее 200 ГПа. Таким требованиям отвечают, прежде всего, среднемодульные углеродные жгуты ($\sigma_b \geq 5200$ МПа, $E_b \geq 250$ ГПа, $\varepsilon \approx 1,9\%$) фирмы Togaу марки Т800НВ и фирмы Zhangfu марки SYT-55S. Жесткость конструкции РКЦК во многом зависит от модуля упругости при растяжении углеродного жгута, из которого изготовлена преформа [17, 18]. Поэтому важной задачей являлся выбор оптимальной структуры преформы, которая позволит без нарушения

целостности используемых углеродных волокон и с максимальной реализацией их упруго-прочностных свойств изготавливать материал с заданными характеристиками. Для разработки углепластика выбрали углеродный жгут марки Т800НВ номиналом 12К.

При разработке углепластика исследованы две основные технологии:

- изготовление объемно-армированных тканых преформ для формования углепластика на их основе;
- изготовление углепластика на основе объемно-армированных преформ и связующего ВСН-31 – пропитка и формование.

Разработку технологии изготовления преформ производили на челночном ткацком станке в АО «ТРИ-Д». Процесс изготовления был затруднен в связи с обрывностью основных нитей на катушках и расщеплением углеродных нитей (жгутов) на уточных шпулях в челноке. Для уменьшения расщепления и повышения технологичности переработки углеродных жгутов на текстильном оборудовании, на них наносили аппрет на основе водной эмульсии с добавлением поверхностно-активных веществ и кислот. В результате линейная плотность жгутов увеличилась с 453 (массовая доля аппрета 1,13%) до 466 текс при содержании аппрета 3,4%. Жгуты с нанесенным аппретом более технологичны и лучше перерабатываются, так как отсутствовало расслоение на элементарные волокна и в процессе ткачества разрушения основных и уточных нитей практически не наблюдалось.

Для изготовления преформ выбраны два вида переплетения – ортогональное и сатиновое. Ортогональное переплетение характеризуется прямолинейным расположением основной каркасной и уточных нитей, что позволяет увеличить степень реализации прочности углеродных жгутов в ПКМ. Соединение всех слоев осуществляется основной перевязочной нитью через все слои (рис. 1, а).

При изготовлении объемно-армированных тканых полотен сатинового переплетения в соединении слоев участвуют все нити основы и отсутствует вертикальная система армирования, но при этом вся продольная система находится в изогнутом состоянии (рис. 1, б) – такой вид переплетения обладает максимальной подвижностью.

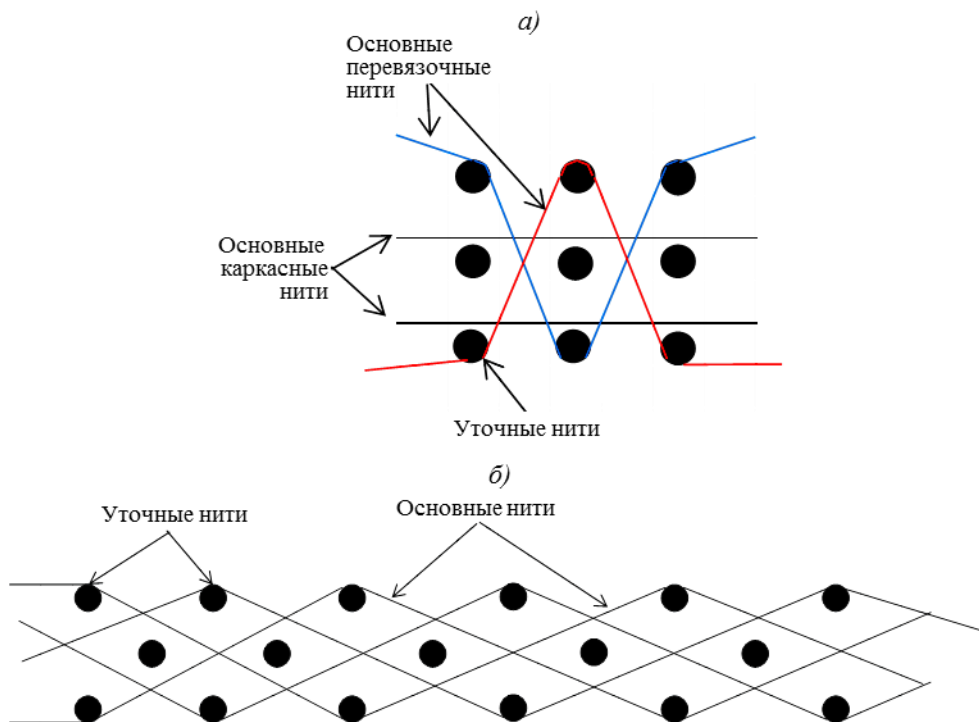


Рис. 1. Схема переплетения преформы – ортогональное (а) и сатиновое (б)

Основные характеристики преформ ортогонального и сатинового плетения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики преформ ортогонального и сатинового плетения

Показатели	Значения показателей для типа плетения	
	ортогонального	сатинового
Толщина преформы при удельной нагрузке 1 кН/м ² , мм	3,31	3,32
Количество каркасных слоев основы	6	8
Количество нитей каркасной основы в слое, нитей/100 мм	30	30
Общее количество нитей каркасной основы, нитей/100 мм	180	240
Общее количество нитей перевязочной основы, нитей/100 мм	30	—
Количество слоев по утку	7	4
Количество уточных нитей в слое, нитей/100 мм	44	51
Общее количество уточных нитей, нитей/100 мм	308	204

Технология изготовления углепластика методом вакуумной пропитки подразумевает формирование пакета-заготовки, состоящего из углеродной преформы и порошкового связующего (в количестве 0,9:1 по массе преформы), размещенного под преформой при повышенной температуре под вакуумом. Пакет-заготовка помещается в термошкаф и нагревается до температуры перехода связующего в расплавное состояние в соответствии с кривой, представленной на рис. 2. При переходе связующего в вязкотекучее состояние изменяются реологические свойства, благодаря чему под действием вакуума в пакете-заготовке происходит пропитка углеродной преформы связующим. Далее процесс изготовления углепластика производится с повышением температуры и давления по ступенчатому режиму.

При разработке технологии пропитки и формования углепластика на основе объемно-армированных преформ и связующего ВСН-31 за основу взята кривая изотермической вязкости связующего ВСН-31 при температуре плавления 200°C (рис. 2). Установлено, что вязкость связующего не меняется (до 2,5 Па·с) в течение 45–50 мин, включая пропитку, однако после 50 мин вязкость начинает активно расти. Таким образом, имеется технологическое окно в 45 мин, в течение которых должны быть проведены стадии пропитки и формообразования.

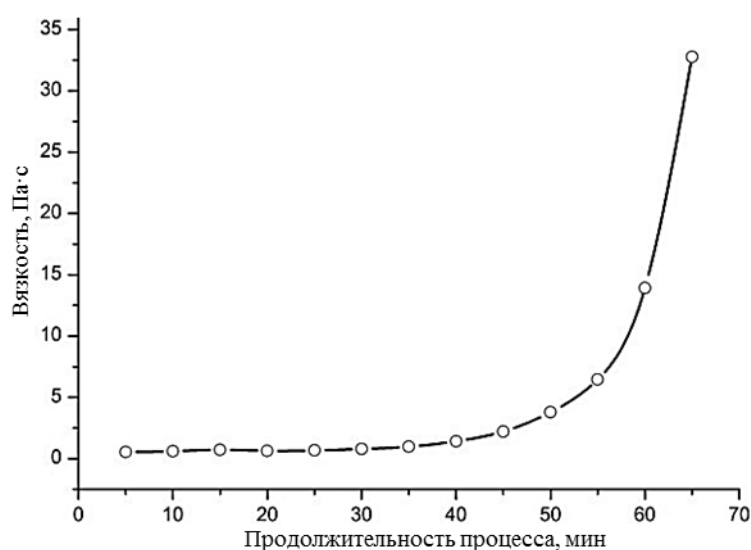


Рис. 2. Изотермическая вязкость связующего ВСН-31 при температуре 200°C

Для уточнения времени подачи давления на термоаналитическом модуле установки МТ методом термомеханического анализа определено время гелеобразования связующего ВСН-31 в присутствии аппретированного волокна из преформы.

Физико-механические характеристики углепластиков исследовали по следующим стандартам: ГОСТ 25.601–80, ГОСТ 25.604–82, ASTM D5379, ASTM D6641-14, ГОСТ 15139–80.

Микрофотографии образцов сделаны с помощью оптического электронного микроскопа Olympus BX51 с увеличением до 100 раз.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 приведены сравнительные термомеханические кривые времени гелеобразования связующего ВСН-31 в присутствии углеродного жгута марки Т800НВ номиналом 12К из углеродной ткани УТ-900И со стандартным эпоксидным замасливателем (0,8–1,15%) и из преформы с аппретом, нанесенным для обеспечения ткачества, в количестве 3–3,5%.

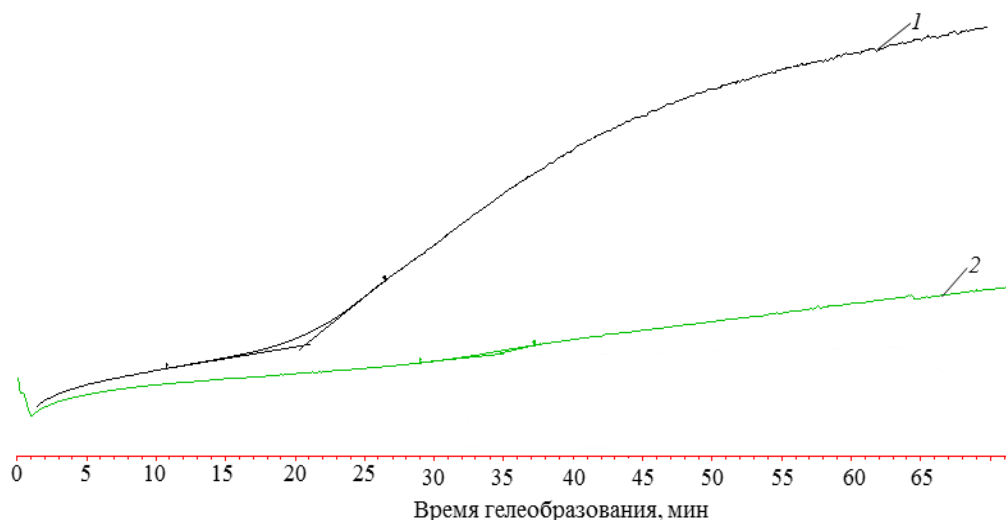


Рис. 3 Время гелеобразования связующего ВСН-31 на жгутах Т800НВ номиналом 12К из ткани УТ-900И (1) и из преформы (2)

Из приведенных данных видно, что время гелеобразования при температуре 200°C в присутствии углеродного жгута Т800НВ номиналом 12К из преформы с аппретом (кривая 2) сокращается с 35 мин (жгут из ткани УТ-900И – кривая 1) до 20 мин, что сокращает время подачи давления, при этом вязкость связующего возрастает достаточно резко, тогда как при использовании жгута Т800НВ из ткани УТ-900И увеличение вязкости происходит плавно. Все это сужает технологическое окно при подаче давления и негативно сказывается на процессе формования материала, а в дальнейшем и на свойствах углепластика.

На основе объемно-армированных преформ сатинового и ортогонального типа переплетения изготовлены плиты углепластиков. Из полученных плит вырезаны образцы и исследованы их физические и упруго-прочностные свойства. В табл. 2 приведены физические свойства углепластиков.

Таблица 2

Физические свойства образцов из углепластика на основе преформ различной структуры из углеродного жгута Т800НВ номиналом 12К и связующего марки ВСН-31

Свойства	Значения свойств для углепластика из преформы с переплетением	
	ортогональным	сатиновым
Плотность, г/см ³	1,563–1,584	1,571–1,593
Пористость, %	2,0–2,15	1,35–1,40
Содержание связующего, %	33–35	32,5–36,0
Толщина преформы при удельной нагрузке 1 кН/м ² , мм	3,31	3,32
Толщина углепластика, мм	2,38–2,45	2,0–2,15
Степень упрессовки, %	25,9–29	32–36

У углепластиков из преформ приблизительно равной толщины различного плетения, изготовленных при одинаковом удельном давлении формования, наблюдается разная степень упрессовки, приводящая к различной толщине получаемого углепластика. Толщина образцов из углепластика, полученного из преформы сатинового плетения, составляет 2,0–2,15 мм при степени упрессовки 32–36%, а толщина образцов из углепластика, полученного из преформы ортогонального плетения, составляет 2,38–2,45 мм при степени упрессовки 26–29%.

Такая разница в степени упрессовки объясняется большей подвижностью сатиновой структуры армирования за счет отсутствия армирующих перевязочных нитей в структуре, что видно и на микрофотографиях образцов из углепластиков с увеличением в 20 раз (рис. 4 и 5).

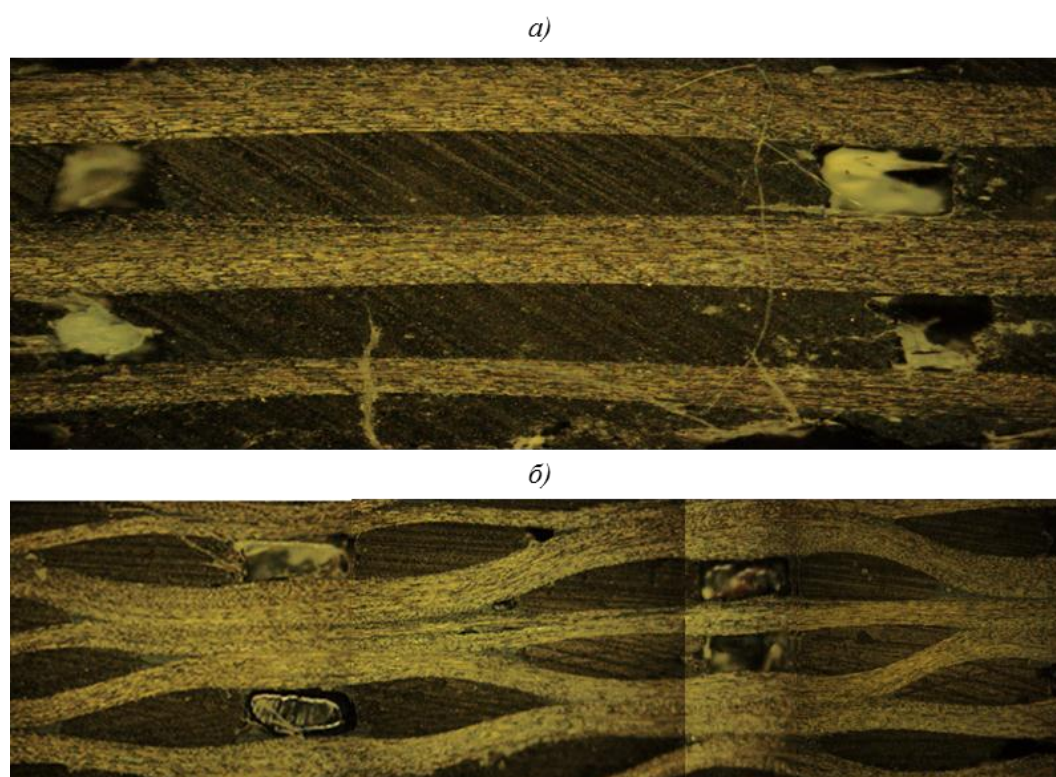


Рис. 4. Микрофотографии образцов из углепластика с ортогональной структурой армирования:
а – фрагмент расположения уточных нитей; *б* – фрагмент расположения основных нитей

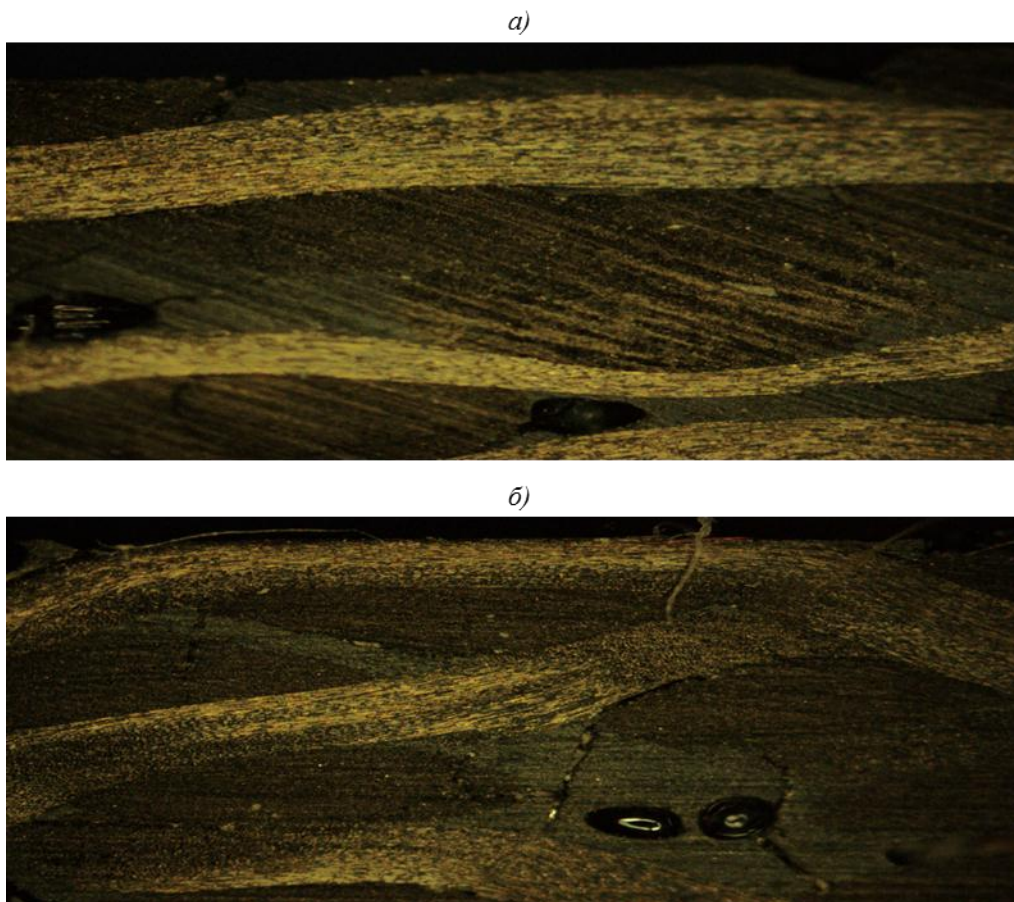


Рис. 5. Микрофотографии образцов из углепластика с сатиновой структурой армирования:
а – фрагмент расположения уточных нитей; *б* – фрагмент расположения основных нитей

Результаты физико-механических испытаний при температуре 20°C образцов из углепластиков на основе преформ различной структуры из углеродного жгута Т800НВ номиналом 12К и связующего марки ВСН-31 в направлении приложения нагрузки [0°] и [90°] представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты физико-механических испытаний образцов из углепластиков на основе преформ различной структуры из углеродного жгута Т800НВ номиналом 12К и связующего марки ВСН-31 в направлении приложения нагрузки [0°] и [90°]

Свойства	Значения свойств для углепластика из преформы с переплетением			
	ортогональным		сатиновым	
	[0°]	[90°]	[0°]	[90°]
Прочность при растяжении, МПа	450	510	190	415
Модуль упругости при растяжении, ГПа	73	73	23	69
Прочность при сжатии, МПа	340	305	80	220
Прочность при изгибе, МПа	445	450	385	210
Модуль упругости при изгибе, ГПа	54	36	50	83
Прочность при сдвиге в плоскости листа, МПа	70	64	47	49
Модуль упругости при сдвиге в плоскости листа, ГПа	4,2	4,5	4,2	4,7

Полученные результаты физико-механических испытаний показывают на то, что углепластики, полученные на основе преформ ортогональной структуры, обладают лучшими характеристиками, чем углепластики, полученные на основе преформ сатиновой структуры армирования.

Представляет интерес также оценка влияния количества волокон в слое материала на получаемые физико-механические свойства. Так, можно наблюдать весьма незначительную разницу значений физико-механических свойств у образцов ортогональной структуры при приложении нагрузки в направлениях $[0^\circ]$ и $[90^\circ]$. Это обусловлено практически одинаковым количеством углеродных жгутов каркасных слоев основы (6 шт.) и количеством слоев по утку (7 шт.). Исключением может быть значение модуля упругости при изгибе: 54 ГПа в направлении $[0^\circ]$ и 36 ГПа в направлении $[90^\circ]$. Это можно объяснить тем, что в процессе ткачества уточные нити располагаются по ширине преформы без перегиба, в то время как основная нить имеет изогнутую ориентацию.

Подобная особенность структуры прослеживается и на образцах сатинового типа армирования. Образцы, испытанные в направлении $[90^\circ]$, показали лучшие значения, чем образцы, испытанные в направлении $[0^\circ]$. При данной структуре армирования по основе располагается восемь нитей, а по утку – четыре нити. Однако все нити основы имеют изогнутую ориентацию по направлению приложения нагрузки, в то время как уточные нити расположены без перегибов и полностью включены в работу ПКМ. Исключением является показатель прочности при изгибе: 385 МПа в направлении $[0^\circ]$ и 210 МПа в направлении $[90^\circ]$. Это можно объяснить тем, что структура сатинового плетения обеспечивает максимальную подвижность ПКМ. Более частое расположение уточных нитей по сравнению с ортогональной структурой (51 шт. – в сатиновой и 44 шт. – в ортогональной структуре) объясняет также лучшие показатели модуля упругости при изгибе и сдвиге в плоскости листа в направлении $[90^\circ]$.

На микрофотографиях углепластика с ортогональной структурой видна достаточно четкая периодичность расположения волокон в композиционном материале. Наблюдается большая подвижность у волокон по основе. При этом волокна по утку не склонны к изменению своей пространственной ориентации в углепластике и остаются достаточно жесткими. На микрофотографиях углепластика с сатиновой структурой можно наблюдать большую подвижность волокон утка по сравнению с аналогичными волокнами в ортогональной структуре. В то же время наблюдается периодичность расположения основных волокон в объеме материала и их большая подвижность.

На всех микрофотографиях наблюдаются поры в объеме углепластика в около-волоконном пространстве, которые ухудшают физико-механические характеристики материала. Для исследования причин образования данного рода дефектов сделаны микрофотографии отдельных филаментов углеродного жгута (рис. 6).

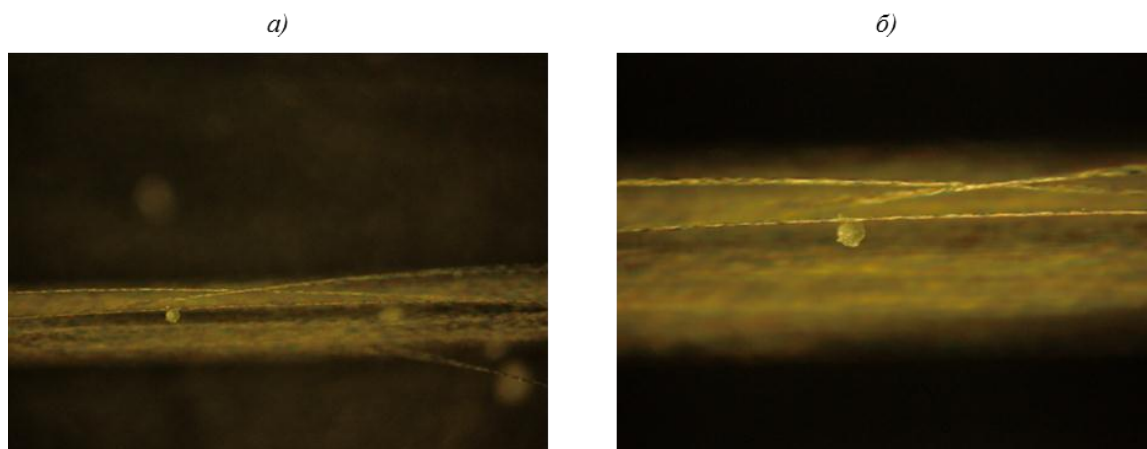


Рис. 6. Микрофотографии (а – $\times 50$; б – $\times 100$) филаментов углеродного жгута

На микрофотографии филаментов углеродного жгута отчетливо видны капли аппретирующего состава. Очевидно, что аппрет на поверхность волокна нанесен в избыточном количестве. Однако проконтролировать процесс нанесения состава при аппретировании волокон не представляется возможным в связи с тем, что технология подразумевает пропускание углеродного жгута через ванну с аппретирующим составом с последующей просушкой волокна. Определен температурный интервал деструкции аппрета, составляющий 275–350°C, с максимумом при температуре 302,8°C. Поскольку гелеобразование и начало отверждения связующего ВСН-31 происходит при более низких температурах (200–230°C), то к началу деструкции аппрета при температуре 275°C успевает сформироваться отвержденное связующее, что приводит к образованию в околотовоночном пространстве на месте капель пор, образованных продуктами деструкции аппрета. Таким образом, аппрет, наносимый на жгут при изготовлении преформ, негативно влияет на структуру и свойства углепластиков.

Заключения

При проведении работы разработан углепластик на основе объемно-армированной углеродной преформы и исследованы его свойства. В результате исследования физико-механических характеристик установлено, что углепластик на основе преформы ортогонального типа плетения обладает лучшими свойствами по сравнению с углепластиком на основе преформы сатинового типа плетения, а следовательно, углепластик на основе преформы ортогонального типа плетения будет использован для изготовления лопаточных элементов РКЦК.

Для обеспечения максимальной прочности конструкции из разработанного углепластика следует каким-либо способом удалить излишки аппретирующего состава с поверхности углеродных жгутов – либо путем термической деструкции аппрета, либо вымыванием аппретирующего состава растворителем с последующей сушкой углеродного волокна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // *Защита и безопасность*. 2014. №4. С. 28–29.
4. Mohamed M.H., Bogdanovich A.E. Comparative analysis of different 3D weaving processes, machines and products // *ICCM 17, 3D Textiles & Composites*. Edinburgh, 2009.
5. McClain M., Goering J. Overview of Recent Developments in 3D Structures // *ICCM 17, 3D Textiles & Composites*. Edinburgh, 2009.
6. Lomov S.V., Ivanov D.S., Perie G., Verpoest I. Modelling 3D-fabrics and 3D-reinforced Composites // *Challenges and Solutions: World Conference on 3D-fabrics*. Manchester, 2008.
7. Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хилон П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А. Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №9. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-9-10-10.
8. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е., Донецкий К.И. Применение плетеных преформ для полимерных композиционных материалов в гражданских отраслях промышленности (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2015. №1. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-5-5.

9. Донецкий К.И., Хрульков А.В., Коган Д.И., Белинис П.Г., Лукьяненко Ю.В. Применение объемно-армирующих преформ при изготовлении изделий из ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №1. С. 35–39.
10. Композитная лопатка вентилятора с многослойным армирующим материалом: пат. 2384749 Рос. Федерация. №2008144475/06; заявл. 11.11.08; опубл. 20.03.10.
11. Каримбаев Т.Д., Луппов А.А., Афанасьев Д.В. Рабочие лопатки вентиляторов для перспективных двигателей // *Двигатель*. 2011. №6. С. 2–10.
12. Зеленина И.В., Гуляев И.Н., Кучеровский А.И., Мухаметов Р.Р. Термостойкие углепластики для рабочего колеса центробежного компрессора // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №2 (38). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-8-8.
13. Железняк В.Г., Мухаметов Р.Р., Чурсова Л.В. Исследование возможности создания термореактивного связующего на рабочую температуру до 400°C // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S2. С. 58–61.
14. Шимкин А.А., Пономаренко С.А., Мухаметов Р.Р. Исследование процесса отверждения дифталонитрильного связующего // *Журнал прикладной химии*. 2016. Т. 89. №2. С. 256–264.
15. Гусева М.А. Циановые эфиры – перспективные термореактивные связующие (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-45-50.
16. Валедин Е.О., Зеленина И.В., Мараховский П.С., Гуляев А.И., Бухаров С.В. Исследование влияния тепловлажностного воздействия на фталонитрильную матрицу // *Материаловедение*. 2015. №9. С.15–19.
17. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
18. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.

УДК 678.8

А.Э. Рахматуллин¹, В.И. Постнов¹, С.В. Стрельников¹

ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПКМ НА ОБОГРЕВАЕМОЙ ОСНАСТКЕ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-48-56

Представлен опыт создания систем управления процессом безавтоклавного формования конструкций из ПКМ на обогреваемой оснастке, основное внимание уделено разработке программного обеспечения для таких систем. Рассмотрены требования, предъявляемые к программе управления со стороны технологов процесса, аппаратные особенности реализации системы, типы датчиков, подключаемых к системе, особенности работы с датчиками и анализа поступающей с них информации. Приведена схема управления величиной вакуумного давления при формовании ПКМ. Дано описание структурных блоков программы управления формованием.

Ключевые слова: ПКМ, обогреваемая оснастка, система управления, методики контроля технологических свойств, вакуумное формование, безавтоклавные методы формования.

A.E. Rakhmatullin¹, V.I. Postnov¹, S.V. Strelnikov¹

DEVELOPMENT AND APPLICATION EXPERIENCE OF SOFTWARE FOR CARRYING OUT THE FORMATION PROCESS OF STRUCTURES FROM PCM ON THE HEATED EQUIPMENT

The experience of development control systems for the process of forming of structures from PCM is presented, the main attention is paid to the development of software for such systems. The requirements for the software from the process technologists, hardware features of the system implementation, different types of sensors connected to the system, methods of their use are considered. The scheme of control of the vacuum pressure value during PCM molding is given. The description of structural blocks of the program of control of molding is given.

Keywords: PCM, heated equipment, control system, methods of control of technological properties, vacuum forming, out-autoclave methods of forming.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Анализ состояния науки и технологий показывает, что в мире активно развивается и продолжит развиваться направление по созданию новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–3]. Рост применения композиционных материалов в авиационной технике и соответствующий рост объемов производства конструкций из них требуют повышения автоматизации технологических процессов, что позволит снизить их трудоемкость и энергоемкость [4, 5]. Длительное время в технологии изготовления конструктивных ПКМ для авиационных деталей преобладал препрегово-автоклавный способ [6], который позволяет обеспечивать высокий уровень физико-

механических свойств и низкую пористость. Однако данный способ обладает высокой энергоемкостью и стоимость изготовления деталей увеличивается из-за использования дорогостоящих автоклава, оснастки и технологических материалов [7–9]. Вопрос снижения издержек при сохранении качества в производстве деталей из ПКМ заставляет искать пути внедрения новых материалов и энергосберегающих технологий. В связи с этим для изготовления слабо- и средненагруженных деталей из ПКМ стали широко применяться безавтоклавные методы формования. Процесс формования деталей из ПКМ под вакуумным мешком на обогреваемой оснастке позволяет получать крупногабаритные детали сложной формы без использования дорогостоящего автоклава и снизить энергозатраты [10–12]. Для проведения процесса формования деталей из ПКМ в том числе и на обогреваемой оснастке в УНТЦ ВИАМ разработаны системы управления, в состав которых входит и специально разработанное программное обеспечение.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы», комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Говоря о программе управления для проведения процесса формования конструкций из ПКМ на обогреваемой оснастке, часто приходится обсуждать не только программное обеспечение, а всю систему управления процессом формования конструкций, состоящую из вычислительной электроники, силовых электронных компонентов, датчиков и программного обеспечения. На рис. 1 представлены два примера разных систем управления формованием деталей из ПКМ.

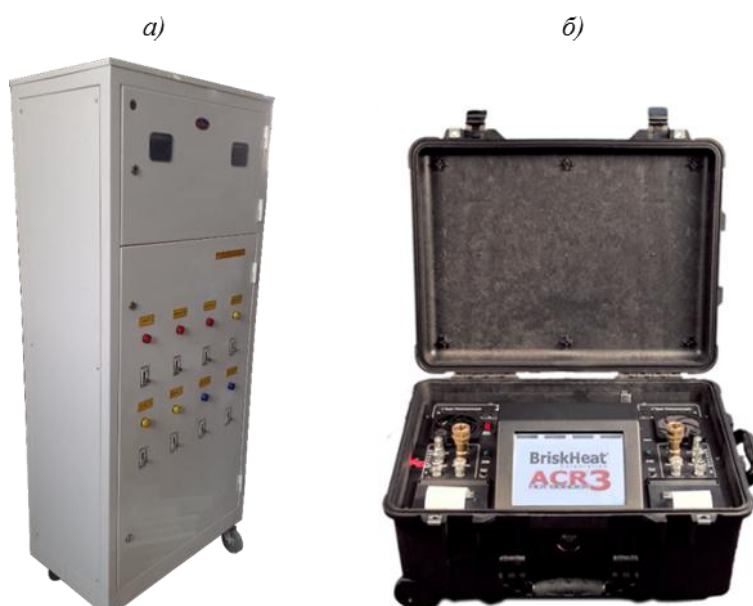


Рис. 1. Восьмиканальная система управления крупногабаритными обогреваемыми оснастками мощностью до 70 кВт (а), мобильная система управления процессом формования, предназначенная для ремонта изделий из ПКМ (б)

На первом этапе разработки программы управления необходимо сформировать требования к программе. Это один из наиболее ответственных этапов, на котором необходимо вовлечь как можно больше заинтересованных лиц для обсуждения требований к будущей системе целиком и к программе управления, в частности.

Большую часть требований к программному обеспечению можно условно разделить на две основные категории:

- технологические требования, поступившие от технологов, отвечающих за разработку и проведение режима формования конструкций из ПКМ;
- требования, связанные с исполнением системы управления на конкретной электронной и вычислительной базе.

К требованиям технологов к программе чаще всего относятся:

- возможность заранее задавать и сохранять в памяти технологические режимы;
- возможность корректировки заданного технологического режима в процессе проведения режима;
- режим «пауза», во время которого поддерживается достигнутое значение температуры оснастки, технологический режим не сбрасывается и позволяет продолжить процесс формования;
- надежность системы – оповещение технолога о выходе параметров процесса за границы режима или при аварийных ситуациях;
- сохранение всех параметров проведенного режима на жестком диске или в памяти устройства;
- возможность просмотра параметров выполненных режимов;
- возможность экспортировать данные параметров режима в файлы с форматами, поддерживаемыми офисными приложениями, – например, Excel и Word компании Microsoft для создания отчетов, актов и другой необходимой заказчику документации.

С точки зрения электронного оснащения системы управления программное обеспечение должно удовлетворять следующим требованиям:

- работа программы на заданной платформе управляющего контролера или компьютера, т. е. совместимость с операционной системой;
- подключение к системе разных типов датчиков для контроля технологических параметров процесса формования.

Из требований, представленных ранее, возникает ряд задач, которые необходимо решить при проектировании программы управления. Некоторые задачи и способы, которые применены при их решении, рассмотрены далее.

Результаты и обсуждение

К системе управления процессом формования ПКМ требуется подключать разные датчики. Рассмотрим некоторые датчики и методы их использования.

Температурные датчики (термопары, термометры сопротивления) для контроля температуры процесса. Если подключено несколько термопар, то возможно их размещение в разных точках оснастки или детали для лучшего контроля температурного поля. Существуют разные варианты управления процессом нагрева с использованием значений, полученных с нескольких температурных датчиков: по значению одного выбранного датчика; по минимальному или максимальному значению; по значению, полученному усреднением температуры с нескольких датчиков.

Датчики измерения вакуумного давления. Для контроля вакуумного давления в технологическом пакете под вакуумным мешком датчик должен быть по возможности подключен на максимальном удалении от точки подачи вакуума [13]. Обладая возможностью измерять и регулировать значение вакуумного давления в процессе формования, можно реализовать технологические приемы для улучшения свойств ПКМ на стадии отверждения, в том числе режим пульсирующего вакуума, когда разряжение под мешком меняется в определенном интервале в течение всего процесса [14].

Принцип действия метода управления величиной вакуумного давления в процессе формования ПКМ применен на обогреваемой оснастке и основан на изменении уровня вакуума под вакуумным мешком путем попеременного подключения через электромагнитные клапаны вакуумной линии (1) и атмосферного давления (2). Контроль величины вакуума под вакуумным мешком осуществляется датчиком контроля вакуума (5) и для визуального контроля стрелочным вакуумметром (4) (рис. 2) [15].

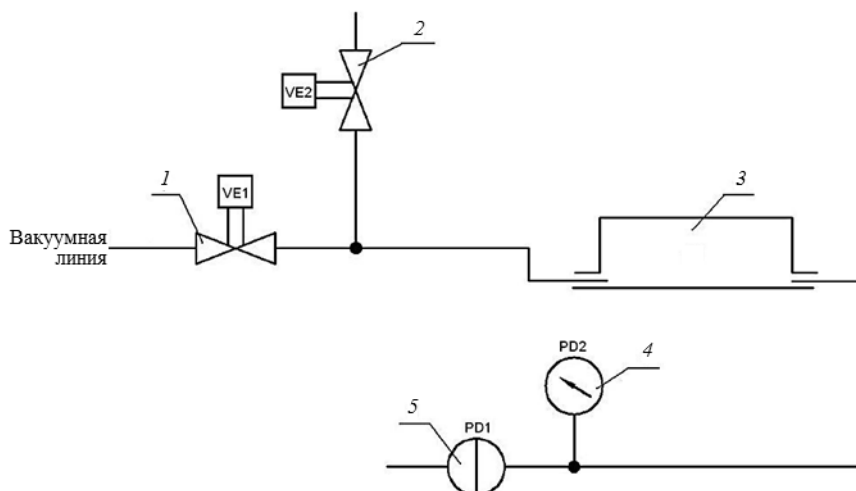


Рис. 2. Схема управления величиной вакуумного давления при формовании ПКМ на обогреваемой оснастке:

1 – клапан вакуумный электромагнитный на вакуумной линии; 2 – клапан вакуумный электромагнитный соединения с атмосферой; 3 – вакуумный мешок на обогреваемой оснастке; 4 – вакуумметр стрелочный; 5 – датчик контроля вакуума

Емкостные датчики для измерения значения диэлектрической проницаемости формуемого материала. Информация о значении диэлектрической проницаемости может быть использована для контроля степени отверждения деталей из ПКМ (рис. 3) [16].

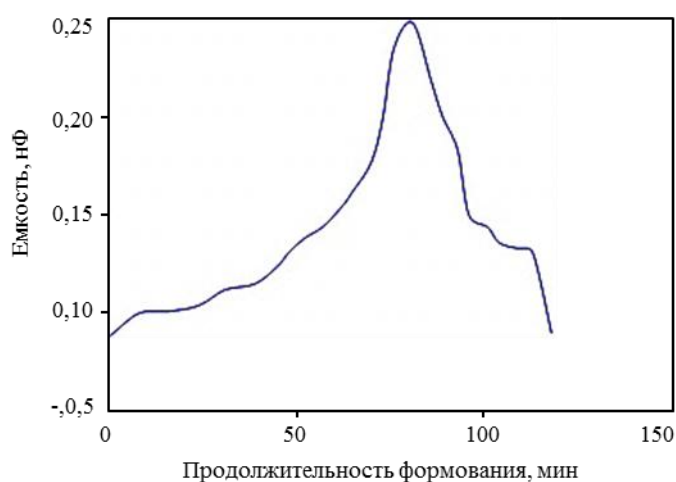


Рис. 3. Изменение значения показаний емкостного датчика в процессе формования детали из стеклопластика СТ-69Н

Ультразвуковые датчики для контроля процесса формования [16, 17]. При этом датчики могут встраиваться в технологические оснастки без повреждения структуры

формуемой детали. Ультразвуковые методы обладают методологической простотой и являются универсальными по отношению к материалам как с проводящими, так и с диэлектрическими свойствами, что позволяет непосредственно определять с помощью известных зависимостей вязкоупругие характеристики материала, опираясь на измеренные значения скорости распространения и коэффициента затухания ультразвука. На рис. 4 представлен пример изменения амплитуды ультразвуковой волны при контроле отверждения ПКМ. Видно, что в начале процесса формования при повышении температуры нагрева происходит снижение вязкости связующего – линия графика изменения амплитуды снижается и проходит минимум (рис. 4, а). При дальнейшем увеличении температуры и с началом процесса гелеобразования вязкость связующего начинает расти, кривая значений амплитуды поднимается вверх и при выдержке на заданном уровне температуры нагрева постепенно переходит в постоянную величину, отличающуюся от среднего значения не более чем на 2–3%, что указывает на окончание процесса отверждения полимерной матрицы.

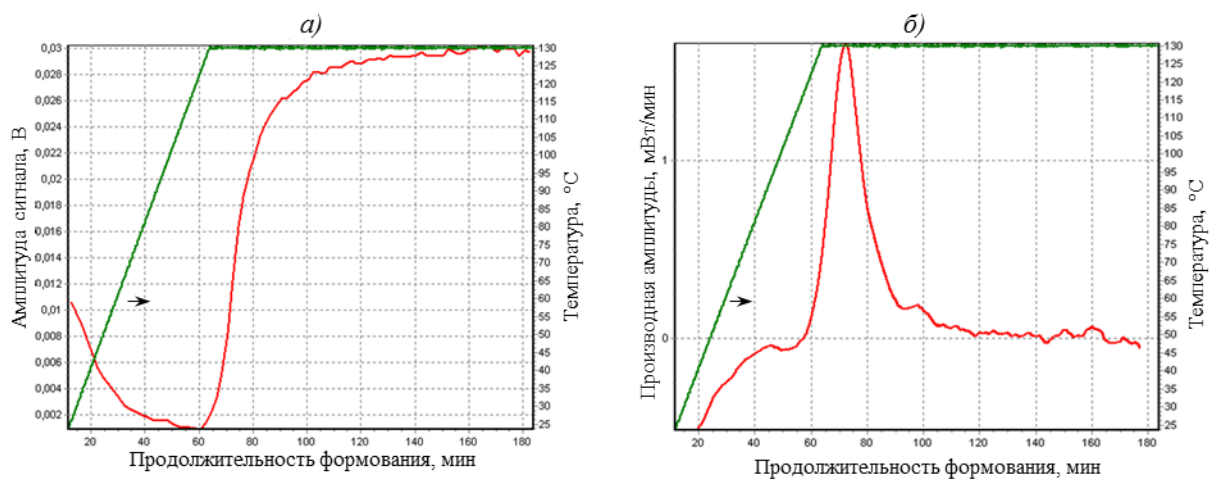


Рис. 4. Изменение амплитуды ультразвукового сигнала (—) в процессе формования стеклопластика СТ-69Н:

а – фактическое значение амплитуды ультразвукового сигнала; б – производная изменения амплитуды

Приведение полученных значений амплитуды ультразвукового сигнала через производную второго порядка позволяет получить более наглядное изменение амплитуды в процессе формования отверждения полимерной матрицы (рис. 4, б).

Трудность подключения и опроса по программе такого разнообразия датчиков заключается в различии подходов к работе с ними: каждый датчик имеет свое время отклика, что отражается на времени, затрачиваемом на опрос, при этом нельзя откладывать опрос других датчиков; датчики формируют разное количество информации (для датчика температуры это может быть простое числовое значение, для ультразвукового датчика – большой массив данных, описывающий акустические колебания). Отличаются также способы обработки и отображения данных с датчиков.

Для решения поставленной задачи в процессе проектирования программу структурно разбивали на несколько уровней. Нижний уровень программы отвечал за взаимодействие с аппаратной частью системы. Для взаимодействия с этим уровнем спроектировали специальный интерфейс – так называемый слой аппаратных абстракций (Hardware Abstraction Layer – HAL), предназначенный для сокрытия особенностей аппаратного обеспечения от другой части программного кода, реализующего основную

логику работы. Такой интерфейс позволяет уменьшить количество строк кода, которые придется модифицировать при внесении изменений в аппаратную часть системы. Данный интерфейс, разработанный для управляющей программы, представляет собой набор функций, ориентированных на асинхронную работу. При вызове асинхронных функций кроме необходимых параметров запроса также передается ссылка на функцию, содержащую код, который будет выполнен после осуществления запроса к оборудованию и получения ответа с требуемыми данными. Асинхронный стиль программирования увеличивает сложность проектируемого программного обеспечения, что, соответственно, ведет к увеличению трудоемкости, а также времени, затраченного на создание и отладку управляющей программы, но является необходимым условием при взаимодействии с более медленным контроллером аппаратной части. В связи с этим при реализации уровня HAL приходится создавать параллельный поток, в котором происходит непосредственный обмен пакетами данных с аппаратной частью системы. При этом длительное (относительно верхних уровней программы) ожидание ответа от оборудования не сказывается на работоспособности всей программы. Для облегчения работы с параллельными потоками можно воспользоваться разными готовыми решениями – например, использовать в проекте стандарты OpenMP, OpenCL или подключать специальные библиотеки, такие как OmniThreadLibrary, которые берут на себя рутинную и трудоемкую работу по созданию и синхронизации потока, организации эффективной коммуникации с ним: обмен сообщениями, отслеживание состояния, остановка и уничтожение потока. На этом же уровне структуры программы происходит конвертация данных из специфичной для аппаратной части формы в универсальный вид для обработки на следующем уровне.

Следующий уровень структуры реализует основную логику программы (бизнес-логику) и предназначен: для выполнения работ с файлами – загрузка и сохранение заданных режимов формования, сохранение данных, полученных с различных датчиков, а также для выполнения процесса формования по выбранному режиму и в зависимости от показаний датчиков принятия решений для предусмотренных ситуаций. Этот уровень является одним из важнейших и обладает множеством опций для точной настройки системы управления. Одна из таких опций – выбор алгоритма работы регулятора нагрева оснастки. В программе реализованы несколько известных и широко используемых в промышленных регуляторах алгоритмов: П-, ПИ- и ПИД-регуляторы. В зависимости от характеристик используемой оснастки (мощность встроенного нагревательного элемента; инерционность, связанная с массой и материалом оснастки) возможно выбрать наиболее подходящий вариант регулятора для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса.

Самый верхний уровень структуры программы предназначен для взаимодействия с пользователем системы управления формированием деталей из ПКМ. Данный уровень реализует графический интерфейс системы и отвечает за правильную передачу параметров процесса формования на нижележащие уровни. Графический интерфейс пользователя разделен на несколько режимов. Каждый режим обладает своим окном с набором элементов управления и может быть вызван из главного окна программы. Режим предварительного ввода программ формования предназначен для настройки всех параметров конкретного процесса. Окно управления проведением процесса формования предназначено для запуска, остановки, оперативного изменения режима, вывода информации о текущих значениях температуры оснастки, уровня вакуума, времени, прошедшего от начала процесса, сообщений об ошибках и отклонениях от режима и т. д. Режим архива предназначен для просмотра данных сохраненных процессов, отображения данных в удобной для анализа форме, экспортирования данных.

Системы управления процессом формования конструкций как правило являются многоканальными системами. Такая система может управлять параллельно несколькими процессами формования конструкций из ПКМ. Современные электронные модули обладают большими и часто избыточными ресурсами в компактном корпусе – например, управляющий контроллер, встроенный в систему, обладает большими вычислительными ресурсами и способен обрабатывать информацию с множества однотипных каналов. Модули ввода-вывода выпускаются с множеством выходов и создают возможность подключения большого количества датчиков. Вследствие этого становится возможным создание многоканальных систем управления и в программе управления удобно выделить структуру или объект, полностью контролирующей работу одного канала. Создав в программе такой объект, можно увеличивать количество каналов системы простым копированием объекта в соответствии с количеством каналов, реализованных в системе. Количество каналов может иметь жесткое ограничение по суммарной мощности, которую способна отдавать система в обогреваемые оснастки.

Не следует забывать о надежности системы. Программа управления должна периодически сохранять накопленные данные о процессе формования в постоянной памяти устройства. В случае сбоя технолог должен иметь возможность оперативно перезапустить систему и продолжить процесс формования. Программа управления также должна иметь возможность управлять аварийной сигнализацией, реализованной в системе для привлечения внимания оператора или технолога, и сообщать о внештатной ситуации – например, о выходе значения определенного параметра за установленные пределы.

В заключение можно привести пример разработанного восьмиканального автоматизированного комплекса для управления процессом формования ПКМ, в состав которого входят обогреваемые оснастки для производства деталей интерьера самолета Ту-204-200 (рис. 5).

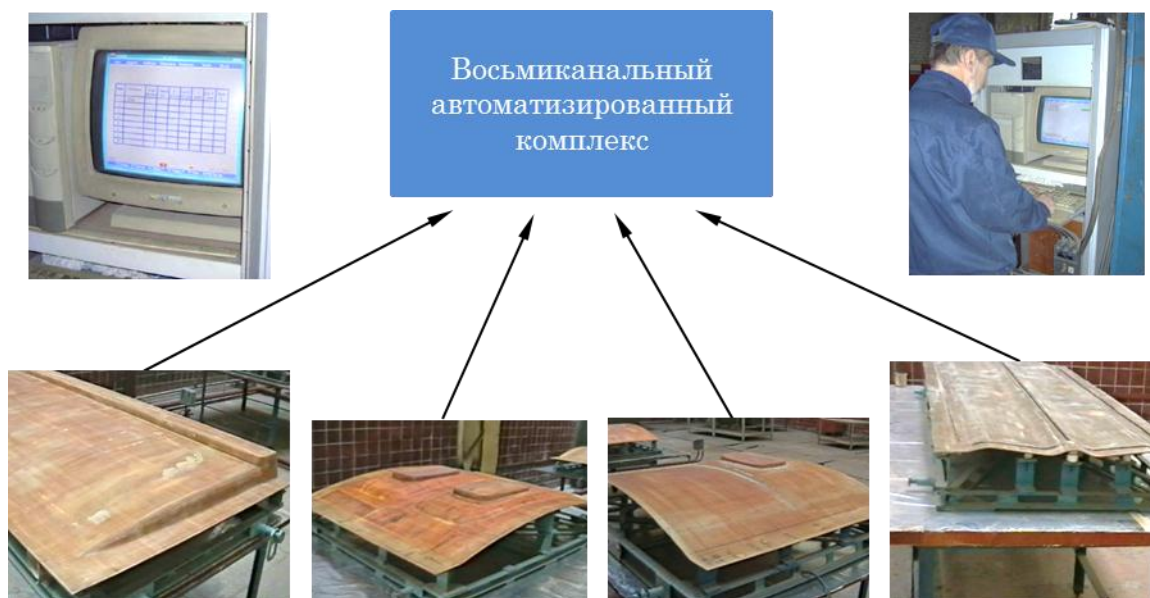


Рис. 5. Восьмиканальный автоматизированный комплекс с обогреваемыми оснастками для изготовления деталей интерьера самолета Ту-204-200

В представленном комплексе реализованы идеи, изложенные в данной статье, которые получили развитие при разработке последующих систем.

Заключения

Применение разработанных систем в производстве для проведения процесса формования конструкций из ПКМ на обогреваемой оснастке повысило степень автоматизации технологических процессов, что сказалось на энергоемкости процесса и качестве получаемых деталей. Мобильные системы формования конструкций из ПКМ нашли применение для ремонта композиционных материалов в авиационной технике, машиностроении и других областях техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. №3. С. 97–105.
3. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
4. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 231–242.
5. Донецкий К.И., Коган Д.И., Хрульков А.В. Свойства полимерных композиционных материалов, изготовленных на основе плетеных преформ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №3. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-5-5.
6. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 292–301.
7. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М. и др. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №10. С. 27–35.
8. Вешкин Е.А. Особенности безавтоклавного формования низкопористых ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №2 (38). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-7-7.
9. Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6.
10. 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. С. 22–25.
11. Григорьев М.М., Коган Д.И., Гусев Ю.А., Гуревич Я.М. Особенности изготовления ПКМ методом вакуумного формования препрега // Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 67–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-67-71.
12. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
13. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Абрамов П.А. Пути повышения качества деталей из ПКМ при вакуумном формовании // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. №4 (3). С. 834–839.

14. Мосиук В.Н., Ворвуль С.В., Томчани О.В. Дифференциальное вакуумное формование как усовершенствованная технология вакуумного формования // Авиационные материалы и технологии. 2017. №4 (49). С. 37–41. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-37-41.
15. Качура С.М., Бурхан О.Л., Рахматуллин А.Э., Никитин Е.К. Особенности микропроцессорного управления технологическими параметрами процесса вакуумного формования изделий из ПКМ // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. №4-4. С. 815–818.
16. Антюфеева Н.В., Алексашин В.М., Столянков Ю.В. Определение степени отверждения ПКМ методами термического анализа // Авиационные материалы и технологии. 2015. №3 (36). С. 79–83. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-79-83.
17. Никитин К.Е. Новые микропроцессорные средства для неразрушающего контроля структуры, состава и свойств полимерных композитов на различных стадиях их производства // Заводская лаборатория. 1993. Т. 59. №3. С. 31–34.

УДК 678.8

*М.С. Иванов¹, Е.А. Вешкин¹, Р.А. Сатдинов¹, И.Н. Донских¹***НОВЫЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ТКАНЕПЛЕНОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ
ДЛЯ ГИБКИХ ТРУБОПРОВОДОВ
СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-57-66

Проведен анализ информационных источников в области материалов, применяемых для изготовления гибких трубопроводов системы кондиционирования воздуха летательных аппаратов. В результате сформулированы требования и разработан новый отечественный тканепленочный материал марки ВРТ-12 на основе стеклоткани Э1-100 с двухсторонним фторполимерным покрытием – для изготовления гибких трубопроводов системы кондиционирования воздуха летательных аппаратов. Материал имеет массу 1 м² не более 275 г, отвечает требованиям АП-25 по горючести, выдерживает избыточное давление не менее 0,01 МПа и может эксплуатироваться в интервале температур от -60 до +80°C.

Ключевые слова: гибкие трубопроводы системы кондиционирования воздуха, тканепленочный материал, горючесть, герметичность, аналог.

*M.S. Ivanov¹, E.A. Veshkin¹, R.A. Satdinov¹, I.N. Donskih¹***NEW DOMESTIC COATED TEXTILE MATERIAL
FOR FLEXIBLE AIR CONDITIONING DUCTS
OF FLIGHT VEHICLES**

The analysis of information sources in area of the materials applied to manufacturing of flexible air conditioning ducts of flight vehicles is carried out. Requirements are as a result formulated and the new domestic coated textile material is developed for manufacturing of flexible air conditioning ducts of flight vehicles of the VRT-12 brand on the basis of E1-100 fiber glass textile with bilateral fluoropolymer covering. Research of its properties is conducted. The material has the weight of 1 m² no more than 275 g, meets the requirements AP-25 of flammability, maintains excess pressure of 0,01 MPa and can be maintained in the range of temperatures from -60 to +80°C.

Keywords: flexible air conditioning ducts, coated textile material, flammability, tightness, analogue.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время в РФ предусмотрено создание нового семейства ближне-среднемагистральных самолетов, а одной из важнейших задач при проектировании пассажирских самолетов является создание системы кондиционирования воздуха (СКВ) [1]. С момента повсеместного внедрения СКВ в авиационной технике, с середины 1960-х годов, основные ее элементы изготавливали преимущественно из металлов.

Однако в настоящее время для оптимизации весовой эффективности все большее число элементов конструкции планера и систем самолетов изготавливается из полимерных композиционных материалов (ПКМ) [2]. Среди приоритетных стратегических направлений развития материалов и технологий существенная роль отведена разработке ПКМ [3–5].

Общая длина трубопроводов СКВ на пассажирских самолетах более 300 м, а масса 500–600 кг, что составляет не менее 40% массы всей системы. Трубопроводы СКВ в зависимости от рабочей температуры изготавливают из титанового сплава ОТ4, стали Х18Н9Т, алюминиевых сплавов АМг или АМц или из ПКМ. В современных самолетах элементы СКВ с рабочей температурой до 200°C изготавливают из ПКМ, так как применение ПКМ позволяет снизить массу элемента по сравнению с алюминием на 20–30% [2, 3]. Трубопроводы СКВ состоят из жестких элементов (тройники, трубы, патрубки) и гибких трубопроводов, которые применяют для соединения жестких элементов в местах изгибов и для подключения индивидуальных систем обдува, что позволяет экономить полезное пространство внутри фюзеляжа, – как показано на рис. 1.

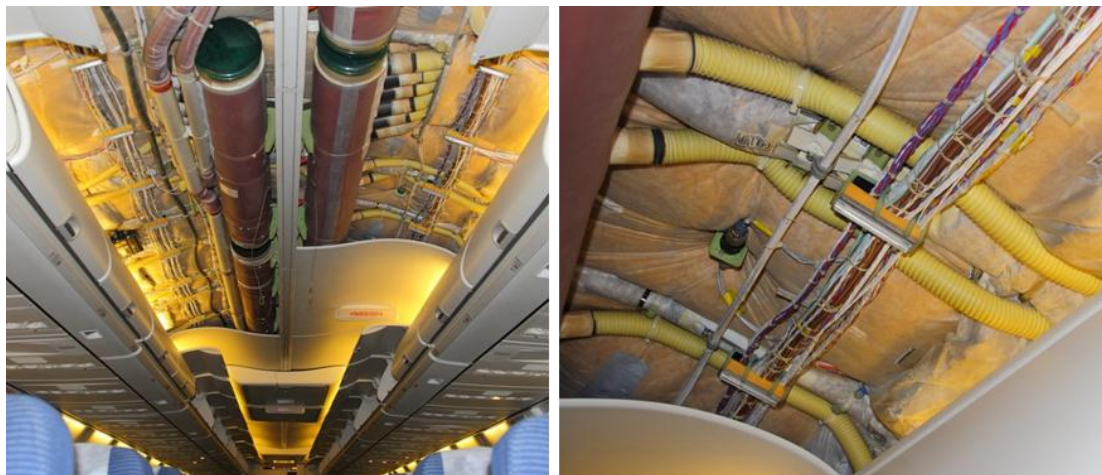


Рис. 1. Трубопроводы системы кондиционирования воздуха самолета Boeing 737

Жесткие элементы изготавливают из стеклопластиков, гибкие – из герметичной оболочки в виде рукава и поддерживающего его каркаса – как показано на рис. 2. При этом оболочка изготовлена из тканепленочного материала (ТПМ), а каркас в виде спирали выполнен из металла или полимера [6]. Тканепленочные материалы представляют собой ПКМ, в которых матрица из эластомера армирована материалом в виде ткани, поэтому ТПМ обладают комплексными свойствами силовой основы и эластичного покрытия, а именно – высокой прочностью, гибкостью и герметичностью [7].

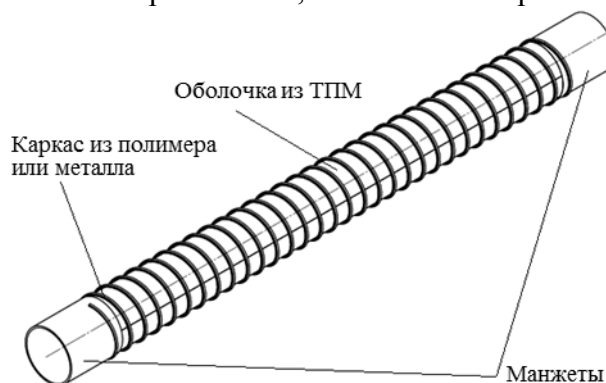


Рис. 2. Схема элемента гибкого трубопровода системы кондиционирования воздуха

Анализ доступной в сети Интернет информации показал, что гибкие трубопроводы СКВ производят такие компании, как BWT Senior Aerospace (Англия), HBD/Thermoid Inc. (США), Flexco Composite (США), Flexfab (США), Technifab (США). В РФ ТПМ для СКВ производят: ОКБ «Аэрокосмические системы», АО «НИИРП» и ООО «Химпродукт» [8–13].

Результаты анализа представлены в табл. 1. Установлено, что для изготовления гибких трубопроводов СКВ летательных аппаратов (ЛА) применяют ТПМ на основе нейлоновой ткани или стеклоткани с односторонним или двухсторонним полимерным покрытием из полиуретанового, силиконового или неопренового (хлоропренового) каучуков. Компания Technifab (США) производит воздуховоды СКВ из закрытоячеистой пены на основе поливинилидендифторида (ПВДФ) торговой марки ZOTEK® F PVDF Foam [11]. Следует отметить, что фторполимеры являются наиболее перспективными с точки зрения пожаробезопасности. Как показано в статье [14], декоративный материал «Полиплекс» на основе стеклоткани Э-1/1-100 с односторонним фторполимерным покрытием соответствует требованиям АП-25, FAR-25 и CS-25 по пожаробезопасным свойствам (горючесть, дымообразование и тепловыделение) и является трудносгорающим.

В АО «НИИРП» производят прорезиненную невулканизованную ткань 51-3Т-111 по ТУ Заг10-198–87 для изготовления гибких труб облегченной конструкции СКВ для самолета Ту-204 [12]. Недостатками этого ТПМ являются большая масса, низкая морозостойкость, необходимость вулканизации для изготовления из нее воздуховода и малый срок службы, поэтому данный материал не нашел широкого применения в конструкции СКВ для современных ЛА.

Таблица 1

Сравнение свойств тканепленочных материалов для гибких трубопроводов системы кондиционирования воздуха

Свойства	Значения свойств для			
	российского аналога		зарубежного аналога	
	ткани 51-3Т-111, АО «НИИРП»; ТУ Заг10-198–87 [12]	материала ТСС, ООО «Химпродукт»; ТУ8729-007-99176106–2016 [13]	типа U62, Senior Aerospace BWT [8]	типа CAT, HBD/Thermoid Inc. [9]
Основа	Стеклоткань ЭЗ-100	Стеклоткань	Нейлон	Стеклоткань
Покрывтие	Полихлоропреновый каучук	Силикон	Полиуретан	Неопрен
Масса 1 м ² , г	425±25	500–570	–	–
Диапазон рабочих температур, °С	-30÷+80	–	-55÷+100	-53÷+177
Разрывная нагрузка (основа/уток), Н	736/687	1400/1137	–	–
Горючесть	Соответствие требованиям противопожарных норм для материалов внутренней отделки самолета			
Герметичность	Материал должен быть герметичен при давлении не менее 0,01 МПа			

В результате проведенного анализа сформированы требования к ТПМ для изготовления гибких трубопроводов СКВ для ЛА. Материал должен отвечать следующему комплексу характеристик:

- иметь минимально возможную массу 1 м² и высокую надежность при эксплуатации – разрывная нагрузка полоски размером 50×200 мм (по основе/утку) не менее 500 Н;
- соответствовать требованиям авиационных правил по пожаробезопасности АП-25 [15];

- быть герметичным при давлении не менее 0,01 МПа;
- сохранять свои свойства в диапазоне температур от -60 до +80°C;
- быть технологичным – покрытие материала должно обеспечивать возможность изготовления и ремонта рукава трубопровода методом сварки;
- быть устойчивым к различным эксплуатационным факторам;
- иметь низкое влагопоглощение [16].

Если в настоящее время в зарубежной авиационной технике стало уже нормой изготовление гибких трубопроводов СКВ самолетов из ПКМ, то в РФ их внедрение откладывается. Поэтому для создания новых отечественных гибких трубопроводов из ПКМ для СКВ в ЛА взамен зарубежных требуется разработка нового ТПМ, отвечающего современным требованиям [17]. Данная работа представляет большой научный интерес и является актуальной, так как без создания подобных материалов (ввиду возможного применения санкций со стороны США к предприятиям авиационной отрасли РФ) под угрозой срыва находится создание парка отечественной современной пассажирской авиационной техники.

Важно отметить, что разработка тане пленочных материалов входит в «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.6. «Тане пленочные материалы») [18].

Материалы и методы

В связи с жесткими требованиями, предъявляемыми к пожаробезопасности, ТПМ должен изготавливаться преимущественно из негорючих материалов. Основа материала должна сочетать следующий комплекс свойств: низкая масса, негорючесть, инертность. Стеклоткани, благодаря своей структуре, обладают рядом уникальных свойств, таких как гибкость, высокая прочность при низкой массе, устойчивость к воздействию воды и агрессивных сред, жаропрочность и негорючесть, а также имеют отличные диэлектрические и теплоизоляционные качества и экологически безопасны [17].

С учетом доступности и оптимального комплекса механических и физических свойств в качестве основы для изготовления ТПМ опробованы отечественные электроизоляционные стеклоткани марок: Э1-100, Э2-80, Э2/1-80 и Э3/1-100 по ГОСТ 19907–2015. Физико-механические свойства стеклотканей представлены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства стеклотканей

Стеклоткань	Поверхностная плотность, г/м ²	Плотность нитей на 1 см (основа/уток)	Разрывная нагрузка (основа/уток), Н	Относительное удлинение до разрыва (основа/уток), %
Э1-100	112	20/20	890/657	4/3,5
Э2-80	100	20/20	760/713	3,7/3,3
Э2/1-80	85	20/16	771/726	5,2/3,8
Э3/1-100	108	16/16,5	723/670	5,7/4,9

Полимерное покрытие материала должно сочетать следующий комплекс свойств: негорючесть, герметичность, инертность, и обеспечивать возможность сваривания материала. Для обеспечения данных свойств в качестве компонентов полимерного покрытия опробовали полимерные композиции на основе фторкаучуков СКФ-32 или СКФ-264В/5 и кремнийорганического каучука Лестосил-СМ.

Фторкаучуки обладают высокой термостойкостью, стойкостью к агрессивным средам, повышенными механическими, антиадгезионными и другими свойствами,

а также способностью сохранять эти свойства в широком диапазоне рабочих температур и давлений [14].

В качестве наполнителя для фторкаучуков использовали оксид титана (IV). Наполнитель обеспечивает технологичность изготовления полимерной композиции и, кроме того, выполняет функцию пигмента, придавая материалу белый цвет [19].

Кремнийорганические каучуки характеризуются высокой теплостойкостью до 250°C, бензомаслостойкостью, топливостойкостью, хорошей гидрофобностью и экологичностью [20]. Однако кремнийорганический каучук Лестосил-СМ является горючим, поэтому для снижения его горючести применяли галогенсодержащие антипирены. Однако при введении антипирена в Лестосил-СМ композиция приобретает резкий специфический запах, который не исчезает после удаления растворителя. В этой связи данную композицию исключили из дальнейших исследований, так как она оказалась непригодной для изготовления ТПМ для трубопроводов СКВ в ЛА по санитарно-гигиеническим аспектам.

Изготовление ТПМ проводили по технологии прямого послойного нанесения раствора полимерной композиции на текстильную основу при помощи ракельного ножа (шпрединование). Процесс изготовления материала выглядит следующим образом:

- вальцевание компонентов полимерной композиции;
- растворение вальцованной смеси;
- послойное нанесение раствора полимерной композиции на стеклоткань с последующей сушкой каждого слоя на машине для нанесения.

Испытания образцов проводили по следующим методикам определения:

- массы 1 м² ТПМ – по ГОСТ 17073–71;
- разрывной нагрузки и удлинения при разрыве ТПМ – по ГОСТ 17316–71 (размер рабочего участка 50×200 мм);
- горючести – по АП-25 п. 853в, Приложение F, Часть I;
- влагопоглощения – по ГОСТ 8971–78;
- прочность при расслаивании – по ГОСТ 6768–75.

Оценку степени герметичности материала проводили по специально разработанному СТО 1-595-20-581–2018 на установке по определению пожаробезопасности материалов спасательных надувных трапов. Метод по оценке степени герметичности основан на воздействии заданного избыточного давления, создаваемого внутри герметичного цилиндра, в качестве лицевой стенки которого используется исследуемый образец материала, и определении времени, в течение которого снижение избыточного давления внутри испытательного модуля не превышает допустимое значение [21].

Результаты и обсуждение

С учетом предъявляемых требований во ФГУП «ВИАМ» разработан ТПМ для изготовления гибких трубопроводов СКВ для ЛА.

На первом этапе разработки материала выбрана ткань основы для ТПМ. Анализ результатов исследования разрывной нагрузки и относительного удлинения стеклотканей, представленных в табл. 2, показывает, что ТПМ на основе этих тканей будет иметь разрывную нагрузку выше, чем у иностранных аналогов; при этом поверхностная плотность этих тканей позволит обеспечить требуемую массу 1 м² разрабатываемого ТПМ – не более 300 г.

На втором этапе работы в целях выбора полимерного покрытия разрабатываемого ТПМ изготовлены и исследованы экспериментальные полимерные композиции на основе фторкаучука СКФ-264В/5 или СКФ-32 с различным содержанием фторполимера и наполнителя TiO₂.

Для выбора состава ТПМ изготовлены экспериментальные образцы и проведено исследование их основных свойств. Нанесение выбранных для исследований полимерных композиций на образцы стеклотканей (табл. 2) проводили в лабораторных условиях ручным способом по описанному ранее методу с применением шпателя. Нанесение каждого слоя полимерной композиции производили поочередно на лицевую и изнаночную сторону стеклотканей. Для удаления растворителя проводили сушку образцов в термошкафу в диапазоне температур от 80 до 110°C, продолжительность сушки 1–2 мин. Количество слоев и привес от одного слоя покрытия подбирали таким образом, чтобы обеспечить массу 1 м² изготовленных образцов ТПМ – не более 300 г.

В результате установлена зависимость герметичности ТПМ от плотности укладки нитей в стеклотканях и соотношения компонентов в рецептурах полимерных композиций на основе фторкаучуков. Исследования показали, что экспериментальные образцы ТПМ на основе чистого фторкаучука СКФ-264В/5 не герметичны из-за низкой герметичности чистого каучука, а также плохой совместимости каучука и фторполимера. Ткани Э2/1-80 и Э3/1-100 характеризуются разреженной структурой – меньшей плотностью нитей на 1 см, по сравнению с тканями Э1-100 и Э2-80, поэтому образцы ТПМ на их основе не соответствовали требованиям по герметичности.

При дальнейших исследованиях образцы ТПМ изготавливали на основе стеклотканей Э1-100 и Э2-80. Обнаружено влияние величины содержания TiO₂ и соотношения фторкаучука и фторполимера в полимерном покрытии на герметичность ТПМ. При высоком содержании TiO₂ и фторкаучука образцы ТПМ не сохраняли герметичность; при низком содержании TiO₂ – ТПМ не технологичен, так как имеет повышенную липкость. В результате исследований выбрана оптимальная полимерная композиция для формирования покрытия, разрабатываемого ТПМ.

Изготовлены образцы ТПМ на основе стеклотканей Э1-100 и Э2-80 с покрытием на основе фторкаучука СКФ-32 и проведены исследования степени герметичности, массы 1 м², толщины, физико-механических свойств и горючести – результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства образцов из тканепленочного материала на основе стеклотканей Э1-100 и Э2-80 с полимерным покрытием на основе фторкаучука СКФ-32

Тканепленочный материал	Масса 1 м ² , г	Толщина, мм	Степень герметичности, %, при давлении 0,02 МПа*	Разрывная нагрузка, Н		Удлинение при разрыве, %		Горючесть по АП-25, Приложение F, Часть 1
				по основе	по утку	по основе	по утку	
Стеклоткань Э1-100	280	0,17	97	932	583	5,9	5,8	Трудногорящий
Стеклоткань Э2-80	272	0,15	94	864	653	3,6	3,2	

* Продолжительность испытания 15 мин.

Исследование показало соответствие свойств образцов ТПМ предъявляемым требованиям по массе, прочности, горючести и герметичности.

Однако в дальнейшем при входном контроле стеклоткани Э2-80 обнаружены следующие дефекты – неравномерность структуры из-за наличия нитей другой линейной плотности по утку и раздвижка нитей утка, которые могут оказать негативное влияние на прочность и герметичность материала при его серийном производстве. В результате проведенных исследований в качестве оптимального варианта выбран состав ТПМ на основе стеклоткани Э1-100.

На следующем этапе работы для проведения расширенных исследований и отработки воспроизводимости процесса на производственном оборудовании изготовлены три партии ТПМ на основе стеклоткани Э1-100 с двухсторонним наполненным фторполимерным покрытием белого цвета гладкой фактуры. Ширина материала составляла 90 см. Разработанному материалу присвоена марка ВРТ-12, его внешний вид представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид тканепленочного материала марки ВРТ-12

Результаты испытаний прочностных свойств ТПМ при непосредственном воздействии температур -60 , $+20$, $+80$ и $+105^{\circ}\text{C}$ представлены на рис. 4. Из приведенных данных видно, что хотя с увеличением температуры испытания происходит снижение значений прочности материала, однако они находятся на высоком уровне и соответствуют предъявляемым требованиям. Изменение температуры не влияет на относительное удлинение ТПМ.

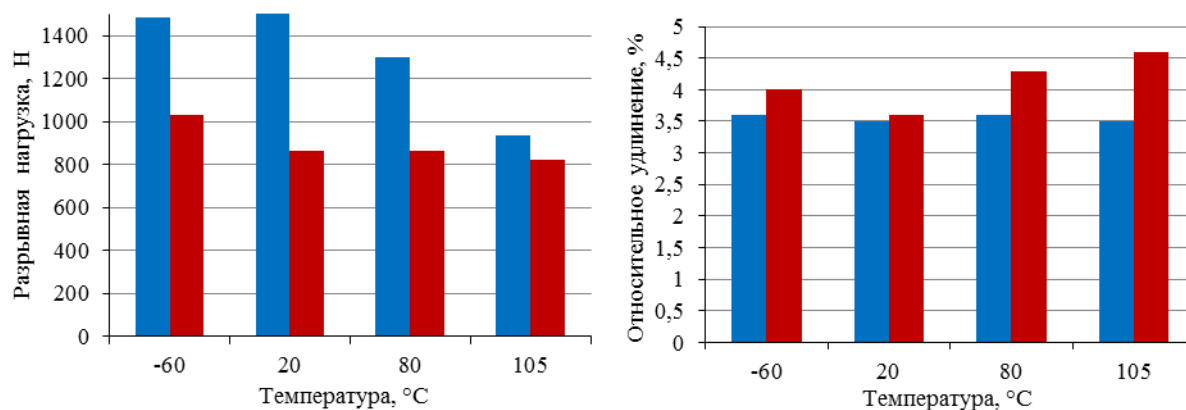


Рис. 4. Механические свойства тканепленочного материала марки ВРТ-12 по основе (■) и утку (■) при температурах от -60 до $+105^{\circ}\text{C}$

Исследование гигроскопичности материала в течение 24 ч показало, что разработанный материал обладает низким влагопоглощением: 0,3% за 24 ч.

Основные свойства ТПМ марки ВРТ-12 в сравнении с российским аналогом представлены в табл. 4.

Из представленных данных видно, что свойства, полученные при испытаниях ТПМ марки ВРТ-12, удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Материал ВРТ-12 на 65% легче российского аналога – ткани прорезиненной невулканизированной 51-3Т-111, и превосходит аналог по разрывной нагрузке: по основе – на 51%, по утку – на 20%.

Таблица 4

Основные свойства тканепленочного материала ВРТ-12 в сравнении с аналогом

Свойства	Значения свойств для	
	тканепленочного материала ВРТ-12	российского аналога – ткани 51-3Т-111
Масса 1 м ² , г	258	425±25
Разрывная нагрузка (основа/уток) при 20°С, Н	1507/864	736/687
Удлинение при разрыве (основа/уток) при 20°С, %	3,5/3,6	–
Горючесть	Трудногорающий (по АП-25, Приложение F, Часть I)	Огнестойкое резиновое покрытие
Степень герметичности	Сохранение избыточного давления 0,02 МПа в течение 15 мин – не менее 97%	Герметична при давлении 0,01 МПа
Гигроскопичность, %, в течение 24 ч при φ=98%	0,3	–

Одной из технологических особенностей процесса изготовления гибкого рукава трубопровода СКВ является образование соединения в виде шва. Для сокращения трудоемкости и материалоемкости при создании соединения в виде шва предложен метод термосваривания ТПМ. В этой связи проведено исследование способности покрытия ТПМ к свариванию. Методом термосваривания в прессе получены образцы для исследования прочности сварного шва на отрыв и на сдвиг при нахлесте шва 20 мм и размерах рабочих участков образцов 25×100 мм. Исследование показало (табл. 5), что механизм расслоения образцов является адгезионным. Тканепленочный материал марки ВРТ-12 превосходит аналог – ткань 51-3Т-111 – по прочности при расслоении в ~4 раза.

Таблица 5

Адгезионные свойства тканепленочного материала ВРТ-12

Свойства	Требования по ТЗ	Значение свойств для	
		тканепленочного материала ВРТ-12	российского аналога – ткани 51-3Т-111
Прочность сварного шва при отрыве, Н/мм	Полимерное покрытие должно обеспечивать возможность сваривания материала	0,4–0,6	0,1 (прочность клеевого шва)
Прочность сварного шва при сдвиге, Н		707 (разрушение по материалу)	–

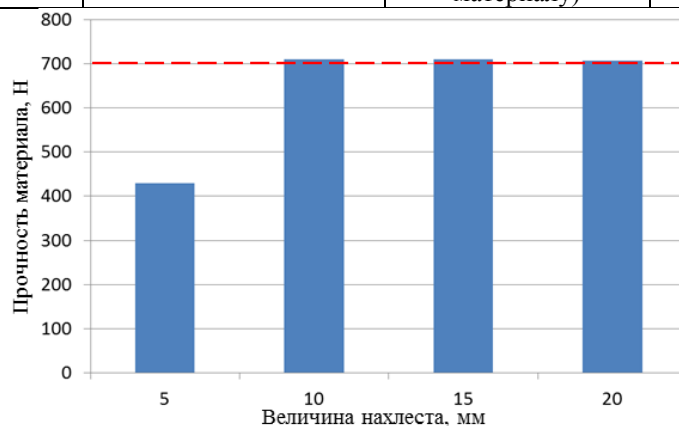


Рис. 5. Зависимость прочности сварного шва тканепленочного материала от величины нахлеста

Прочность сварного шва при сдвиге при величине нахлеста шва >10 мм больше прочности материала, при испытании происходит разрушение образца по материалу (рис. 5), поэтому полимерное покрытие обеспечило возможность термосваривания материала.

Заключения

Проведен анализ научно-технических информационных источников в области ТПМ, применяемых для изготовления гибких трубопроводов СКВ для ЛА. В результате сформулированы требования к разрабатываемому отечественному ТПМ.

Проведенные исследования по разработке ТПМ для изготовления гибких трубопроводов СКВ показали, что наилучший комплекс свойств имеет ТПМ, изготовленный на основе стеклоткани Э1-100 с двухсторонним наполненным фторполимерным покрытием. Материалу присвоена марка ВРТ-12.

Исследование основных свойств опытных партий материала ВРТ-12 показало соответствие предъявляемым требованиям: по горючести соответствует требованиям АП-25, Приложение F, Часть I; выдерживает избыточное давление 0,02 МПа; имеет низкое влагопоглощение 0,3% за 24 ч. Тканепленочный материал на 40% легче российского аналога – ткани прорезиненной невулканизированной 51-3Т-111, и превосходит аналог по разрывной нагрузке: по основе – на 51%, по утку – на 20%.

Полимерное покрытие ТПМ обеспечивает возможность термосваривания материала.

На основе полученных результатов материал рекомендован к опробованию в конструкции гибких трубопроводов СКВ для ЛА.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сатдинов Р.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Воздуховоды низкого давления из ПКМ в летательных аппаратах // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №8 (44). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-8-8.
2. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
6. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. Современные полимерные материалы для изготовления элементов системы кондиционирования воздуха в летательных аппаратах // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: сб. докл. конф. М.: ВИАМ, 2017. С. 16.
7. Ветрова Л.Е., Ионова В.Ф., Таскаева П.В., Титаренко А.Т., Шпаков В.П. Ткани с эластомерным покрытием для мягких оболочных конструкций. М.: Весь Сергиев Посад, 2012. 304 с.
8. Ultra-lightweight air distribution & insulation systems. URL: <http://www.senioraerospacebw.co.uk> (дата обращения: 15.02.2019).
9. Aeroduct. URL: <http://www.hbdthermoid.com> (дата обращения: 15.02.2019).
10. Herber Aircraft – a Flexfab Distributor. URL: <http://www.herberaircraft.com> (дата обращения: 15.02.2019).
11. High performance foam solutions for specialist markets worldwide. URL: <http://www.zotefoams.com> (дата обращения: 15.02.2019).
12. Прорезиненные ткани. URL: <http://www.niirp.com> (дата обращения: 15.02.2019).
13. Стеклоткани с силиконовым покрытием. URL: <http://www.chemproduct.ru> (дата обращения: 15.02.2019).

14. Нестерова Т.А., Барботько С.Л., Николаева М.Ф., Гертер Ю.А. Многослойный защитно-декоративный материал для декорирования деталей в салонах самолетов и вертолетов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал. 2013. №8. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2019).
15. Барботько С.Л. Развитие методов оценки пожаробезопасности материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 516–526. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526.
16. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.
17. Иванов М.С., Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Донских И.Н. Тканепленочный материал для изготовления гибких элементов системы кондиционирования воздуха в летательных аппаратах // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: сб. докл. конф. ВИАМ: Москва, 2018. С. 147.
18. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
19. Платонов М.М., Нестерова Т.А., Назаров И.А., Бейдер Э.Я. Пожаробезопасный материал на текстильной основе с полиуретановым покрытием для надувной оболочки спасательного трапа // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 50–54.
20. Венедиктова М.А., Наумов И.С., Чайкун А.М., Елисеев О.А. Современные тенденции в области фторсилоксановых и силоксановых каучуков и резин на их основе (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S3. С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-17-24.
21. Нестерова Т.А., Платонов М.М., Назаров И.А., Барботько С.Л. Исследования по разработке нового материала для баллонета пневматического трапа для аварийного покидания кабины вертолета // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал. 2016. №12 (48). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2019) DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-7-7.

УДК 667.648.17

*В.А. Кузнецова¹, В.В. Емельянов¹, С.А. Марченко¹, А.А. Силаева¹***ПРИМЕНЕНИЕ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ
ДЛЯ ЗАДЕЛКИ ДЕФЕКТОВ ЛИТЬЯ И ВЫРАВНИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ
НА ДЕТАЛЯХ И ИЗДЕЛИЯХ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-67-75

Рассмотрены наиболее функциональные шпатлевочные системы на основе эпоксидной полимерной системы, наполненной сферическим алюминиевым порошком. Проведены исследования влияния содержания металлического наполнителя в полученных композициях и его удельной поверхности на прочностные характеристики – прочность и относительное удлинение при разрыве. Определено влияние удельной поверхности наполнителя и режима отверждения композиции на физико-механические свойства шпатлевочного слоя, его твердость, а также стойкость к минеральному маслу ЛЗ-МГ-2.

Ключевые слова: металлополимерные композиции, шпатлевочные материалы, эпоксидные смолы, сферический алюминиевый порошок.

*V.A. Kuznetsova¹, V.V. Emelyanov¹, S.A. Marchenko¹, A.A. Silaeva¹***APPLICATION OF METALPOLYMERIC COMPOSITIONS
FOR SEAL OF CASTING DEFECTS AND SURFACE ALIGNMENT
ON DETAILS AND PRODUCTS OF AVIATION ENGINEERING**

In this work the most functional filling systems on the basis of the epoxy polymeric system filled with spherical aluminum powder are considered. Researches of influence of the maintenance of metal filler in the received compositions and its specific surface on strength characteristics – breaking strength and relative lengthening are carried. It has defined, also influence of specific surface of filler and mode of curing of composition on physicomechanical properties of filling layer, its hardness, and also resistance to mineral oil LZ-MG-2.

Keywords: metalpolymeric compositions, filling materials, epoxies, spherical aluminum powder.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Развитие высокоскоростной авиации предъявляет новые требования к качеству внешних поверхностей самолетов. Такие неизбежные элементы поверхности, как регламентированные зазоры определенной величины между торцами обшивок и панелей, нахлесточные соединения обшивок внешней поверхности изделия, выходящие на теоретический контур изделия, значительно ухудшают аэродинамические характеристики летательного аппарата [1–5].

При отливке деталей из алюминиевых сплавов типа АЛ5, АЛ9, ВАЛ5 и др. наряду с допустимыми дефектами литья встречаются отдельные поры и раковины глубиной 1–3 мм, которые по условиям работы деталей недопустимы, поскольку приводят к снижению сопротивления усталости металла и способствуют развитию коррозии [5–7].

Для выравнивания внешней поверхности летательных аппаратов (щелей, зазоров, ступенек), а также неровностей в местах крепежных соединений широко

применяются шпатлевочные материалы. Как правило, такие материалы являются высоконаполненными системами, на основе полимерных пленкообразующих веществ.

Шпатлевочные материалы, которые могут быть использованы для выравнивания внешней поверхности, а также заполнения дефектов литья, должны соответствовать следующим основным требованиям:

- легко наноситься на поверхность, заполняя углубления за минимальное количество технологических операций;
- обеспечивать надежное заполнение зазоров между деталями при минимальной усадке при отверждении;
- обеспечивать аэродинамические и декоративные свойства поверхности;
- хорошо обрабатываться технологическим инструментом;
- обладать высокой адгезией к металлу; устойчивостью к вибрации и перепадам температур от -60 до $+135^{\circ}\text{C}$, а также механической прочностью и эластичностью.

Следует отметить, что физико-механические свойства шпатлевочных материалов зависят как от химической природы полимерного пленкообразующего, так и от химической природы и структуры наполнителей.

В качестве полимерного пленкообразующего для создания шпатлевочных материалов могут использоваться низкомолекулярные диановые олигомеры или эпокси-кремнийорганические сополимеры, так как они не содержат летучих компонентов – в частности, растворителей, обуславливающих увеличение пористости и усадки при отверждении [8, 9].

Содержание наполнителей в шпатлевочных материалах колеблется в пределах от 1:3 до 1:5 и более. Такое высокое содержание наполнителей придает шпатлевочным материалам необходимые технологические свойства [10]. В качестве наполнителей при разработке шпатлевочных материалов чаще всего используют тальк, микротальк, оксиды различных металлов, а также слюду. Однако шпатлевочные материалы, содержащие вышеуказанные наполнители, обладают низкими механической прочностью и виброустойчивостью [8, 11].

Наиболее перспективным направлением при разработке шпатлевочных материалов является создание металлополимерных композиций, в которых в качестве наполнителя используется металлический сферический порошок. Металлополимерные композиции, выполняющие роль шпатлевочных материалов, могут быть использованы как для устранения дефектов литья (заделки пор и раковин) на деталях корпусов из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, так и для выравнивания внешней поверхности летательного аппарата с целью обеспечения заданных аэродинамических характеристик [12].

Помимо природы наполнителя его содержание в композиции и удельная поверхность могут значительным образом повлиять на важнейшие характеристики шпатлевочного материала, а именно – на прочность, эластичность, адгезию к подложкам и т. д. [10, 13–15].

Данная работа посвящена исследованию свойств металлополимерных композиций, используемых в качестве шпатлевочных материалов, и влияния характеристик наполнителя на эксплуатационные свойства таких композиций для выравнивания поверхности и заделки дефектов литья.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия», комплексная научная проблема 17.7. «Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [16].

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выбраны металлополимерные композиции на основе эпоксидных олигомеров с молекулярной массой от 360 до 470. Исследовали полимерные системы с разным содержанием алюминиевого порошка и различной удельной поверхностью ($S_{уд}$): 1550–1740 и 4870–5300 $\text{см}^2/\text{г}$. Алюминиевый порошок вводили в количестве 150, 200, 250 и 300% (по массе) в пересчете на полимерное пленкообразующее.

На основе вышеуказанных металлополимерных композиций получены свободные пленки для изучения их прочностных (σ_p) и деформационных (ϵ_p) характеристик в исходном состоянии и после термического старения при температуре 135°C. Механические свойства свободных пленок определяли на разрывной машине в соответствии с ГОСТ 18299–72 при скорости нагружения образца 5 мм/мин. Исследовано влияние продолжительности отверждения металлополимерных композиций на их твердость.

Исследованы адгезия к алюминиевому сплаву Д16-АТ Ан.Окс.нхр и физико-механические свойства в исходном состоянии и после искусственного старения по циклу ЛИ-14 при температурах $-60 \div +100^\circ\text{C}$ в течение 10 циклов согласно ММ1.595-15-133–2002. Метод испытаний лакокрасочных покрытий заключается в циклическом воздействии на испытываемый материал попеременно высокой влажности, а также отрицательных и повышенных температур. Один цикл испытаний соответствует воздействию: камеры влажности при $\phi=98 \pm 2\%$ и температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 16–16,5 ч; охлаждению при температуре -60°C в течение 1 ч; нагреву при температуре 135°C (или 80°C) в течение 2,5 ч; охлаждению при температуре -60°C в течение 1 ч, затем нагреву при температуре 135°C в течение 2,5 ч, охлаждению образцов в течение 15 мин. Твердость металлополимерной композиции определяли в соответствии с ГОСТ 5233–89, прочность при ударе – по ГОСТ 4765–73. Адгезию покрытия на основе металлополимерной композиции определяли в соответствии с ГОСТ 15140–78 методом параллельных надрезов в исходном состоянии и после увлажнения в течение 10 сут. Адгезионную прочность при нормальном отрыве ($\sigma_{адг}$) определяли по ГОСТ 27890–88, адгезионную прочность при сдвиге ($\tau_{сдв}$) – по ГОСТ 14759–69. Стойкость отвержденных металлополимерных композиций к действию синтетического масла ЛЗ-МГ-2 определяли при температурах 20 и 120°C по ГОСТ 9.403–80.

Результаты и обсуждение

Исследовано влияние удельной поверхности алюминиевого порошка и его содержания в полимерной матрице на механические свойства свободных пленок (σ_p и ϵ_p) в исходном состоянии и после термостарения при температуре 135°C в течение 300 ч. Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 1–3.

Таблица 1

**Свойства свободных пленок металлополимерных композиций
в исходном состоянии и после термостарения**

Алюминиевый порошок		Прочность при разрыве (σ_p), МПа			Удлинение при разрыве (ϵ_p), %			Толщина пленки, мкм
удельная поверхность $S_{уд}$, $\text{см}^2/\text{г}$	содержание, % (по массе)	в исходном состоянии	после термостарения	снижение прочности, %	в исходном состоянии	после термостарения	снижение удлинения при разрыве, %	
1550–1740	150	6,9	6,0	13,0	4,3	3,1	28	560–610
	200	7,5	6,7	10,7	4,0	2,7	32,5	460–510
	250	8,1	7,3	9,9	3,5	2,2	37	428–458
	300	8,4	7,6	9,5	3,0	1,6	46	410–440
4870–5300	150	7,3	6,6	9,6	3,9	2,7	30	570–620
	200	8,0	7,3	8,7	3,7	2,4	35	600–680
	250	8,4	7,7	8,3	3,3	1,7	48,5	435–445
	300	8,7	8,0	8,0	2,8	1,3	53,5	428–445

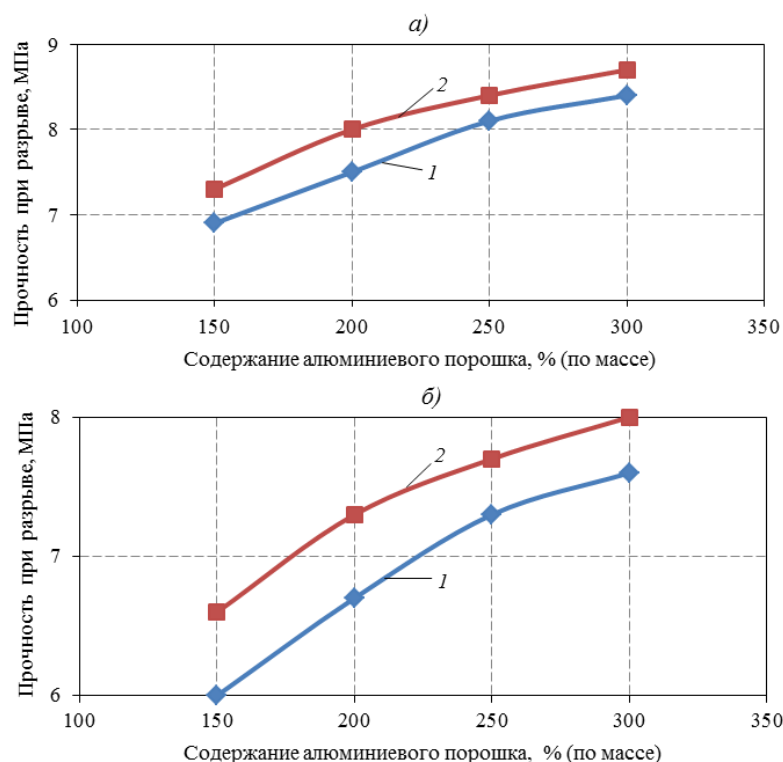


Рис. 1. Прочность при разрыве свободных пленок металлополимерных композиций из алюминиевого порошка с удельной поверхностью 1550–1740 (1) и 4870–5300 $\text{см}^2/\text{г}$ (2) в исходном состоянии (а) и после термостарения при температуре 135°C в течение 300 ч (б)

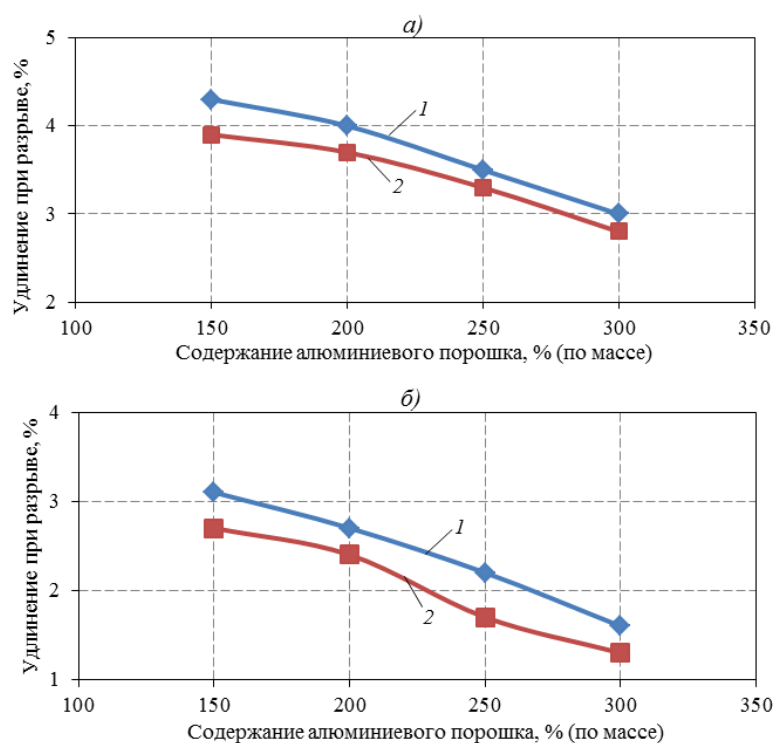


Рис. 2. Удлинение при разрыве свободных пленок металлополимерных композиций из алюминиевого порошка с удельной поверхностью 1550–1740 (1) и 4870–5300 $\text{см}^2/\text{г}$ (2) в исходном состоянии (а) и после термостарения при температуре 135°C в течение 300 ч (б)

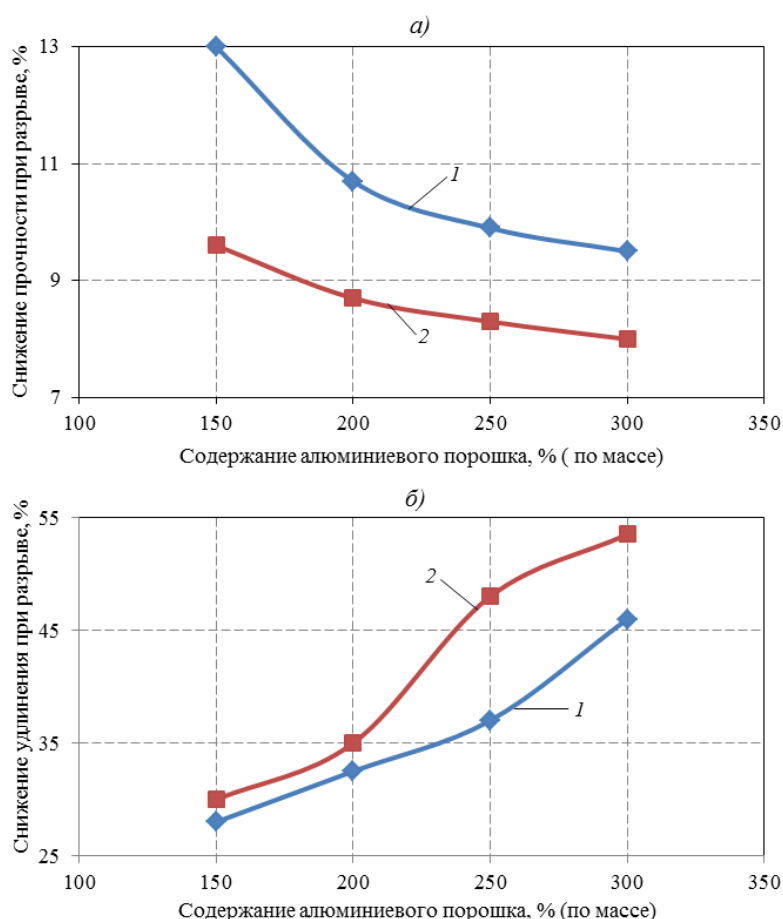


Рис. 3. Снижение прочности (а) и удлинения (б) при разрыве после термостарения при температуре 135°C в течение 300 ч пленок металлополимерных композиций из алюминиевого порошка с удельной поверхностью 1550–1740 (1) и 4870–5300 см²/г (2)

Из полученных результатов следует, что удельная поверхность алюминиевого порошка мало влияет на прочностные и деформационные характеристики свободных пленок металлополимерных композиций. С увеличением содержания алюминиевого порошка в полимерной матрице со 150 до 300% (по массе), независимо от его удельной поверхности, прочность при разрыве (σ_p) монотонно возрастает, при этом удлинение при разрыве (ϵ_p) монотонно снижается.

Старение свободных пленок металлополимерных композиций при температуре 135°C в течение 300 ч приводит к незначительному снижению прочности при разрыве, при этом следует отметить, что с увеличением содержания алюминиевого порошка в полимерной композиции процент снижения прочности при разрыве (σ_p) монотонно снижается (рис. 3). Причем наиболее интенсивно происходит уменьшение процента снижения прочности при разрыве для композиций, содержащих алюминиевый порошок с $S_{уд}=1550\text{--}1740\text{ см}^2/\text{г}$. При содержании алюминиевого порошка от 150 до 200% (по массе) снижение прочности составляет 2,3%, затем наблюдается снижение интенсивности изменения процента уменьшения прочности при разрыве. Аналогичные тенденции снижения прочности при разрыве наблюдаются для металлополимерных композиций, содержащих алюминиевый порошок с $S_{уд}=4870\text{--}5300\text{ см}^2/\text{г}$.

Старение свободных пленок металлополимерных композиций при температуре 135°C также влияет и на удлинение при разрыве, которое характеризует эластичность

металлополимерных композиций. Увеличение содержания алюминиевого порошка в полимерной матрице приводит к монотонному снижению эластичности (удлинению при разрыве), при этом следует отметить, что наиболее интенсивно уменьшение удлинения при разрыве наблюдается при содержании алюминиевого порошка $>200\%$ (по массе).

Из полученных результатов следует, что увеличение содержания алюминиевого порошка в полимерной матрице приводит к увеличению прочности при разрыве (σ_p) и снижению удлинения при разрыве (ϵ_p), наиболее интенсивное снижение которого происходит при содержании алюминиевого порошка в полимерной матрице $>200\%$ (по массе), независимо от удельной поверхности вводимого в полимер алюминиевого порошка.

Адгезионные и физико-механические свойства металлополимерных композиций на основе эпоксидных олигомеров в значительной степени зависят от режима их отверждения. Режимы отверждения и физико-механические свойства металлополимерных композиций с содержанием порошка 200% (по массе), но с различной удельной поверхностью наполнителя приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Зависимость адгезионных и физико-механических свойств
металлополимерных композиций от режима отверждения**

Удельная поверхность $S_{уд}$, $см^2/г$	Режим отверждения		Адгезия, балл, по ГОСТ 15140–78*		Твердость, отн. ед.	Прочность при сдвиге, МПа
	температура, $^{\circ}C$	продолжитель- ность, ч	в сухом состоянии	после 10 сут увлажнения		
1550–1740	20 $\pm$ 2	24	1 ₁	2 ₁	0,23	8,2
	20 $\pm$ 2	48	1 ₁	2 ₁	0,43	10,3
	120	3	1 ₁	2 ₁	0,57	11,5
4870–5300	20 $\pm$ 2	24	2 ₁	3 ₁	0,2	7,7
	20 $\pm$ 2	48	2 ₁	2 ₁	0,4	7,9
	120	3	1 ₁	2 ₁	0,53	10,2

* При определении адгезии покрытия на основе металлополимерной композиции методом параллельных надрезов металлополимерные композиции наносили на образцы сплава Д16-АТ Ан.Окс.нхр, окрашенные грунтовкой ВГ-28.

Анализ полученных результатов показал, что на адгезионные и механические свойства, а также твердость металлополимерных композиций существенное влияние оказывают режимы их отверждения. Наиболее высокими адгезионными и механическими свойствами, а также твердостью обладают металлополимерные композиции, отвержденные при температуре 120 $^{\circ}C$ в течение 3 ч. Следует отметить, что металлополимерные композиции, содержащие алюминиевый порошок с удельной поверхностью 1550–1740 $см^2/г$, при одинаковых режимах отверждения обладают более высокой твердостью, прочностью при сдвиге, а также адгезией.

Исследовано влияние удельной поверхности алюминиевого порошка и температуры отверждения металлополимерных композиций с содержанием металлического порошка 200% (по массе) на стойкость к действию синтетического масла ЛЗ-МГ-2. На рис. 4 приведены кинетические кривые изменения массы (набухания) металлополимерных композиций при испытании в синтетическом масле ЛЗ-МГ-2 при температурах 20 и 120 $^{\circ}C$. Из полученных результатов следует, что процесс набухания металлополимерных композиций в синтетическом масле существенно зависит от режимов отверждения композиций. При температуре испытания 20 $^{\circ}C$ набухание металлополимерных композиций практически не зависит от удельной поверхности алюминиевого порошка (кривые практически совпадают). Через 30 сут испытаний наступает равновесное состояние, для композиции с удельной поверхностью 1550–1740 $см^2/г$ набухание составило 0,1%, для композиции с удельной поверхностью 4870–5300 $см^2/г$ набухание

составило 0,12%. При температуре 120°C набухание металлополимерной композиции возрастает и существенно зависит от удельной поверхности алюминиевого порошка. Для композиции, содержащей алюминиевый порошок с $S_{уд}=1550\text{--}1740\text{ см}^2/\text{г}$, максимальное значение набухания в масле ЛЗ-МГ-2 составляет 0,78%, равновесное состояние достигается через 30 сут. Для композиции, содержащей алюминиевый порошок с $S_{уд}=4870\text{--}5300\text{ см}^2/\text{г}$, набухание в масле ЛЗ-МГ-2 протекает более интенсивно, максимальное значение набухания составляет 1,5%, равновесное состояние достигается через 40 сут. Можно предположить, что алюминиевый сферический порошок с $S_{уд}=1550\text{--}1740\text{ см}^2/\text{г}$ способствует образованию более плотной структуры.

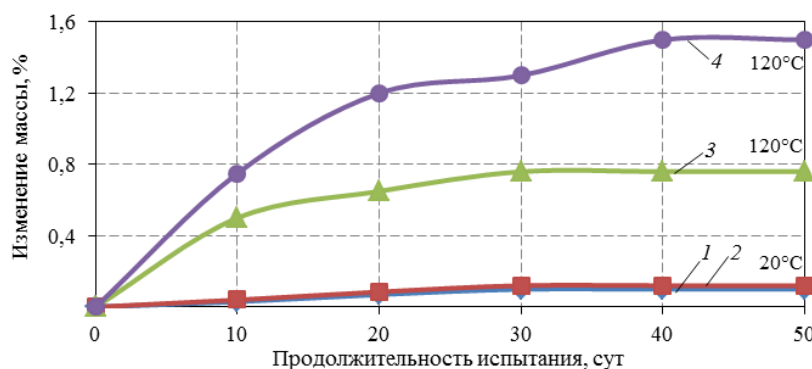


Рис. 4. Кинетика изменения массы металлополимерных композиций с содержанием 200% (по массе) алюминиевого порошка с удельной поверхностью 1550–1740 (1, 3) и 4870–5300 $\text{см}^2/\text{г}$ (2, 4) при испытании в масле ЛЗ-МГ-2 при температурах 20 и 120°C

В табл. 3 приведены результаты исследований адгезионных и физико-механических свойств металлополимерной композиции (на основе дианового эпоксидного олигомера), содержащей алюминиевый порошок с удельной поверхностью 1550–1740 $\text{см}^2/\text{г}$, в исходном состоянии и после искусственного старения по циклу ЛИ-14 при температурах $-60\div+100^\circ\text{C}$ в течение 10 циклов.

Таблица 3

**Адгезионные и физико-механические свойства покрытий
на основе металлополимерной композиции**

Режимы отверждения		Адгезионная прочность $\sigma_{адг}$, МПа	Прочность при сдвиге $\tau_{сдв}$, МПа	Физико-механические свойства	
температура, °С	продолжительность, ч			прочность при ударе, Дж	прочность при растяжении, мм
В исходном состоянии					
20±2	24	4,12	9,2	5,0	2,2
20±2	48	4,6	10,3	5,0	2,4
120	3	5,8	11,5	5,0	2,5
После цикла ЛИ-14 при старении при температурах -60÷+100°С					
20±2	24	5,1	11,0	5,0	2,0
20±2	48	5,2	10,9	5,0	2,1
120	3	5,0	10,8	5,0	2,1

Из полученных результатов следует, что металлополимерная композиция обладает достаточно высокими физико-механическими свойствами, адгезионной прочностью при нормальном отрыве ($\sigma_{адг}$), а также при сдвиге ($\tau_{сдв}$) как в исходном состоянии, так и после искусственного старения по циклу ЛИ-14 при температурах $-60\div+100^\circ\text{C}$ в течение 10 циклов. Искусственное старение не приводит к существенному снижению

прочностных характеристик металлополимерных композиций. Применение искусственной сушки при отверждении металлополимерной композиций при температуре 120°C в течение 2 ч способствует повышению адгезионной прочности при нормальном отрыве на 40%, а при сдвиге – на 25%.

Следует отметить, что разработанные металлополимерные композиции, содержащие оптимальное количество (200% (по массе)) сферического алюминиевого порошка, достаточно технологичны, легко наносятся шпателем, разравниваются и после сушки обрабатываются различными механическими инструментами, в частности фрезой.

Заключения

Проведенные исследования показали, что металлополимерные композиции на основе диановых эпоксидных олигомеров, содержащие оптимальное количество сферического алюминиевого порошка с удельной поверхностью 1550–1740 см²/г, обладают высокими адгезионными, физико-механическими, а также технологическими свойствами и могут быть использованы в качестве шпатлевки для выравнивания поверхности и заделки дефектов литья.

Сопоставляя результаты, полученные при исследовании металлополимерных композиций, можно сделать следующие выводы:

- свойства металлополимерных композиций – прочность (σ_p) и удлинение (ϵ_p) при разрыве – зависят от содержания алюминиевого порошка в композиции и не зависят от его удельной поверхности;
- адгезионные и физико-механические свойства, прочность при сдвиге, устойчивость к синтетическому маслу ЛЗ-МГ-2 металлополимерных композиций зависят от режима их отверждения и удельной поверхности алюминиевого порошка.

Металлополимерные композиции, выполняющие роль шпатлевочных материалов, могут быть использованы как для устранения дефектов литья (заделки пор и раковин) на деталях корпусов из алюминиевых, магниевых и титановых сплавов, так и для выравнивания внешней поверхности летательного аппарата в целях обеспечения заданных аэродинамических характеристик.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ФГУП «ВИАМ» Г.Г. Шаповалову, Н.Н. Иванниковой и Н.А. Коврижкиной за помощь в изготовлении металлополимерных композиций, а также за обсуждение результатов и объективную критику при написании данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 520 с.
2. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Перспективные алюминиевые сплавы и технологии их соединения для изделий авиакосмической техники // Тез. докл. 2-й Междунар. конф. «Алюминий-21. Сварка и пайка». СПб., 2012. Ст. 8 (CD).
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
4. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
5. Шавнев А.А., Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В. Методы соединения алюминиевых композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 35–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-35-42.

6. Жиликов В.П., Каримова С.А., Лешко С.С., Чесноков Д.В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытании в камере солевого тумана (КСТ) // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №4. С. 18–22.
7. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
8. Кондрашов Э.К., Кузнецова В.А., Семенова Л.В., Лебедева Т.А. Основные направления повышения эксплуатационных, технологических и экологических характеристик лакокрасочных покрытий для авиационной техники // *Российский химический журнал*. 2010. Т. LIV. №1. С. 96–102.
9. Еськов А.А., Лебедева Т.А., Белова М.В. Лакокрасочные материалы с пониженным содержанием летучих веществ (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №6. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-6-8-8.
10. Герасимова Л.Г., Скороходова О.Н. Наполнители для лакокрасочной промышленности. М.: ЛКМ-пресс, 2010. 224 с.
11. Кузнецова В.А., Кузнецов Г.В., Шаповалов Г.Г. Исследование влияния молекулярной массы эпоксидной смолы на адгезионные, физико-механические свойства и эрозионную стойкость покрытий // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №8. Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения: 01.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-8-8.
12. Павлюк Б.Ф. Основные направления в области разработки полимерных функциональных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 388–392. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-388-392.
13. Нарисава И. Прочность полимерных материалов. Пер. с японского. М.: Химия, 1987. 364 с.
14. Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С., Хвацкий К.К. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 527–546. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-527-546.
15. Металлополимерная композиция: пат. 2618031С1 Рос. Федерация; заявл 02.06.16; опубл. 02.05.17.
16. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

УДК 543.456:621.793

В.С. Денисова¹, С.Л. Лонский¹, Е.В. Куршев¹, Г.А. Малинина¹

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ РЕАКЦИОННООТВЕРЖДАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-76-87

Создание реакционноотверждаемых покрытий является перспективным направлением развития в области жаростойких стеклоэмалевых покрытий для защиты жаропрочных никелевых сплавов и коррозионностойких сталей. Особенностью реакционноотверждаемых покрытий является возможность их формирования при температурах, близких к рабочим. В данной работе методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа исследована структура реакционноотверждаемых покрытий на сплаве ВЖ171 и особенности ее формирования в процессе высокотемпературного обжига и эксплуатации.

Ключевые слова: стекло, тетраборид кремния, структура, никелевые сплавы, высокотемпературная газовая коррозия, реакционное отверждение.

V.S. Denisova¹, S.L. Lonskii¹, E.V. Kurshev¹, G.A. Malinina¹

INVESTIGATION OF STRUCTURE FORMATION OF REACTION CURED COATINGS BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

The design of reaction cured coatings is the advanced direction of development in the area of heat resistant glass enamel coatings for heat resistant nickel alloys and corrosion resistant steel. The advantage of reaction cured coatings is their ability of curing those at temperatures close to operating ones. In this work the structure and its specialities while high temperature forming and exploitation are investigated by scanning electron microscopy and electron probe microanalysis.

Keywords: glass, silicon tetraboride, structure, nickel alloys, hot corrosion, reaction cure.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

К деталям газотурбинных двигателей предъявляются повышенные требования по надежности и ресурсу эксплуатации. Для защиты теплонагруженных ответственных деталей горячего тракта газотурбинных двигателей применяются высокотемпературные жаростойкие покрытия, призванные обеспечить защиту металлов от высокотемпературной газовой коррозии, происходящей под действием газовой среды, а также продуктов сгорания топлива [1–4].

Среди высокотемпературных покрытий широкое внедрение получили жаростойкие эмали. Спрос на этот вид покрытий обусловлен рядом их очевидных преимуществ: высокая адгезия к защищаемому сплаву благодаря формированию при обжиге

промежуточного слоя «металл–покрытие», относительная простота технологии и отсутствие необходимости применения специальных энергозатратных установок, возможность нанесения шликера покрытия на крупногабаритные заготовки с обеспечением высокого качества покрытия на всех доступных для нанесения областях [5]. Жаростойкие эмали содержат недефицитные отечественные компоненты, что обеспечивает их невысокую стоимость. Шликерно-обжиговая технология нанесения жаростойких эмалей обеспечивает получение плотных, беспористых, прочно сцепленных с подложкой покрытий. Так, жаростойкое покрытие типа ЭВК широко применяется для защиты деталей из никелевых сплавов (ЭП648 и др.) практически во всех отечественных газотурбинных двигателях.

В настоящее время создаются и внедряются в конструкцию авиационных двигателей нового поколения современные материалы, такие как жаропрочные никелевые сплавы на основе систем Ni–Cr и Ni–Co–Cr [6]. В целях получения стабильной упрочненной структуры применяются процессы химико-термической обработки, в том числе азотирование или комбинированные методы [7]. Работоспособность новых жаропрочных свариваемых никелевых сплавов обеспечивается при температурах вплоть до 1200–1250°C [8].

Отечественные жаростойкие эмали на основе традиционных композиций уже не могут обеспечить потребность в защите никелевых сплавов при столь высоких температурах – так, эмали типа ЭВК работоспособны длительно только до 1000°C, стеклокерамические покрытия типа ВЭС – до 1100°C. Задача осложняется тем, что обжиг жаростойких эмалей проводят при температурах, превышающих рабочие на 150–300°C. Соответственно, обжиг тугоплавких эмалевых композиций при температурах 1400–1500°C неизбежно приведет к короблению тонкостенных деталей, разупрочнению защищаемого сплава и потере его механических свойств.

В решении данной задачи необходимо применить опыт научно-технических изысканий в области создания эрозионностойких терморегулирующих покрытий для плиточной теплозащиты орбитального корабля «Буран» [9–14]. Эксплуатация агрегата стала возможной благодаря применению специальной волокнистой высокопористой теплозащиты и «черных» эрозионностойких покрытий с высокой излучательной способностью и способностью обеспечить защиту от проникновения влаги воздуха. Одним из основных преимуществ данных покрытий является температура обжига, практически равная температуре эксплуатации. Обеспечить снижение температуры формирования покрытий позволяет введение добавки тетраборида кремния – достаточно тугоплавкого соединения, окисляющегося при термической обработке с образованием легкоплавкого боросиликатного стекла. К эрозионностойким покрытиям применяется термин «реакционноотверждаемые», что достаточно описывает их особенность – формирование при температурах, близких к рабочим при одновременном повышении температуростойчивости. К реакционноотверждаемым стеклам и покрытиям не могут быть применены традиционные представления о стекле как о материале, не имеющем температурной точки плавления и способном при нагревании до высокой температуры к постепенному уменьшению вязкости и переходу из твердого состояния в вязкотекучее и жидкое состояния, а при охлаждении с высоких до комнатной температуры обратимо увеличивать вязкость и затвердевать. Реакционноотверждаемые стекла и покрытия при нагревании постепенно размягчаются, их компоненты взаимодействуют между собой, а при достижении высоких температур данные материалы приобретают нехарактерную для силикатных стекол структуру и достаточно высокую вязкость или затвердевают.

Достаточно изучены эксплуатационные свойства эрозионностойких покрытий для плиточной теплозащиты, однако особенности структурных превращений, протекающих в покрытиях в процессе обжига и эксплуатации, до настоящего времени не исследованы.

На основании вышеизложенного, перспективным направлением разработки новых жаростойких покрытий для жаропрочных никелевых сплавов является разработка композиций реакционноотверждаемых покрытий с добавкой тетраборида кремния. Требуется изучение процессов формирования и структурообразования при обжиге данных покрытий с целью выявления закономерностей формирования структуры покрытий для создания новых жаростойких стеклокерамических покрытий, работоспособных при температурах 1200–1250°C.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбраны экспериментальные композиции реакционноотверждаемых покрытий на основе стекла барийалюмосиликатной системы, являющегося матрицей покрытия, составляющего его основу и определяющего его общую тугоплавкость. Данный вид стекла изготавливается в промышленных условиях и применяется в составе покрытий типа ЭВК. При совмещении компонентов в помол вводили тетраборид кремния (SiB_4) в количестве от 1 до 5% (по массе). Дополнительно изготавливали и вводили в помол модифицирующее стекло стехиометрического состава $\text{BaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ (формула соответствует кристаллическому соединению цельзиан) путем высокотемпературной варки с грануляцией в воду. Модифицирующее стекло вводили в состав исследуемых композиций в количестве от 0 до 15% (по массе). Эффективность применения модифицирующей добавки заключается в повышении тугоплавкости композиции покрытия, так как введение только тетраборида кремния не обеспечивает достаточную жаростойкость при температуре испытаний 1200°C [15].

Исследуемым композициям присваивали обозначения по соотношению в них исходных компонентов – так, покрытие марки 80-15-5 содержит 80% (по массе) матричного барийалюмосиликатного стекла, 15% (по массе) модифицирующего стекла и 5% (по массе) тетраборида кремния.

Покрытия наносили на поверхность образцов из сплава ВЖ171 по штатной шликерно-обжиговой технологии.

Покрытия и исходные компоненты исследовали методом сканирующей электронной микроскопии с помощью прибора TESCAN VEGA 3 XMU. Рентгеноспектральный микроанализ проводили на энергодисперсионном детекторе X-MAX 50 STANDARD. Количественную обработку полученных структур проводили с применением программного обеспечения анализа изображений ImageScope Color.

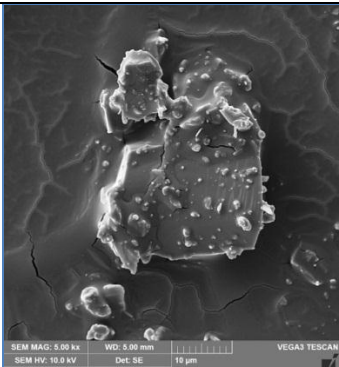
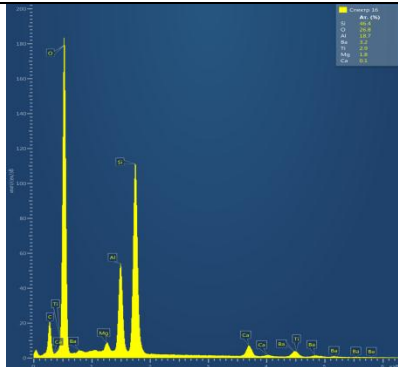
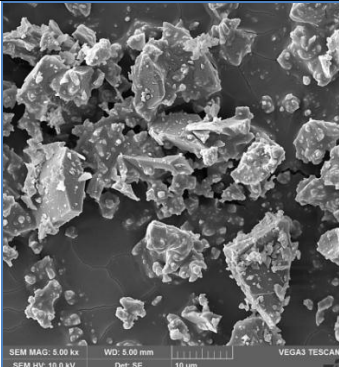
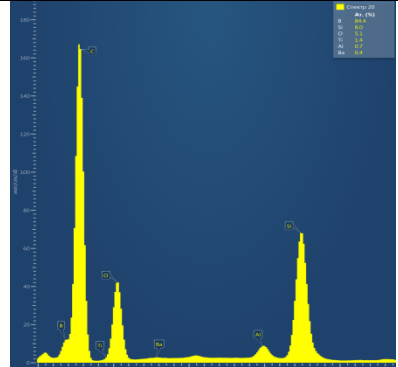
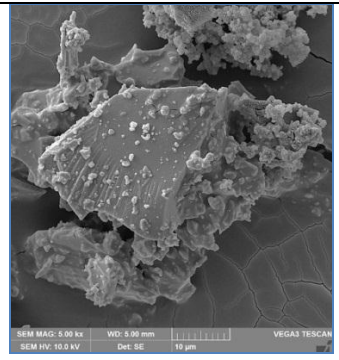
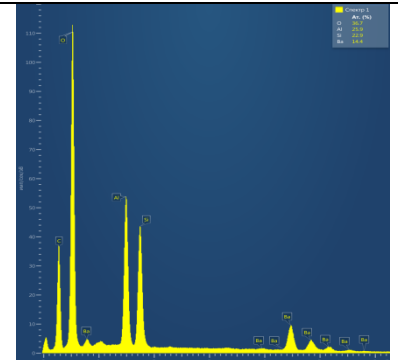
На поверхность токопроводящей ленты на основе углерода, приклеенной к держателю для образцов, наносили образцы исходных компонентов исследуемых покрытий. С помощью токопроводящей углеродной ленты к держателям образцов приклеивали образцы покрытий. Затем в установке для ионно-плазменного травления JFC-1100 (фирма Jeol) образцы покрытия подвергали травлению в течение 5 мин. На поверхность образцов и покрытий для микроструктурных исследований методом магнетронного напыления в вакуумной установке Q150R ES (фирма Quorum Technologies) наносили слой золота толщиной 20 нм. Для рентгеноспектрального микроанализа в установке магнетронного напыления наносили слой углерода толщиной 25 нм.

Результаты и обсуждение

Аттестация исходных компонентов

С целью обеспечения дальнейшей идентификации фаз при изучении образцов покрытий исследованы их исходные компоненты. Для исследования отбирали подготовленные пробы в соответствии с требованиями технических условий. Результаты исследований представлены в таблице.

Микроструктуры и спектры поверхности частиц исходных компонентов

Компонент	Микроструктура (×5000)	Спектр поверхности
Матричная фритта		
Тетраборид кремния		
Модифицирующая фритта		

В матричной фритте можно выделить две фракции частиц – более крупных с многогранной неправильной формой и мелких округлых частиц с размером на порядок меньше частиц крупной фракции ($S_{cp}=150 \text{ мкм}^2$ и $S_{cp}=0,94 \text{ мкм}^2$ соответственно). Соответственно, при высокотемпературном обжиге начальной стадией будет являться оплавление мелких частиц, способствующих началу оплавления более крупных частиц. Спектр поверхности матричной фритты позволяет выявить присутствие таких элементов, как Si, Al, O, Ba, Ca, Ti, Mg.

Частицы тетраборида кремния имеют в целом схожую многоугольную форму и близкие размеры частиц. Спектр поверхности свидетельствует о наличии в исследуемых образцах бора в количестве 84,4% (атомн.), кремния 8% (атомн.) и незначительного количества кислорода и титана.

Элементный анализ частиц модифицирующей фритты указывает на отсутствие в исследуемых образцах примесных элементов и позволяет идентифицировать интенсивные пики кислорода, алюминия, кремния и несколько пиков бария.

Исследование структуры покрытия в процессе высокотемпературного обжига

Для выявления структурных превращений, протекающих в процессе высокотемпературного обжига, изготовлены образцы реакционноотверждаемых покрытий на никелевом сплаве ВЖ171 размером $10 \times 10 \times 1,25$ мм с целью исследования методом сканирующей электронной микроскопии. Образцы обжигали при соответствующих для каждого состава температурах обжига в течение: 1; 1,5; 2 и 3 мин – для выявления процессов, происходящих непосредственно на каждой стадии формирования.

Необходимо отметить затруднения при пробоподготовке образцов с выдержкой при высокотемпературном формировании в течение 1 мин – при столь малой выдержке отсутствовало сцепление покрытия с защищаемым материалом, так как за столь короткий промежуток времени не образуется достаточный слой окалины на поверхности металлической подложки. При этом покрытие остлаивается полностью, поскольку слой уже достаточно плотно спечен.

На рис. 1–7 приведены микроструктуры образцов реакционноотверждаемых покрытий составов: 99-0-1, 89-10-1, 97-0-3, 87-10-3, 95-0-5, 85-10-5 и 80-15-5. Данные составы имеют наиболее выраженные структурные особенности, характерные для исследованных составов (всего 20 композиций).

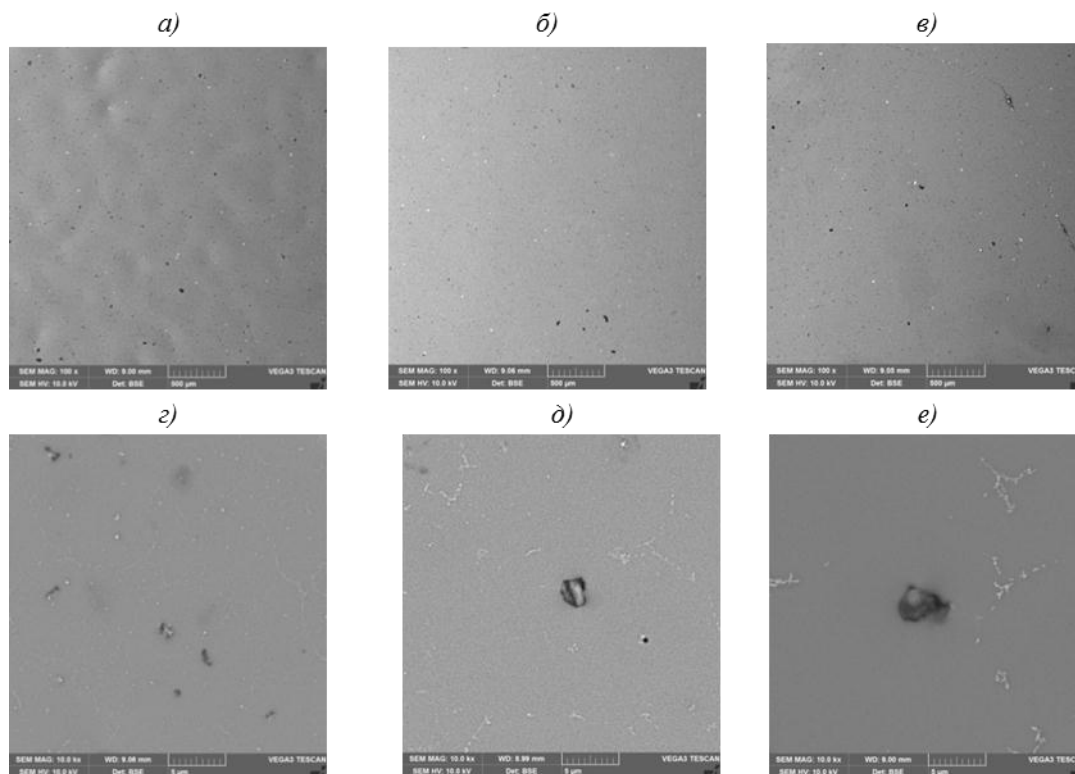


Рис. 1. Микроструктуры (а–в – $\times 100$; г–е – $\times 10000$) образцов покрытия 99-0-1 после обжига в течение 1,5 (а, г); 2 (б, д) и 3 мин (в, е)

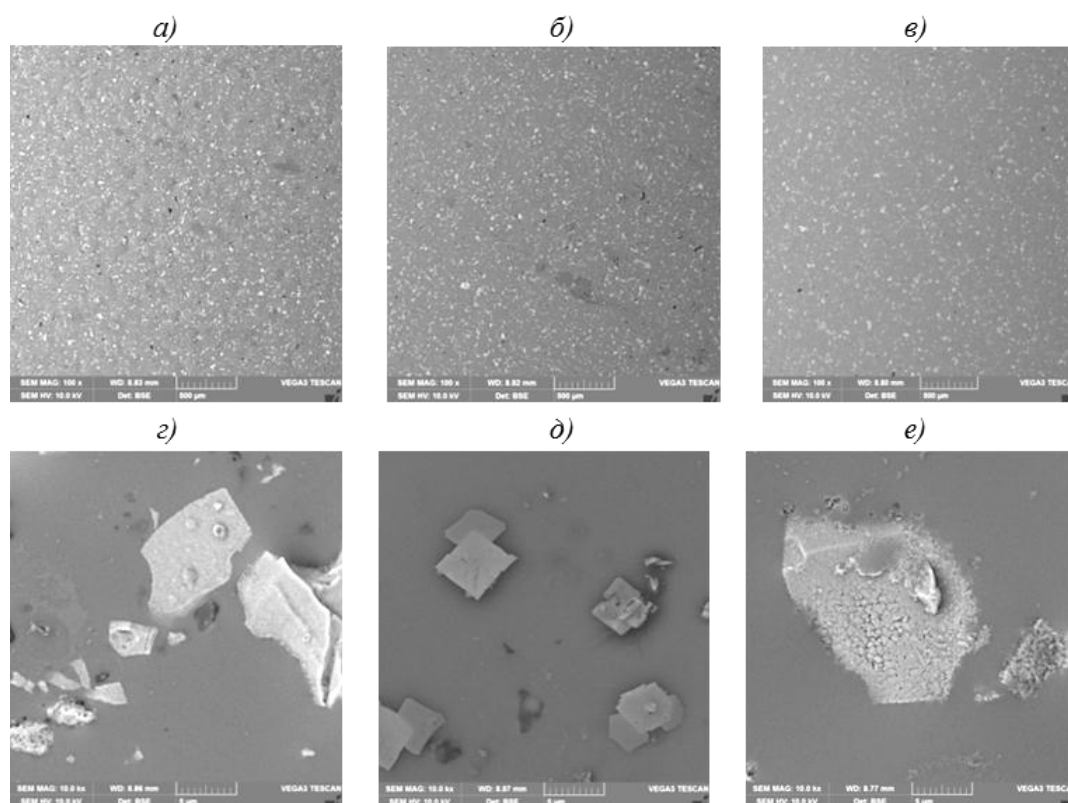


Рис. 2. Микроструктуры (*а–в* – $\times 100$; *г–е* – $\times 10000$) образцов покрытия 89-10-1 после обжига в течение 1,5 (*а, г*); 2 (*б, д*) и 3 мин (*в, е*)

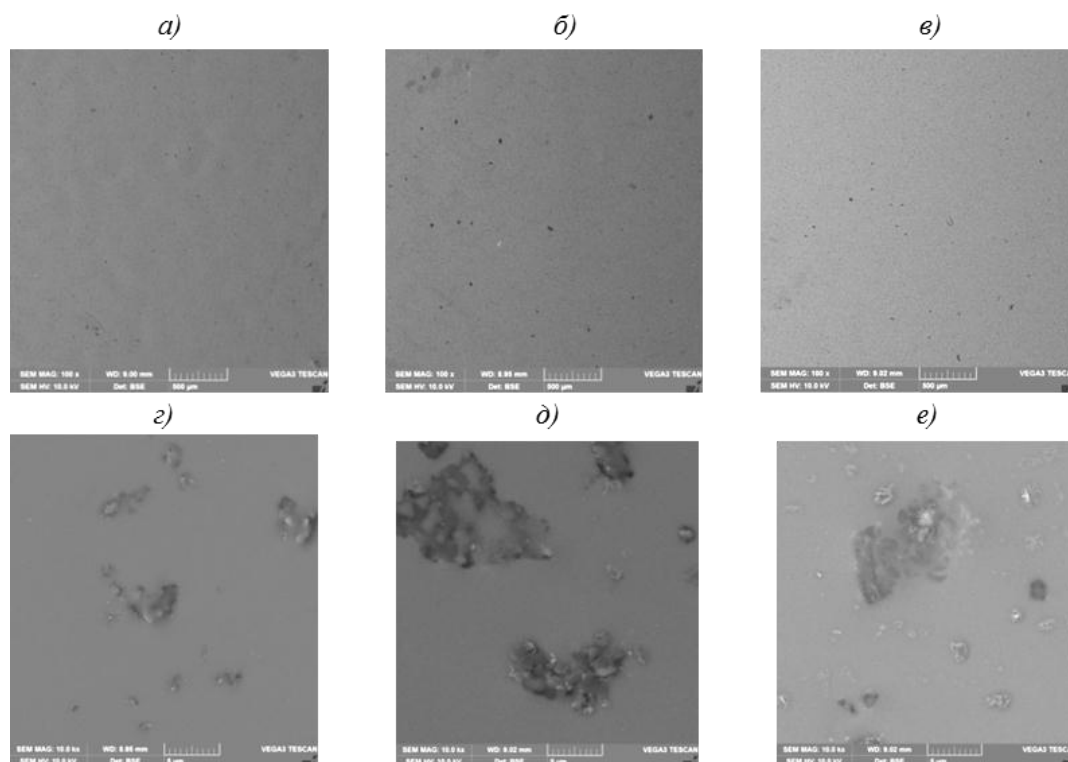


Рис. 3. Микроструктуры (*а–в* – $\times 100$; *г–е* – $\times 10000$) образцов покрытия 97-0-3 после обжига в течение 1,5 (*а, г*); 2 (*б, д*) и 3 мин (*в, е*)

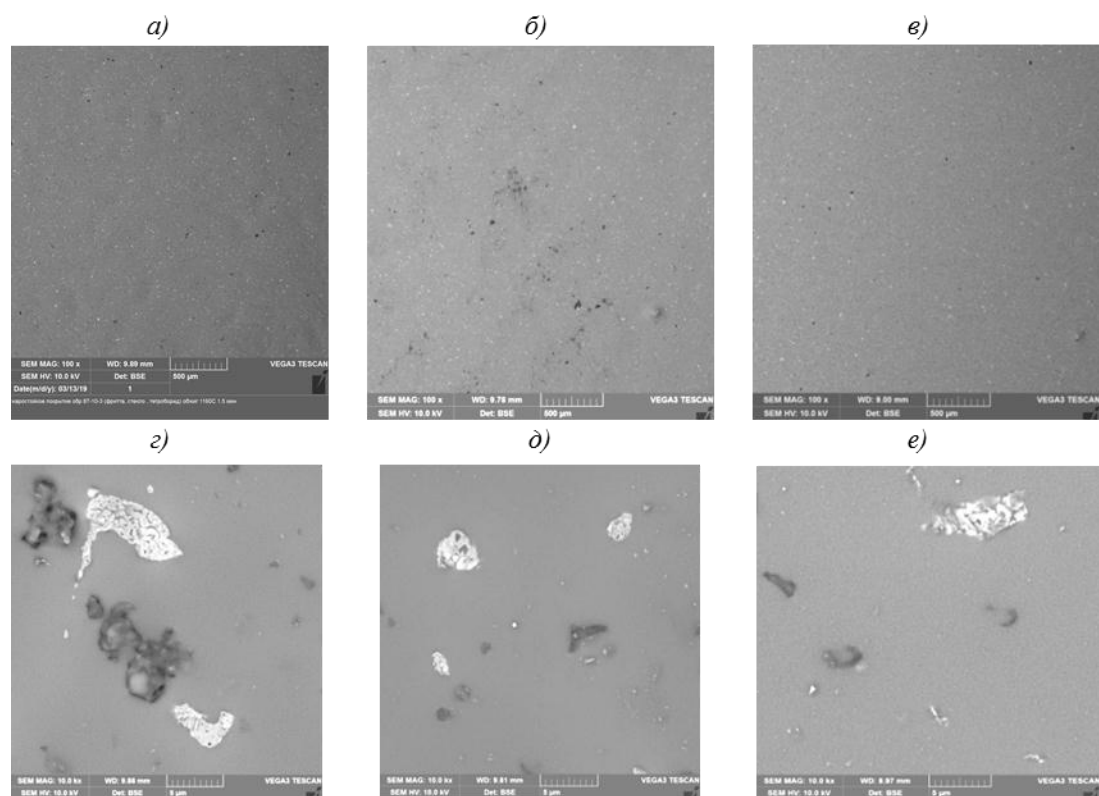


Рис. 4. Микроструктуры (а–в – $\times 100$; г–е – $\times 10000$) образцов покрытия 87-10-3 после обжига в течение 1,5 (а, г); 2 (б, д) и 3 мин (в, е)

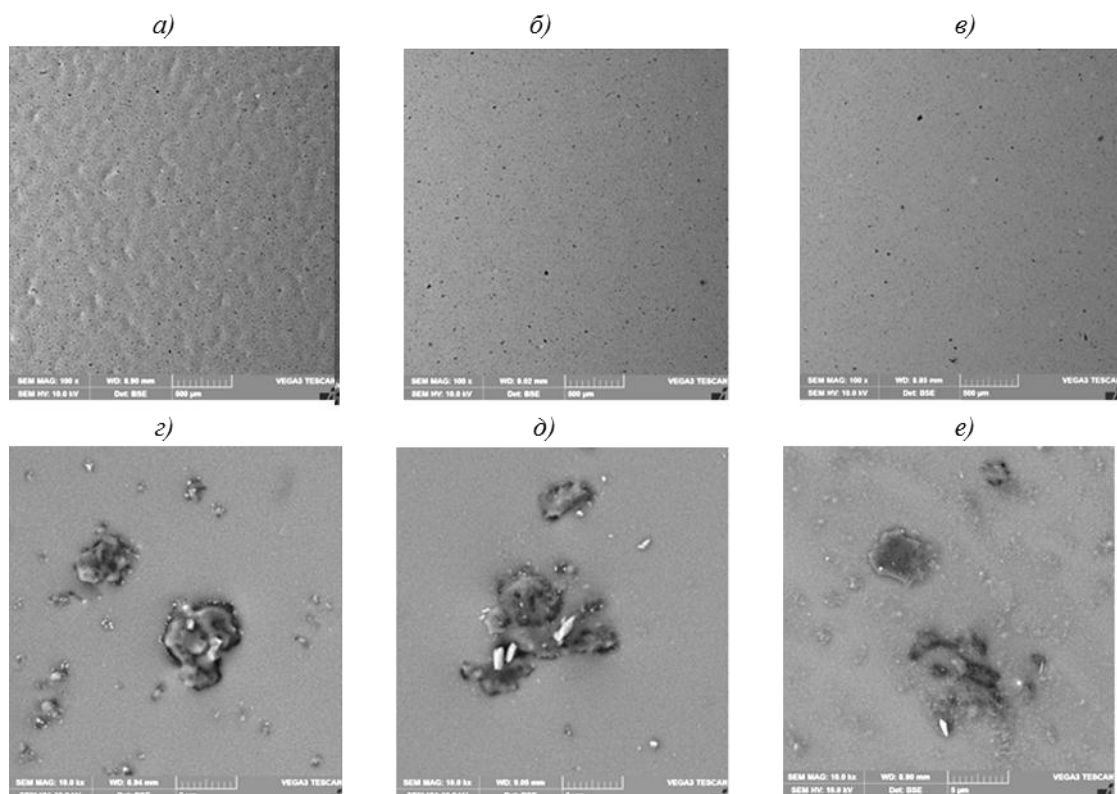


Рис. 5. Микроструктуры (а–в – $\times 100$; г–е – $\times 10000$) образцов покрытия 95-0-5 после обжига в течение 1,5 (а, г); 2 (б, д) и 3 мин (в, е)

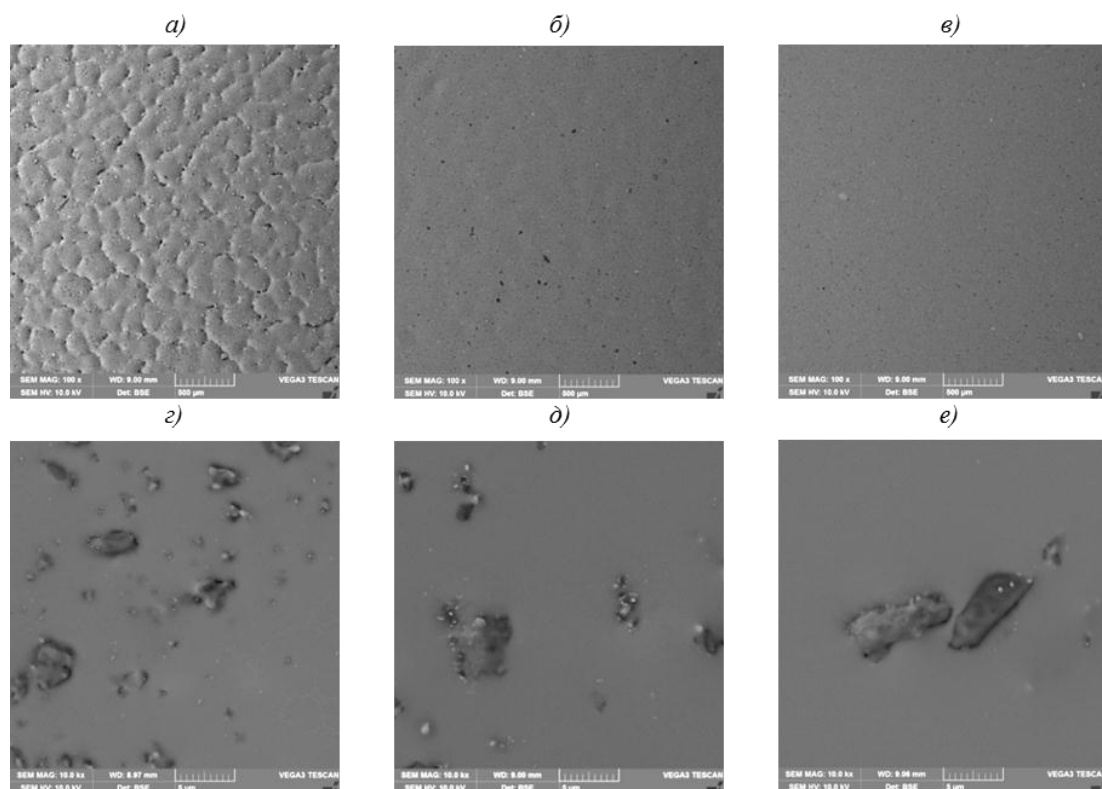


Рис. 6. Микроструктуры ($a-f - \times 100$; $d-f - \times 10000$) образцов покрытия 85-10-5 после обжига в течение 1,5 (a, d); 2 (b, e) и 3 мин (c, f)

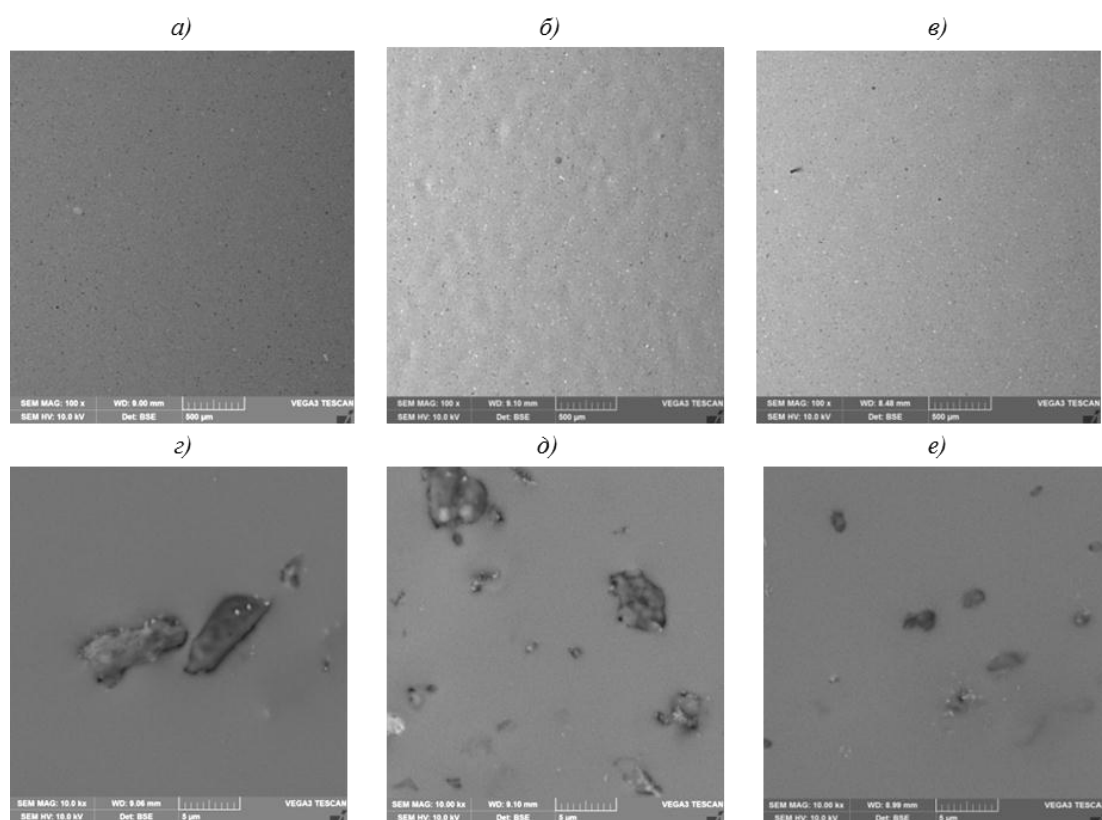


Рис. 7. Микроструктуры ($a-f - \times 100$; $d-f - \times 10000$) образцов покрытия 80-15-5 после обжига в течение 1,5 (a, d); 2 (b, e) и 3 мин (c, f)

Для изучения микроструктуры наиболее информативным являлся режим отраженных электронов (BSE – Back-Scattered Electron), так как контраст изображений зависит не только от рельефа образца, но и от электронной плотности, что позволяет идентифицировать структурные элементы покрытий.

Все исследованные покрытия достаточно хорошо сформировались после 3 мин термообработки – имели плотную стеклянную огнеполированную поверхность без видимых дефектов. Формирование поверхности покрытия ($\times 100$) проходит через несколько стадий: на начальной стадии в процессе термообработки в течение 1,5 мин образуется ориентированная волнообразная фазовая макроструктура, далее на последующих стадиях после 2 мин и более поверхность покрытия сглаживается вследствие растекания расплава покрытия, формируется плотный защитный слой.

Структура исследуемых составов, содержащих 1% (по массе) тетраборида кремния, характерна для жаростойких эмалей без добавок, так как на всех образцах наблюдаются цепочечные начальные агломерированные структуры. С увеличением продолжительности выдержки при обжиге агломераты уменьшаются, очевидно растворяясь в расплаве покрытия. Элементный микроанализ показывает, что такие цепочки содержат соединения кремния, кристаллизующиеся при обжиге из покрытия. Особенно заметны кристаллические образования правильной формы на микроструктуре образца 89-10-1 после 2 мин выдержки при увеличении $\times 10000$. Чаще всего кристаллические образования представляют силикаты или алюмосиликаты бария.

На всех микроструктурах покрытий обнаружены неоднородности, имеющие неправильную форму и размеры. Содержание таких частиц в конкретном случае не зависит от продолжительности термообработки, а только от состава, увеличиваясь с ростом содержания тетраборида кремния в исследуемых композициях. Размер включений варьируется от 0,8 до 25 мкм – соответственно, темные участки на микроструктурах являются частицами тетраборида кремния. Светлые участки, такие как на микроструктурах образца 87-10-3, являются частицами модифицирующего стекла $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$. Матричное и модифицирующее стекла имеют близкую природу и химический состав, однако не полностью смешиваются в процессе обжига. Неполное смешивание барийалюмосиликатных стеклофаз закономерно и ярко проявляется в составах с 10 и 15% (по массе) модифицирующего стекла $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$. Так, на рис. 8 представлена микроструктура образца 80-15-5 после 3 мин высокотемпературной выдержки. При увеличении $\times 1000$ хорошо видны яркие контрастные области модифицирующего барийалюмосиликатного стекла.

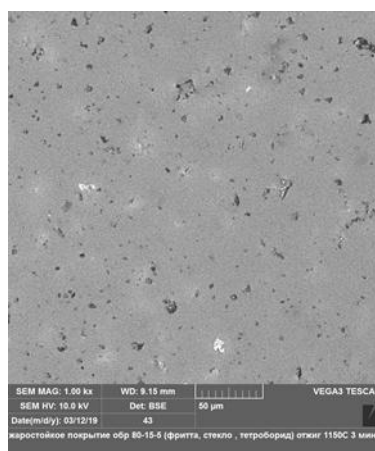


Рис. 8. Микроструктура ($\times 1000$) покрытия 80-15-5 после обжига в течение 3 мин

Методом синхронного термоанализа установлено, что в области температур 600–800°C тетраборид кремния окисляется, при этом на кривой ДСК данный процесс характеризуется интенсивным непрерывным увеличением теплового потока на единицу массы. Известно, что для промышленно изготавливаемого матричного стекла (фритты) барийалюмосиликатной системы характерна температура начала деформации, не превышающая 725°C. Дилатометрическая кривая образца матричного стекла представлена на рис. 9.

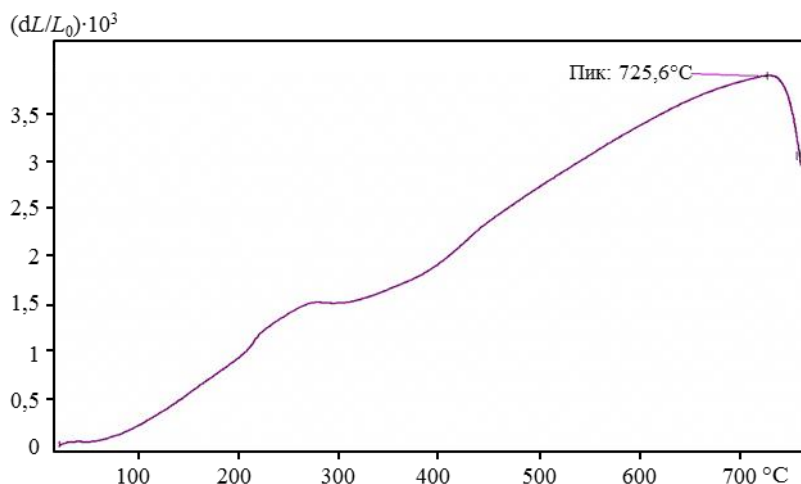
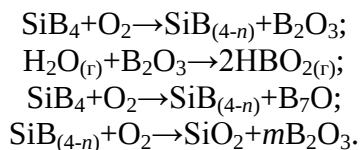


Рис. 9. Дилатометрическая кривая стекла BaO–Al₂O₃–SiO₂

Таким образом, размягчение и переход в вязкотекучее состояние матричного стекла лимитирует процесс окисления тетраборида кремния ввиду образования структуры типа «ядро–оболочка». Дополнительную защиту обеспечивает и практически исключает диффузию кислорода образующееся при окислении тетраборида кремния боросиликатное стекло, отличающееся от матричного и модифицирующего стекол достаточной легкоплавкостью. Соответственно, на начальных стадиях формирования покрытия окисление тетраборида кремния с последующим образованием жидкой фазы боросиликатного стекла является основным фактором, способствующим оплавлению покрытий и снижению температуры их формирования.

При окислении тетраборида кремния протекает комплекс физико-химических превращений, который частично может быть описан следующими химическими реакциями:



Выявление достаточно крупных частиц тетраборида кремния в структуре исследованных покрытий после обжига позволяет предположить, что в процессе формирования покрытия, а также при его дальнейшей эксплуатации возможно не только сохранение ковалентной связи Si–B, но и образование новых связей между тетраборидом кремния, боросиликатным стеклом и матричным барийалюмосиликатным стеклом. Формирующиеся при термической обработке связи могут способствовать получению композиционного реакционноотверждаемого покрытия, для описания свойств которого при температурах обжига и эксплуатации могут быть применены комплексные модели

вязких и вязкоупругих материалов. Только исследований микроструктуры и проведения элементного анализа недостаточно, в связи с чем для изучения особенностей структуры дополнительно необходимо применение методов спектроскопии и просвечивающей электронной микроскопии.

Заключения

Результаты исследования структурообразования реакционноотверждаемых покрытий свидетельствуют о наличии нескольких стадий образования покрытия: формирование макроструктуры, сопровождаемое сначала окислением тетраборида и формированием жидкой фазы боросиликатного стекла, затем размягчением матричного стекла; формирование микроструктуры, содержащей фазы матричного стекла, частиц модифицирующего стекла и тетраборида кремния с видимыми при значительных увеличениях границами раздела. Получаемые покрытия являются композиционными, и для их изучения необходимо дополнительно применение методов спектроскопии и электронной микроскопии высокого разрешения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-33-00207 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Современные полифункциональные высокотемпературные покрытия для никелевых сплавов, уплотнительных металлических материалов и бериллиевых сплавов // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 5. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 03.02.2019).
3. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
4. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
5. Денисова В.С., Соловьева Г.А. Жаростойкое стеклокерамическое покрытие для защиты деталей камер сгорания газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 18–22. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-18-22.
6. Овсепян С.В., Лукина Е.А., Филонова Е.В., Мазалов И.С. Формирование упрочняющей фазы в процессе высокотемпературного азотирования свариваемого жаропрочного деформируемого сплава на основе системы Ni–Co–Cr // Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 3–8.
7. Козлова О.Ю., Овсепян С.В., Помельникова А.С., Ахмедзянов М.В. Влияние высокотемпературного азотирования на структуру и свойства свариваемых жаропрочных никелевых сплавов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2016. №6 (111). С. 33–42.
8. Лукина Е.А., Овсепян С.В., Давыдова Е.А., Ахмедзянов М.В. Структурные особенности жаропрочного сплава на основе системы Ni–Co–Cr, упрочняемого объемным азотированием // Цветные металлы. 2016. №7 (883). С. 76–82.
9. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.

10. Каблов Е.Н., Солнцев С.С. Окситермосинтез – новый шаг к материалам для перспективной авиакосмической техники // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М.: ВИАМ, 2002. С. 131–137.
11. Солнцев С.С., Денисова В.С., Розененкова В.А. Реакционное отверждение – новое направление в технологии высокотемпературных композиционных покрытий и материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 329–343. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-329-343.
12. Солнцев Ст.С. Эрозионностойкие влагозащитные терморегулирующие покрытия многоразовой теплозащиты орбитального корабля «Буран» // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 94–124.
13. Солнцев Ст.С. Некоторые особенности покрытий для плиток многоразовой теплозащиты орбитальных космических кораблей // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.02.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-2-1-1.
14. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
15. Солнцев С.С., Денисова В.С., Агарков А.Б., Гаврилов С.В. Влияние добавок стекол системы $\text{BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ на свойства реакционноотверждаемых покрытий для защиты никелевых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №1 (61). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-11-11.

УДК 620.178.6:678.8

И.А. Рузаков¹

МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПКМ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-88-98

Большое количество публикуемых статей, посвященных интегрированию волоконных брэгговских решеток в структуру композиционного материала, демонстрирует исследовательский и практический интерес к данному направлению. Благодаря волоконно-оптической технологии стало возможно следить за внутренним состоянием композиционной детали. Это позволяет отслеживать ресурс отдельных элементов конструкции в режиме реального времени и оперативно выявлять дефекты и неисправности.

В данной работе приведен обзор существующих методов мониторинга напряженно-деформированного состояния элементов конструкций летательных аппаратов, показано преимущество применения волоконно-оптических датчиков в системах встроенного контроля конструкций из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, волоконная брэгговская решетка, расслоение, трещина, встроенный контроль.

I.A. Ruzakov¹

STRAIN STATE MONITORING OF THE STRUCTURAL STATE FROM POLYMER MATRIX COMPOSITE MATERIAL BASED ON FIBER-OPTIC SENSORS (review)

A large number of published articles devoted to the integration of fiber optic sensors into the structure of composite material demonstrates research and practical interest in this area. Fiber optic technology does possible to monitor the internal state of the plate from polymer matrix composite material. This allows to track the resource of individual structural elements in real-time and quickly identify defects and cracks.

This article provides an overview of modern methods for determining the impact damage of structural elements of aircraft made from polymer matrix composite material using fiber-optic Bragg gratings. The advantages of using fiber-optic sensors in the systems of embedded control of the plate from polymer matrix composites is shown.

Keywords: polymer matrix composite material, fibre bragg grating, delamination, cracks, structural health monitoring.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время разработка технологии мониторинга напряженно-деформированного состояния элементов конструкции летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) является важной и актуальной задачей.

Основными преимуществами ПКМ в сравнении с традиционными конструкционными материалами (сталь, алюминиевые и титановые сплавы и т. д.) являются низкая плотность, высокая прочность, коррозионная стойкость и долговечность [1–4]. Следует

отметить следующие недостатки ПКМ: малый температурный диапазон эксплуатации, низкая удельная прочность при разрыве, в процессе длительной эксплуатации могут накапливаться повреждения, обладают большим разбросом значений характеристик [5–8]. При минимизации воздействия приведенных условий ПКМ являются наиболее перспективными конструкционными материалами для элементов конструкции летательных аппаратов.

Повышение безопасности полетов, сокращение эксплуатационных расходов (затраты на плановые и внеплановые осмотры летательных аппаратов с целью оценки состояния конструкции) и прогнозирование остаточного ресурса конструкции летательного аппарата, эксплуатирующегося длительно, позволяют снизить риск причинения вреда людям или нанесения ущерба имуществу до приемлемого уровня (либо поддерживать его на более низком уровне посредством непрерывного процесса выявления источников опасности).

Для подтверждения высокой надежности авиационной техники применяется технический контроль, т. е. проверка соответствия конструкции летательного аппарата установленным техническим требованиям. Большой популярностью пользуются методы неразрушающего контроля – контроль объекта путем определения физико-механических свойств деталей и конструкции из ПКМ без их разрушения [9–11] с помощью ультразвуковых, тепловых, акустических, оптоволоконных и других методов контроля.

Плотность, пористость, содержание армирующих волокон в ПКМ имеют определяющую роль для получения стабильного уровня упруго-прочностных свойств при кратковременном статическом и длительных статических и динамических нагружениях [12]. Отклонения в составе ПКМ, вид деформации (растяжение/сжатие), характер нагруженного состояния (одноосное, плоское, объемное), длительность и цикличность нагружения приводят к значительным изменениям характеристик прочности, упругости и стойкости конструкции из ПКМ.

Сложность состава ПКМ, многообразие форм армирующих наполнителей, различные технологии изготовления препрегов и методов формования обуславливают и многообразие получаемых дефектов [13, 14]. Дефекты неметаллических материалов подразделяют на макро- и микродефекты. К макродефектам относят расслоения, непроклеи, трещины и крупные раковины; к дефектам микроструктуры – зоны повышенной пористости, низкую степень отверждения связующего при формовании, подмятия и др. Расслоения не оказывают влияния на модуль упругости и прочность ПКМ, однако при деформационных нагрузках прочность материала может существенно снижаться в зависимости от глубины залегания и длины дефекта. Трещины являются концентраторами напряжений, нарушают целостность композита, что может привести к расслоению материала.

Основные методы определения дефектов в ПКМ

Внутренние повреждения ПКМ могут быть вызваны разрушением волокна, расщеплением матрицы, дезонированием (отделение волокон от матрицы) или отслаиванием (отказ соединения между смежными композитными слоями). Одним из типов внутренних дефектов, заслуживающих пристального внимания, является отслоение. Отслоение присутствует, когда клей двух соседних слоев теряет свойства. Это обычно происходит во время воздействия температуры и/или деформации на структуру и вызвано высоким уровнем межслойного напряжения. Недостаток, который возникает из-за отслоений, заключается в невозможности обнаружить повреждение с помощью визуальных осмотров на основе графика состояния.

Ни один из существующих методов неразрушающего контроля не имеет абсолютной точности. Наиболее часто используемые методы основаны на ультразвуковых

исследованиях, радиографии, инфракрасной термографии, методах направленной волны и волоконной оптике.

Ультразвуковой метод неразрушающего контроля предполагает распространение высокочастотного звука в диапазоне от 20 кГц до нескольких МГц в ПКМ. С помощью характеристик передаваемой или отраженной звуковой волны получают характеристики материала и выявляют дефекты. Ультразвуковой метод неразрушающего контроля особенно эффективен при обнаружении и оценке плоских дефектов, таких как расслоения в многослойных композитах. Ослабление ультразвуковых волн в среде может также отражать изменение внутреннего состояния материала (пористость, пустоты, плотность), вызванное процессом длительной эксплуатации.

Метод акустической эмиссии основан на явлении возникновения и распространения упругих колебаний (акустических волн) при деформации напряженного материала. Акустические волны обычно регистрируют с помощью высокочувствительных пьезоэлектрических датчиков. Сравнение скорости акустических волн, генерируемых на разных частотах, позволяет оценить и выявить местоположение расслоений.

Метод импульсного эха широко используется в качестве инструмента неразрушающего контроля. Один и тот же излучатель используется как в качестве источника, так и приемника. Ультразвуковая волна, отраженная от дефекта, регистрируется излучателем. По прошедшему времени между испускаемым импульсом и регистрацией ультразвуковой волны можно определить глубину дефекта. Традиционные методы ультразвукового контроля, такие как С-сканирование (автоматизированная система отображает поле сканирования, где разными цветами отмечены различные диапазоны значений амплитуды принятого сигнала), эффективны, но дорогостоящи и не могут проводиться постоянно.

Системы контроля на основе электрических приклеиваемых тензодатчиков являются совершенными, но требуют подвода электрического питания к точке измерения и при перепадах температуры снижают свою чувствительность. Альтернативным методом является использование оптоволоконных датчиков деформации. В отличие от электрических тензодатчиков, они не требуют подвода проводов, помехозащищены и искробезопасны.

Система встроенного мониторинга на основе оптоволоконных датчиков позволяет реализовывать на одном волокне до нескольких десятков датчиков. В качестве таких датчиков применяют оптическое волокно с периодическим по длине изменением показателя преломления светонесущей сердцевины (решеткой Брэгга) [15]. Период структуры и, соответственно, длина волны отраженного света изменяются при механическом сжатии или растяжении волокна. В результате пересчета смещения центральной длины волны в деформацию установлено, что смещение длины волны в 1,34 нм соответствует деформации 0,11% при нагрузке 1500 кг в зоне максимального изгибающего момента.

Известны примеры систем встроенного мониторинга на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), с помощью которых контролируют напряженно-деформированное состояние материала и его температуру [16–18].

Волоконные брэгговские решетки в структуре ПКМ

Теме внедрения ВБР в композиционные материалы посвящено большое количество статей. Так, в работе [19] исследовано оптическое волокно малого диаметра (~40 мкм), покрытое полиимидной оболочкой (52 мкм), интегрированное в один слой ПКМ толщиной 125 мкм. Отмечено, что такие оптические волокна обладают механическими и оптическими свойствами, аналогичными свойствам обычных оптических волокон (диаметр сердцевины 50 мкм и диаметр оболочки 125 мкм), и не вызывают какого-либо снижения прочности композитов, когда они (оптические волокна) внедряются параллельно усиливающим волокнам в слоистых материалах.

На рис. 1 показано, что интегрированное волокно малого диаметра не увеличивает концентрацию напряжений в слое ПКМ и сохраняет исходную жесткость и толщину ПКМ.

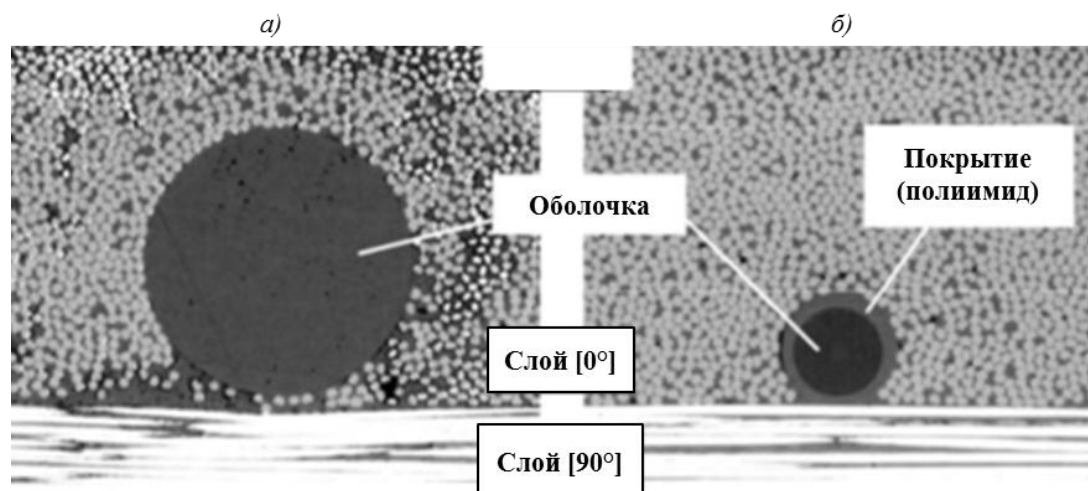


Рис. 1. Традиционное оптическое волокно (а) и волокно малого диаметра (б), интегрированное в структуру углепластика

На рис. 2 показан образец ПКМ со слоями, уложенными по схеме $[45^\circ/-45^\circ/0^\circ/90^\circ]$, с встроенным датчиком на основе волоконной брэгговской решетки толщиной 10 мм. По смещению центральной длины волны ВБР можно определить деформацию в определенной точке определенного слоя ПКМ, а по количеству пиков при нагрузке на растяжение и сжатие – деформацию связанных и расслоенных слоев соответственно [20].

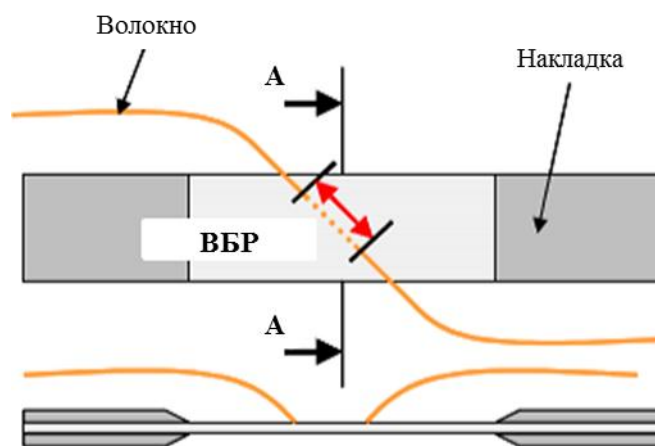


Рис. 2. Образец из ПКМ с встроенным датчиком (ВБР)

Этот метод может быть также применен для обнаружения расслоений вокруг сосредоточенных по напряжению областей (заклепочные отверстия и др.). Поперечные трещины, расслоения и растрескивание матрицы материала идентифицированы в слоистых образцах углепластика с помощью обратного анализа спектра отражения [21, 22].

Следует отметить работу [23], посвященную исследованию решеток с линейно изменяющимся периодом (чирпированные ВБР). Благодаря трапецевидному спектру таких решеток любая неоднородность в структуре материала, например трещина, выделяется на спектре. Для экспериментальной проверки в структуру материала интегрировали

чирпированную брэгговскую решетку длиной 50 мм с шириной спектра отражения 5 нм. В результате возникновения поперечных трещин на спектре ВБР образуются провалы, соответствующие их местоположению (рис. 3).

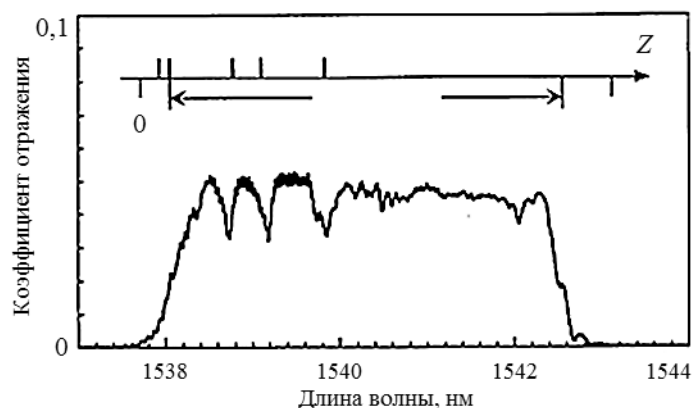


Рис. 3. Спектр чирпированной ВБР при наличии поперечных трещин в композитном образце

В России большой опыт внедрения оптоволоконных датчиков на основе брэгговских решеток в композиционный материал имеет ФГУП «ВИАМ». В своих работах авторы рассматривают возможные проблемы при измерении деформации конструкции из ПКМ, а также вопросы влияния интеграции оптоволокна на свойства ПКМ. На рис. 4 представлена зависимость показаний оптоволоконного датчика и тензодатчика от приложенной нагрузки.

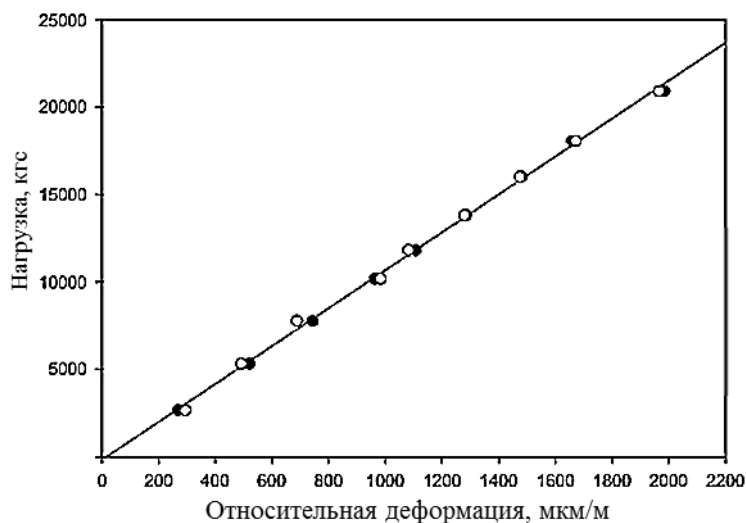


Рис. 4. Сравнение значений деформации ВБР (○) и тензодатчика (●)

В результате испытаний, описанных в работах [24, 25], сделан вывод, что оптоволоконные датчики по точности сопоставимы с точностью измерения деформации с помощью тензодатчиков при комнатных температурах.

Метод акустического неразрушающего контроля на основе ВБР

В системах встроенного контроля на основе метода акустического неразрушающего контроля в зависимости от характеристик распространения ультразвуковых волн могут быть рассмотрены различные типы волн: сейсмические волны материала,

продольные и/или поперечные, волны ползучести, волна Стоунли, волна Лова, рэлеевские волны и волны Лэмба. Основным критерием является геометрическая форма исследуемого элемента. Регистрацию волн Лэмба в структурном контроле можно выделить в отдельное направление с большим количеством публикаций, среди которых следует отметить работы [26–31]. В работах [32, 33] экспериментально подтверждается возможность обнаружения расслоения ПКМ с помощью волн Лэмба. Принцип работы основан на управляемой акустической волне с ее векторами распространения (волнами Лэмба), параллельными поверхности конструкции. Волны Лэмба являются подходящими для применения в системах встроенного контроля элементов конструкции летательных аппаратов из ПКМ, так как они способны распространяться на больших расстояниях с малым затуханием амплитуды.

Волна Лэмба возбуждается и принимается с помощью актюаторов (пьезоэлектрических пластин). Пьезоактюаторы применяются как для мониторинга ближнего поля (метод высокочастотного электромагнитного импеданса, толщинный метод), так и для мониторинга дальней зоны (метод эха, метод определения разницы между эталоном и материалом, метод фазированной решетки). Место появления трещины обычно находят с помощью определения разницы во времени между испускаемой и принимаемой волнами.

В работе [34] исследована стрингерная панель из слоистого композиционного материала и обнаружено, что параметры дефектов (размеры, тип, ориентация, расстояние до актюаторов) влияют на распространение волн Лэмба. В работе [35] проведено численное моделирование и экспериментально исследовано влияние ориентации трещин на сформированный отклик. Основной вывод, сделанный в этих работах, следующий: волны отражения, вызванные трещинами, уменьшают амплитуду исходной волны. Кроме того, волны, генерируемые параллельно росту трещины, имеют большую амплитуду, чем поперечные, а если длина трещины увеличивается, то амплитуда отраженных волн также увеличивается. Однако установлено, что минимальный предел обнаружения трещины составляет 10 мм.

Перспективным направлением неразрушающего контроля является метод акустического неразрушающего контроля на основе ВБР. Известно, что длина волны ВБР прямо пропорциональна деформации решетки. Если поля деформации, приложенные к ВБР, неоднородны, то результатом может являться как смещение резонансной длины волны решетки, так и ее уширение.

В работе [36] исследовалось влияние распространения волны Лэмба на показатель преломления сердцевины ВБР. Обнаружено, что волна Лэмба вызывает смещение резонансной длины волны решетки. В эксперименте генерировали волну Лэмба на частоте 2,25 МГц и исследовали ее влияние на длину волоконно-оптических датчиков длиной 1 и 12 мм. Результаты показывают, что чувствительность регистрации отраженного сигнала зависит от длины ВБР. Соотношение длины волны Лэмба и длины решетки можно выбирать от 1 до 4 в зависимости от необходимой чувствительности выявления расслоения [37].

На рис. 5 показан образец для испытания на усталость с установленной системой встроенного контроля на основе брэгговской решетки и пьезокерамических актюаторов. Во время испытания непрерывно контролировали частоту излучения волны Лэмба и резонансную длину волны ВБР.

В качестве основного метода опроса брэгговских решеток выбран метод опроса с применением маломощного, узкого перестраиваемого лазерного диода и фотодетектора. Сдвиг резонансной длины волны прямо пропорционален мощности отраженного сигнала [38]. На рис. 6 приведена схема высокоскоростной оптической системы опроса.

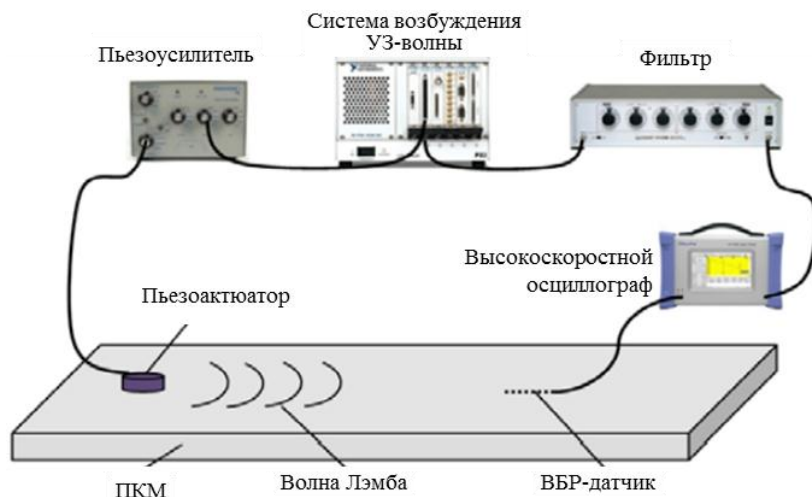


Рис. 5. Система встроенного контроля на основе ВБР и пьезоакермических актюаторов

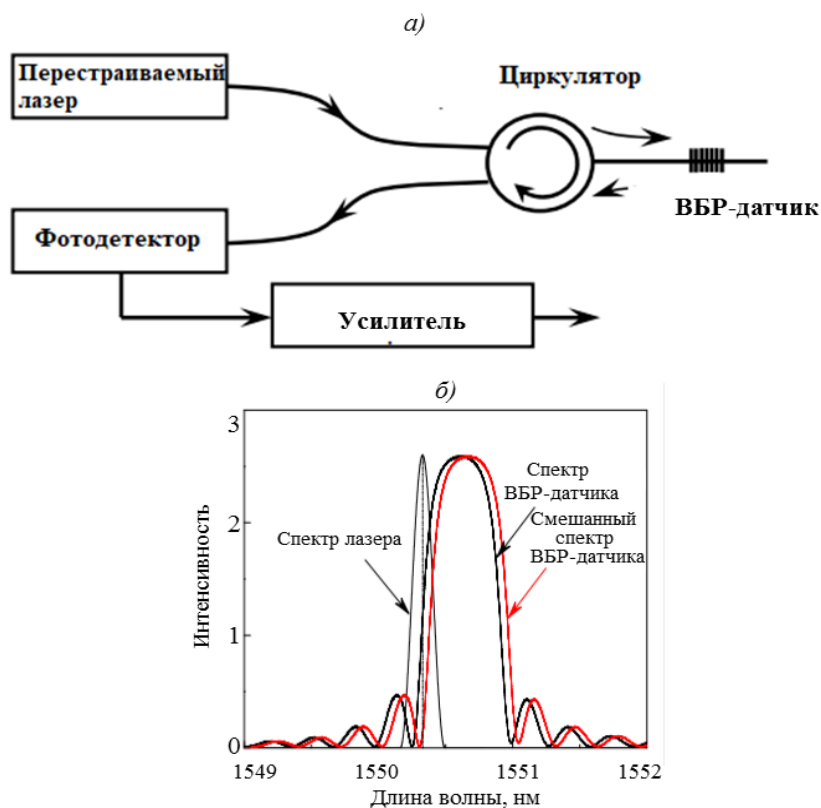


Рис. 6. Схема высокоскоростной оптической системы опроса (а) и принцип опроса датчиков (б)

Следует отметить публикацию японских ученых, занимающихся разработкой системы обнаружения повреждений с помощью ВБР-датчика с использованием пьезоакермических сенсоров [19]. Установлено, что *моды* S_0 и A_0 волны Лэмба появляются при частоте излучения 300 кГц, их длины волн равны 22,4 и 4,2 мм соответственно. В результате предварительных экспериментов сделан вывод, что длина брэгговской решетки должна составлять 1 мм для достижения наибольшего соотношения сигнал/шум.

Для обнаружения расслоения и смещения длины волны ВБР, вызванного расслоением, использована схема, приведенная на рис. 7. Длину расслоения между пьезоактюатором и пьезосенсором варьировали от 0 до 30 мм (с шагом 10 мм). На рис. 8 показаны формы сигналов, полученные датчиком ВБР при различной длине расслоения.

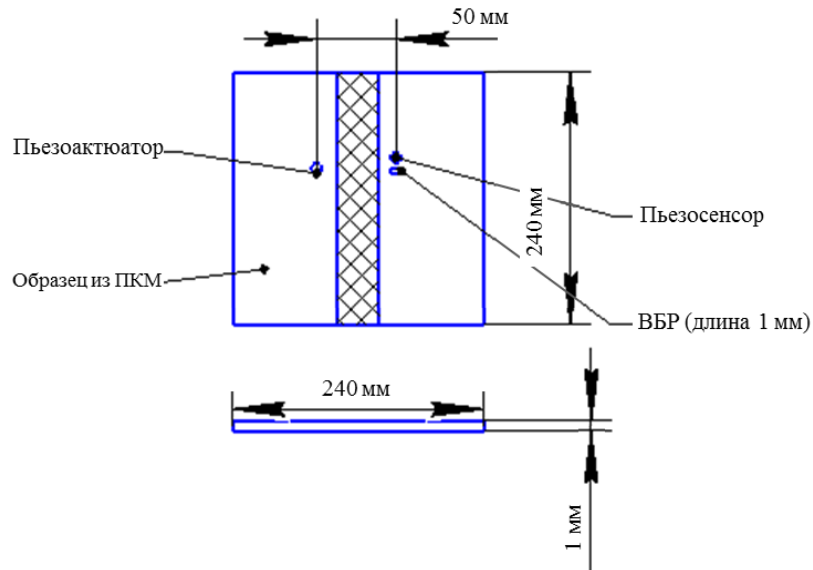


Рис. 7. Схема расположения пьезоактюатора, пьезосенсора и ВБР-датчика на образце из ПКМ

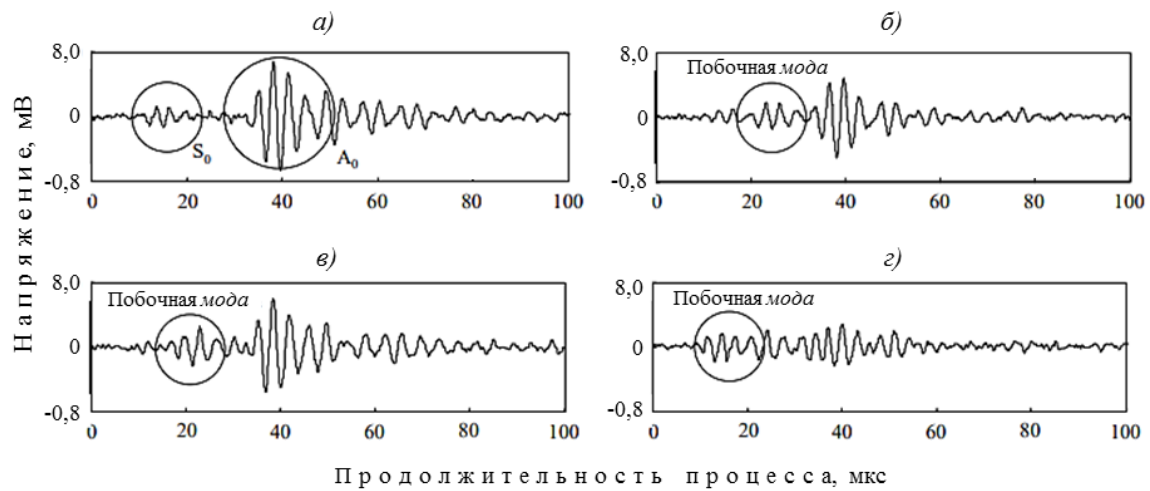


Рис. 8. Изменение принятого сигнала при длине расслоения 0 (а), 10 (б), 20 (в) и 30 мм (г)

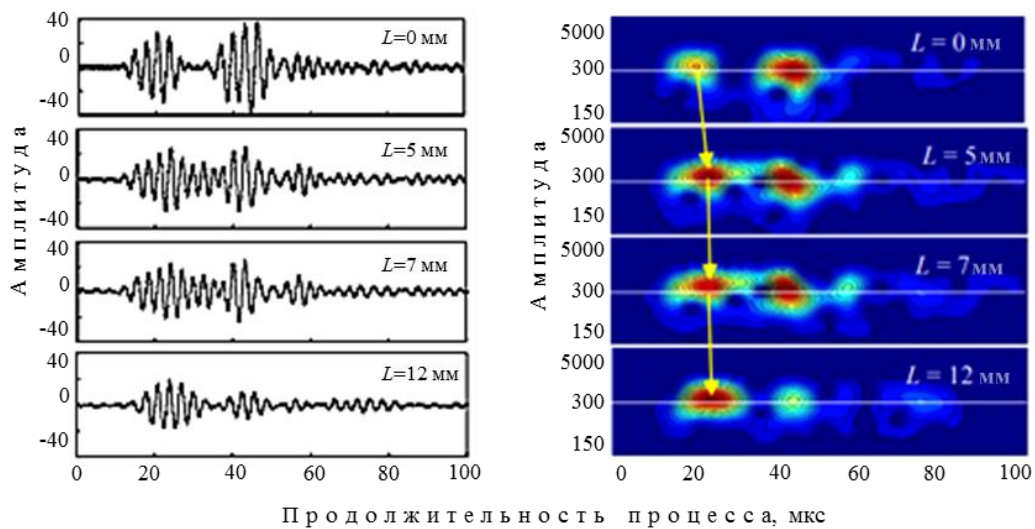


Рис. 9. Изменение частоты детектируемой волны Лэмба по мере разрастания трещины

На рис. 9 показаны результаты эксперимента. Волны Лэмба, прошедшие через область расслоения различной длины, зарегистрированы ВБР-датчиком. При присутствии расслаивания в образце в принятом сигнале выделяют новую акустическую волну. Длина расслаивания может быть оценена на основе отношения амплитуд новой *моды* и *моды* А0 и времени прихода новой *моды*, регистрируемой ВБР-датчиком.

Авторы работы [39] представили прототип встроенной системы структурного мониторинга на основе акустического неразрушающего контроля с помощью фазосмещенного ВБР-датчика. При испытании композиционного материала на трехточечный изгиб, получили, что чувствительная встроенная система мониторинга может обнаруживать низкоамплитудные высокочастотные сигналы волны Лэмба от поперечных трещин. При точном измерении времени регистрации волны Лэмба на каждом датчике, определили положение поперечных трещин с погрешностью <4%. В результате показан высокий потенциал сбалансированной встроенной системы на основе фазосмещенного ВБР-датчика для обнаружения трещин в композиционных материалах.

В данной работе не рассматривался процесс влагопереноса в ПКМ с интегрированными сенсорами. В работе [40] отмечено изменение массы образцов из ПКМ при натурном экспонировании, моделирующем реальный цикл полета, вследствие повышения влагосодержания образцов в течение 12 мес. Процесс перемещения влаги в образцах с интегрированными ВБР и ее влияния на амплитуду волны Лэмба требует дальнейших исследований.

Заключение

Волоконно-оптические датчики в настоящее время являются перспективными для использования в системах встроенного контроля элементов конструкций из ПКМ. Для оценки деформации целесообразно использовать ВБР, интегрированные в слой материала. Для определения ударных нагрузок целесообразно использовать систему встроенного мониторинга на основе приклеиваемых волоконных решеток и пьезокерамических актюаторов, генерирующих продольные акустические волны определенной частоты. Перспективной разработкой также является обнаружение повреждений и расслоений ПКМ с помощью акустических волн Лэмба и ВБР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
2. Дориомедов М.С., Дасковский М.И., Скрипачев С.Ю., Шеин Е.А. Полимерные композиционные материалы в железнодорожном транспорте России (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №7 (43). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.10.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-12-12.
3. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
4. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Язвенко Л.Н. Композиционные материалы в автомобильной промышленности (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №6 (54). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.07.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-7-7.
5. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
6. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Шелемба И.С. Волоконно-оптические датчики для мониторинга коррозионных процессов в узлах авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 26–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-26-34.

7. Ильичев А.В., Раскутин А.Е. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №3. С. 62–66. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-62-66.
8. Старцев В.О., Махоньков А.Ю., Котова Е.А. Механические свойства и влагостойкость ПКМ с повреждениями // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №S1 (38). С. 49–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-49-55.
9. Latishenko V.A., Matiss J.G., Sandalov A.V. Diagnostics of load carrying capacity of composite structures // *10th World Conference on Non-Destructive Testing*. Moscow. 1982. Rep. 5–3.
10. Мурашов В.В., Гуняев Г.М., Румянцев А.Ф. Использование информативных параметров приборов неразрушающего контроля при диагностике физико-механических характеристик углепластиков // *Авиационные материалы и технологии*. М.: ВИАМ, 2002. Вып.: Полимерные композиционные материалы. С. 70–77.
11. Murashov V.V., Rumyantsev A.F. Diagnosis of physical and mechanical properties of constructional carbon fiber reinforced plastics (CFRP) // *10th European Conference on Non-Destructive Testing (Moscow, June 7–11, 2010)*. 2010. Disc 1: Reports.
12. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3: Ультразвуковой контроль. 864 с.
13. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2007. №4. С. 23–31.
14. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // *Контроль. Диагностика*. 2007. №5. С. 31–42.
15. Brand C., Boller C. Identification of life cycle cost reduction in structures with self-diagnostic devices // *Proceedings of NATO RTO Symposium on Design for Low Cost Operation and Support (Ottawa, October 21–22, 1999)*. Paper 17.
16. Aldridge N., Foote P.D., Read I. Operational load monitoring for aircraft and maritime applications // *Strain*. 2000. Vol. 36. P. 123–126.
17. Measures R.M. *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. 1st ed. London: Academic Press, 2004. P. 1609–1610.
18. Chandler K., Ferguson S., Graver T. et al. On-line structural health and fire monitoring of a composite personal aircraft using an FBG sensing system // *Proceedings SPIE*. 2008. Vol. 6933. P. 125–131.
19. Takeda N., Okabe Y., Kuwahara J. et al. Development of smart composite structures with small-diameter fiber Bragg grating sensors for damage detection: Quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using Lamb wave sensing // *Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 65. No. 15. P. 2575–2587.
20. Coppola G. Analysis of feasibility on the use of fiber Bragg grating sensors as ultrasound detectors // *Proceedings SPIE*. 2001. 8th Annual Symposium on smart structures and Materials. P. 224–232.
21. Minakuchi S., Umehara T., Takagaki K. et al. Life cycle monitoring and advanced quality assurance of L-shaped composite corner part using embedded fiber-optic sensor // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2013. Vol. 48. P. 153–161.
22. Takeda N., Minakuchi S., Umehara T. et al. Life cycle monitoring of curved composite parts using embedded fiber Bragg grating sensors // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 410. P. 18–21.
23. Guo H., Dai Y., Xiao G., Mrad N., Yao J. Interrogation of a long-period grating using a mechanically scannable arrayed waveguide grating and a sampled chirped fiber Bragg grating // *Optical Letter*. 2008. No. 33. P. 1635–1637.
24. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н. и др. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2010. №3. С. 10–15.

25. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
26. Wang S.S. Delamination Crack Growth in Unidirectional Fiber-Reinforced Laminates under Static and Cyclic Loading // *Composite Material: Testing and Design*, ASTM STP. 1979. Vol. 674. P. 642–663.
27. Kessler S. Piezoelectric-based in situ damage detection of composite materials for structural health monitoring systems: PhD Thesis Department of Aeronautics and Astronautics. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2002. P. 100–112.
28. Valdes S. Structural integrity monitoring of CFRP laminates using piezoelectric devices: PhD Thesis Department of Aeronautics. Imperial College London, 2000. P. 44–49.
29. Chang F. Structural Health Monitoring: A Summary Report // *Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring* (Stanford, September 8–10, 1999). 1999. P. 244–276.
30. Giurgiutiu V., Bao J., Zhao W. Active Sensor Wave Propagation Health Monitoring of Beam and Plate Structures // *Proceedings of the 8th International SPIE Symposium on Smart Structures and Materials* (Newport Beach, 2001). 2001. Vol. 4327. P. 184–213.
31. Bar-Cohen Y. NDE of Fiber Reinforced Composite Materials // *Materials Evaluation*. 1986. Vol. 44. P. 446–454.
32. Saravanos D.A., Heyliger P.R. Coupled Layerwise Analysis of Composite Beams with Embedded Piezoelectric Sensors and Actuators // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1995. No. 6. P. 350–362.
33. Saravanos D.A., Birman V., Hopkins D.A. Detection of Delaminations in Composite Beams using Piezoelectric Sensors // *Proceedings of the 35th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference of the AIAA*. 1994. P. 218–223.
34. Monnier T. Lamb waves-based impact damage monitoring of a stiffened aircraft panel using piezoelectric transducers // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2006. P. 411–421.
35. Lee B.C., Manson G., Staszewski W.J. Environmental effects on Lamb wave responses from piezoceramic sensors // *Materials Science Forum*. 2003. P. 195–202.
36. Tsuda H., Lee J.R., Guan Y.S., Takatsubo J.J. Investigation of fatigue crack in stainless steel using a mobile fiber Bragg grating ultrasonic sensor // *Optical Fiber Technology*. 2007. No. 13. P. 209–214.
37. Betz D.C., Thursby G., Culshaw B., Staszewski W.J. Identification of structural damage using multifunctional Bragg grating sensors: I. Theory and implementation // *Smart Material and Structure*. 2006. No. 15. P. 1305–1312.
38. Perez I., Cui H.L., Udd E. Acoustic emission detection using fiber Bragg gratings // *Proceedings SPIE*. 2001. Vol. 4328. P. 209–215.
39. Wu Q., Yu F., Okabe Y., Saito K., Kobayashi S. Acoustic emission detection and position identification of transverse cracks in carbon fiber-reinforced plastic laminates by using a novel optical fiber ultrasonic sensing system // *Structural Health Monitoring*. 2014. No. 14. P. 205–213.
40. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Иноземцев А.А. Влагонасыщение конструктивно-подобных элементов из полимерных композиционных материалов в открытых климатических условиях с наложением термоциклов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №2 (47). С. 56–68. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-56-68.

УДК 667.621

*И.В. Старостина¹, А.П. Петрова¹, Ю.Н. Шевченко¹, М.В. Шишимиров¹***КОНТРОЛЬ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ СВЯЗУЮЩИХ
ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-99-107

Приведено описание методов испытаний термопластичных связующих, используемых в составе полимерных композиционных материалов, – плотности, показателя текучести расплава, водопоглощения, адгезионной прочности, ударной вязкости, прочности при растяжении, температуры размягчения, характеристик пожаробезопасности, включающих горючесть, дымообразование, кислородный индекс, тепловыделение. Приведено сравнение свойств термопластичных и термореактивных связующих, показаны преимущества технологии переработки термопластичных связующих перед термореактивными связующими.

Ключевые слова: термопластичное связующее, полисульфон, полиэфирэфиркетон, температура плавления, текучесть расплава, молекулярная масса, плотность, температура размягчения, пожаробезопасность, горючесть.

*I.V. Starostina¹, A.P. Petrova¹, Yu.N. Shevchenko¹, M.V. Shishimirov¹***CONTROL THERMOPLASTIC BINDING FOR PCM (review)**

The description of test methods thermoflexible binding, used as a part of polymeric composite materials, – density, flowability indicator melt, water absorptions, the adhesive durability, the impact strength, durability is provided at stretching, softening temperature, fire safety characteristics, including combustibility, a smoke education, an oxygen index, thermal emission is provided. Comparison of properties thermoflexible and thermosetting binding is given, advantages of refining technology thermoflexible binding before thermosetting binding are shown.

Keywords: thermoflexible binding, polysulphone, polyetheretherketon, melting temperature, flowability melt, molecular weight, density, softening temperature, fire safety, combustibility.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в различных отраслях машиностроения, поскольку их использование позволяет существенно улучшить характеристики машин и различных конструкций. В состав ПКМ входят волокнистый наполнитель и связующее, которое соединяет между собой отдельные элементы наполнителя в единый материал.

Первый период создания ПКМ характеризовался использованием термореактивных связующих, образующих трехмерную сшитую структуру и переходящих в неплавкое, нерастворимое состояние при отверждении.

Однако ПКМ на основе термореактивных связующих имеют некоторые технологические и эксплуатационные недостатки, одними из которых являются длительность процесса отверждения и ограниченный срок хранения препрегов на их основе.

Применение термопластичных связующих в составе ПКМ позволяет получить следующие преимущества:

- более короткий цикл переработки при получении ПКМ;
- длительный (практически неограниченный) срок хранения препрегов;
- отсутствие летучих продуктов при переработке;
- ударостойкость;
- возможность вторичной переработки;
- взрывобезопасность производства;
- нетоксичность;
- химическая стойкость при воздействии различных реагентов и др.

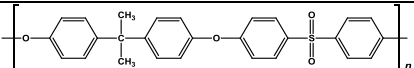
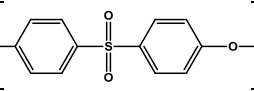
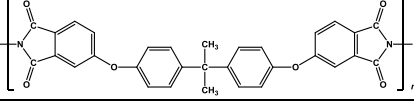
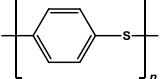
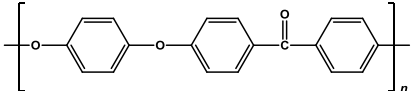
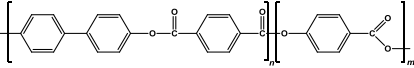
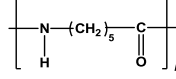
В качестве связующих в составе ПКМ могут использоваться любые термопласты, допускающие проведение технологических операций с их применением и отвечающие следующим требованиям:

- высокая температура стеклования;
- низкое водопоглощение;
- высокая ударная вязкость;
- огнестойкость, пониженное дымовыделение при пожаре;
- стойкость к воздействию ультрафиолетового и радиационного излучений;
- высокая адгезия к наполнителю;
- оптимальная прочность.

Часто в сокращенном виде композиционные материалы с термопластичной матрицей обозначают КТМ. Для использования в составе КТМ наиболее перспективными являются термопластичные связующие. Структура и некоторые свойства, связанные с их переработкой, приведены в табл. 1 [1–3].

Таблица 1

Структура и температурные характеристики термопластичных матриц для КТМ

Матрица	Структура	Температура, °C		
		стеклования	плавления	переработки
Полисульфон		190	–	330–350
Полиэфирсульфон		230	–	310–370
Полиэфиримид		217	–	340–400
Полифениленсульфид		90	290	315–340
Полиэфирэфиркетон		143	343	370–400
Жидкокристаллический термопласт		220	280	320–360
Полиамид-6		–	225	250–270

Свойства КТМ, такие как физико-механические, технологические и теплофизические, существенно зависят от свойств термопластичной матрицы. Общими свойствами термопластичных связующих являются высокая вязкость разрушения, значительно превосходящая вязкость разрушения эпоксидных олигомеров, а также их высокая деформативность. Сочетание повышенных механических свойств с пластичностью и вязкостью разрушения определяют высокую постударную прочность и энергию расслоения ПКМ.

Термопластичные связующие используются при получении препрегов в виде растворов, расплавов, порошков, пленок или плавких волокон. Пропитанный термопластом наполнитель (препрег) имеет неограниченный срок хранения.

Существует много способов совмещения термопластичных матриц с непрерывным наполнителем – наиболее широко применяются растворная, расплавная, электронно-ионная, пленочная и волоконная технологии.

Из перечисленных способов только растворная и волоконная технологии обеспечивают качественную пропитку наполнителя связующим и высокий уровень механических свойств термореактивных ПКМ. Однако использование растворителей требует создания громоздких и дорогостоящих рекуперационных устройств, а пропитка проводится в два-три этапа. Кроме того, не все термопластичные связующие можно растворить в каком-либо растворителе и не все термопласты склонны к волокнообразованию.

Применение термопластичных связующих в составе КТМ потребовало проведения их строгого контроля [4]. В связи с этим в данной статье представлены методы контроля термопластичных матриц для КТМ.

Работа выполнена в рамках комплексной научной проблемы 13.1. «Связующие для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [5–7].

Обзор методов испытаний термопластичных связующих

Термопластичные связующие имеют линейную или разветвленную структуру в отличие от термореактивных связующих, имеющих только трехмерную сшитую структуру. Термопластичные материалы при нагревании способны обратимо переходить в высокоэластическое либо в вязкотекучее состояние, поэтому некоторые методы, используемые для контроля их свойств, могут отличаться от контроля термореактивных связующих [8–16]. В данной статье приводятся основные методы испытания термопластичных материалов, в том числе используемых в качестве связующих для ПКМ.

Плотность материалов определяют по методикам, изложенным в ГОСТ 15139–69, который соответствует СТ СЭВ 891–78. В ГОСТ изложены пять методов определения плотности, наиболее приемлемым из них для термопластичных связующих является метод гидростатического взвешивания.

Сущность метода заключается в сравнении масс (M) одинаковых объемов испытываемого вещества и жидкости известной плотности (например, дистиллированной воды), называемой рабочей жидкостью. В случае использования дистиллированной воды, плотность которой известна, с учетом температуры, при которой проводилось взвешивание, плотность испытуемого материала рассчитывается следующим образом:

$$\rho_T = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \cdot \rho_{ж},$$

где $\rho_{ж}$ – плотность дистиллированной воды при проведении испытаний (зависит от температуры); ρ_T – плотность термопластичного связующего в г/см³.

Определение температуры размягчения проводят в соответствии с ГОСТ 15088–2014, который модифицирован по отношению к международному стандарту ISO 306:2004 «Пластмассы. Метод определения температуры размягчения термопластов по Вика». Сущность метода заключается в определении температуры, при которой стандартный индентор с плоской нижней поверхностью под действием нагрузки проникает в испытываемый образец, нагреваемый с постоянной скоростью, на глубину 1 мм. Для обеспечения необходимого нагрева образца можно использовать нагревательную баню, содержащую жидкость, или устройство с непосредственным нагревом. Индентор воздействует на материал перпендикулярно к поверхности образца. За температуру размягчения по Вика принимают температуру, измеренную как можно ближе к поверхности образца, при которой индентор проникает на глубину 1 мм.

Определение текучести расплава проводят в соответствии с ГОСТ 11645–73 «Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов». Сущность метода заключается в определении массы материала в граммах, экструдированного из прибора в течение 10 мин при заданных условиях температуры и давления.

Для определения показателя текучести расплава связующего применяют экструзионный пластометр (рис. 1). При проведении испытаний используют добавочный груз, который вместе с собственной массой поршня должен создавать требуемую нагрузку на испытываемый материал.

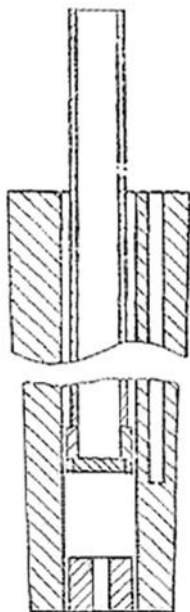


Рис. 1. Экструзионный пластометр

Нагрузку (P в Н) вычисляют по формуле

$$P = K \frac{D^2}{d^4},$$

где K – коэффициент, зависящий от диаметра капилляра и от выбранной нагрузки, определяют по обязательному *Приложению 1* к ГОСТ 11645–73; D – диаметр направляющей головки поршня, мм; d – диаметр капилляра, мм.

При проведении испытаний испытываемый материал используют в том виде, который позволяет его введение в отверстие экструзионной камеры. Не допускается использование материала в виде порошка во избежание попадания воздуха в его состав во время загрузки в камеру. При подготовке к проведению испытаний в капилляр вставляют медную развертку для предотвращения вытекания материала во время прогрева.

Навеска образца должна быть от 4 до 8 г в зависимости от предполагаемого показателя текучести расплава, при этом точная навеска рассчитывается с учетом сведений, приведенных в *Приложении 1* к ГОСТ 11645–73.

Показатель текучести расплава определяют по формуле

$$\text{ПТР}_{(T,P)} = \frac{t \cdot m}{\tau},$$

где T – температура испытания, К (°С); P – нагрузка, Н (кгс); t – стандартная продолжительность, с (по *Приложению 1* к ГОСТ); m – средняя масса экструдированных отрезков, г; τ – интервал времени между двумя последовательными отсечениями отрезков, с.

Определение ударной вязкости по Шарпи проводят в соответствии с ГОСТ 4647–2015 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи». Сущность метода заключается в испытании, при котором образец, лежащий на двух опорах, подвергается удару маятника с постоянной скоростью (при ударе «плашмя» или «в ребро»), при этом линия удара находится посередине между опорами.

В соответствии с ГОСТ образцы для испытаний могут быть как с надрезом, так и без надреза. При испытании образцов материалов, применяемых в термопластичных связующих для ПКМ, используются образцы без надреза.

В этом случае ударная вязкость по Шарпи (a_n) представляет собой энергию удара, поглощенную при разрушении испытываемого образца, отнесенную к площади первоначального поперечного сечения образца. Форма образца для испытаний приведена на рис. 2.

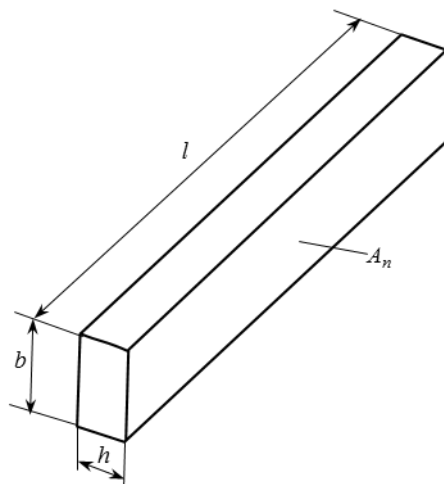


Рис. 2. Образец без надреза для определения ударной вязкости по Шарпи

Ударную вязкость по Шарпи вычисляют по формуле

$$a = \frac{A_n}{b \cdot h} \cdot 10^3,$$

где a – a_n или a_{cu} , кДж/м²; A_n – энергия удара, затраченная на разрушение образца без надреза, Дж; b – ширина образца, мм; h – толщина образца, мм.

Важным показателем, свидетельствующим о прочности термопластичного связующего, является прочность при растяжении, которую определяют в соответствии с ГОСТ 11262–2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение», модифицированным по отношению к международному стандарту ISO 527-2:2012 [13].

Сущность метода заключается в том, что образец для испытания растягивают вдоль его главной продольной оси с постоянной скоростью, в процессе растяжения

измеряют нагрузку, выдерживаемую образцом, и удлинение образца, а затем определяют прочность при растяжении. Форма образца приведена на рис. 3, рекомендуемые размеры – в табл. 2.

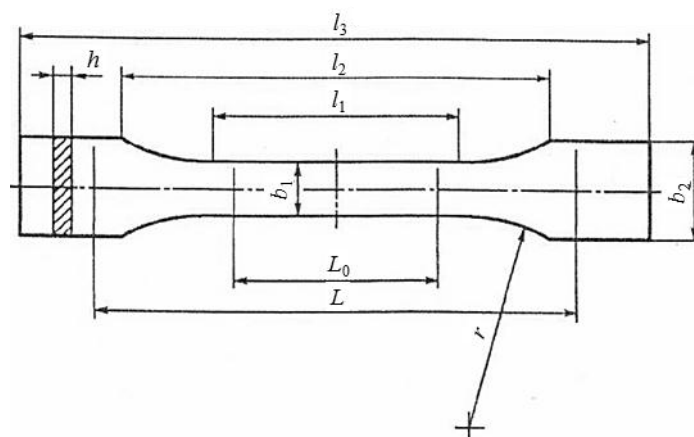


Рис. 3. Образец для испытания на прочность при растяжении для типов 1А, 1В и 2

Таблица 2

Определяемые размеры	Размер, мм, образца типа		
	1А	1В	2
Общая длина l_3	170	>150	>150
Длина узкой части с параллельными сторонами (рабочая часть) l_1	80±2	60,0±0,5	60,0±0,5
Радиус закругления r	24±1	60,0±0,5	60,0±0,5
Расстояние между широкими частями с параллельными сторонами l_2	109,3±3,2	108,0±1,6	–
Ширина головки b_2	20,0±0,2		20,0±0,5
Ширина узкой (рабочей) части b_1	10,0±0,2		10,0±0,5
Рекомендуемая толщина h	4,0±0,2		4,0±0,4 (от 1 до 10)
Рекомендуемая расчетная длина L_0	75,0±0,5	50,0±0,5	50±0,5
Расчетная длина, используемая при контроле качества или указанная в нормативном или техническом документе на материал	50,0±0,5	–	–
Первоначальное расстояние между зажимами L	115±1	115±1	115±5

Важным параметром, определяющим физико-механические свойства КТМ и передачу нагрузки на волокно при эксплуатации изделий, является адгезионная прочность – связи между волокном и термопластичным связующим. Для исследования этого параметра наиболее широко применяются следующие методы: вытягивания моноволокон из блока полимера (за рубежом он обозначается как pull-out); «трех волокон»; изучения микрофрагментации и микротвердости, которые весьма трудоемки. Метод вытягивания комплексной нити из блока связующего в виде керна требует специальной оснастки для приготовления и испытания образцов.

Наиболее простым является метод вытягивания из твердого связующего волокна в виде петли, затянутой в узел [17]. Схема получения образца для испытания на адгезионную прочность приведена на рис. 4.

Подготовку образца для испытаний проводили следующим образом: образец термопластичного связующего в твердом состоянии с нанесенной на поверхность петель из нити помещают в термокамеру капиллярного вискозиметра, как показано на рис. 5.

Полимерная оболочка при плавлении связывает микропластик с петлей, при этом формируется адгезионный контакт «волоконно–полимер–волоконно». Контроль усилия прижатия петли к микропласту обеспечивали массой груза, подвешенного на нижнем конце нити, формирующей петлю. После необходимой выдержки при температуре под натяжением образец извлекают и испытывают на растяжение. Образец закрепляют в зажимах разрывной машины таким образом, что в одном зажиме фиксируется конец микропластика, а в другом – конец нити, образующей петлю.

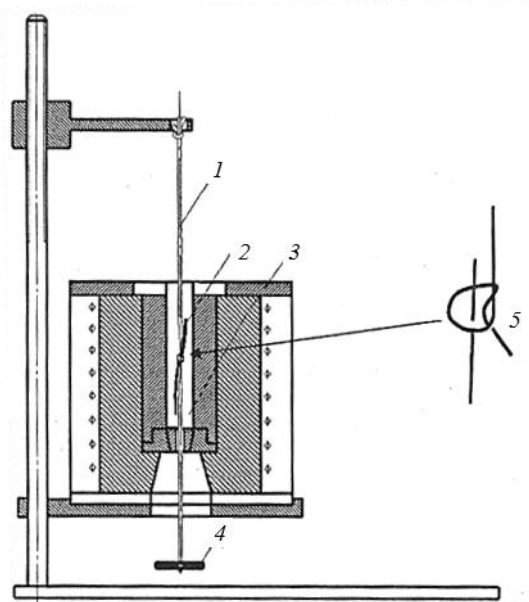


Рис. 4. Схема получения образца для определения адгезионной прочности связи волокон с термопластичным связующим в микропластике:

1 – нить, образующая петлю; 2 – микропластик; 3 – рабочая камера вискозиметра; 4 – груз; 5 – схема затягивания узла на микропластике

При напряжении сдвига, равном прочности связи «полимер–волоконно», происходит отрыв пластика от охватывающей его петли, который сопровождается резким снижением усилия растяжения до уровня силы трения на поверхности микропластика. Расчет прочности адгезионной связи волокна к связующему производится по величине максимального усилия P , отнесенного к линейной плотности нити (текс).

Полимерные материалы характеризуются относительно легкой воспламеняемостью и в процессе горения образуют токсичные и (или) коррозионные газы и дым. Горение является специфической формой быстрого окисления вещества с высвобождением соответствующего количества энергии. В случае полимерных материалов – это просто пожар, который поддерживается быстрым химическим сгоранием углеводорода в присутствии кислорода.

В последние годы возрос объем использования полимерных материалов в интерьере летательных аппаратов. В связи с этим ввели более жесткие требования к характеристикам пожаробезопасности этих материалов, которые включают такие показатели, как горючесть, дымообразование, кислородный индекс, тепловыделение [12, 15].

До 2004 г. определение пожаробезопасных характеристик осуществлялось в соответствии с нормами летной годности гражданских самолетов НЛГТС-3. Затем был введен другой нормативный документ – Авиационные правила (АП-25), обеспечивающий гармонизацию авиационных требований с федеральными нормами, действующими в большинстве стран мира, в том числе США (FAR), Европейском союзе (JAR),

Великобритании, Японии и др. В настоящее время в Авиационные Правила включен ряд методов оценки пожарной опасности (Приложение F).

Важным показателем отвержденного связующего является горючесть, методы испытания которой описаны в ГОСТ Р 57924–2017. В стандарте приведено четыре метода испытаний и нормируемые показатели горючести. Испытания заключаются в воздействии пламени горелки на образец определенного размера, установленный в заданном положении, в течение регламентированного времени и определении показателей горючести в зависимости от выбранного метода.

Для определения степени горючести материалов различного назначения образцы для испытаний устанавливают по отношению к горизонту вертикально, горизонтально и под углами 45 и 60 градусов.

Применение материалов для различных областей влияет на выбор метода испытаний и продолжительность экспозиции пламенем горелки. Показатели, определяемые с помощью описанных методов: скорость распространения пламени, длина прогорания, продолжительность остаточного горения и/или тления и горения падающих капель и частиц.

В зависимости от степени горючести различают следующие группы материалов: трудносгорающие, самозатухающие, медленно сгорающие, медленно распространяющие пламя, сгорающие.

Методы испытания и предельные показатели горючести изложены в *Приложении к ГОСТ Р 57924–2017*.

Испытания по определению характеристик дымообразования проводят в дымовой камере в соответствии с требованиями АП-25, Приложение F, Часть V, ГОСТ 24632–81. Сущность метода состоит в определении удельной оптической плотности дыма при термическом разложении образца материала на основании измерения интенсивности светового потока, проходящего через задымленное пространство в испытательной камере. Испытания проводятся в двух режимах: пламенного горения и тления. В режиме пламенного горения на образец действуют тепловое излучение печи и пламя газовой горелки, в режиме тления – только тепловое излучение. Испытания проводят при тепловом потоке на образец, равном 25 кВт/м^2 .

Контролируемые параметры: оптическая плотность дыма за 2, 4 мин и максимально достигаемая в процессе эксперимента.

Сущность метода определения значений кислородного индекса ПКМ, проводимого по ГОСТ 21793–2017, заключается в определении минимальной концентрации кислорода в потоке смеси кислорода с азотом, необходимой для поддержания процесса горения образца.

Испытания по определению характеристик тепловыделения проводят в проточном калориметре согласно требованиям АП-25, Приложение F, Часть IV, СТБ 1-595-20-341. Сущность метода заключается в определении количества выделившегося тепла при горении образца под воздействием внешнего теплового потока. Испытания проводят при падающем тепловом потоке на образец, равном 35 кВт/м^2 .

Контролируемые параметры: максимальная интенсивность выделения тепла, общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин испытания.

Заключение

Представленный в данной статье материал свидетельствует о том, что в настоящее время имеется широкий спектр методов испытаний, позволяющих проводить контроль качества термопластичных связующих применительно к свойствам КТМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н. Термопластичные связующие для полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал. 2015. №11. Ст. 05. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 17.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-5-5.
2. Петрова А.П., Мухаметов Р.Р., Шишимиров М.В., Павлюк Б.Ф., Старостина И.В. Методы испытаний и исследований термореактивных связующих для полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журнал. 2018. №12 (72). Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 17.12.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-62-70.
3. Петрова Г.Н., Ларионов С.А., Платонов М.М., Перфилова Д.Н. Термопластичные материалы нового поколения для авиации // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 420–436. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-420-436.
4. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
6. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
7. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
8. Сорокин А.Е., Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Перфилова Д.Н. Слоистые углепластики на термопластичной матрице нового поколения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. №9. С. 10–17.
9. Бабин А.Н., Петрова А.П. Методы испытаний и исследований основных свойств полимерных связующих для конструкционных ПКМ // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. №3. С. 52–59.
10. Грельманн В., Зайдлер С. Испытания пластмасс. СПб.: Профессия, 2010. 720 с.
11. Николаев Е.В., Луценко А.Н., Барботько С.Л., Павлов М.Р., Абрамов Д.В. Комплексный методический подход к определению сохраняемости свойств полимерного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе при воздействии климатических и эксплуатационных факторов // Фундаментальные исследования и последние достижения в области защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов и сложных технических систем в различных климатических условиях. М.: ВИАМ, 2016. С. 13.
12. Барботько С.Л. Развитие методов оценки пожаробезопасности материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 516–526. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526.
13. Петрова А.П., Донской А.А. Клеящие материалы. Герметики. СПб.: Профessional, 2008. 589 с.
14. Деев И.С., Кобец Л.П. Исследование микроструктуры и особенностей разрушения эпоксидных матриц // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №5. С. 19–27.
15. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Особенности испытаний авиационных материалов на пожароопасность. Часть 1. Испытание на горючесть. Влияние толщины образца на регистрируемые характеристики // Пожаровзрывобезопасность. 2015. Т. 24. №1. С. 40–48.
16. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Старостина И.В. Литьевые термопласты для изделий авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. №7. С. 21–28.
17. Котомин С.В., Баранкова Т.И., Горбунова И.Ю., Филиппова Т.Н. Получение и свойства микропластиков с полисульфоном и монтмориллонитом. II. Прочность и адгезия микропластиков с полисульфоновой и композитной матрицей // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2016. №3. С. 6–12.

УДК 699.81:629.7.042.2

С.Л. Барботько¹, О.С. Вольный¹, В.И. Постнов¹, Е.Н. Шуркова¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ АРМИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-4-108-120

Исследовано влияние структуры армирования стеклопластика на основе фенолформальдегидного связующего и равнопрочной стеклоткани на характеристики пожарной опасности, определяемые в соответствии с требованиями авиационных норм.

По характеристике дымообразования не установлено однозначного влияния структуры армирования на регистрируемые значения оптической плотности дыма.

По характеристикам горючести и тепловыделения для данного типа материала получено, что при толщине ~2 мм наихудшие значения имеет материал с однонаправленной структурой армирования.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, стеклопластик, пожаробезопасность, горючесть, дымообразование, тепловыделение, укладка, структура армирования.

S.L. Barbotko¹, O.S. Volnyj¹, V.I. Postnov¹, E.N. Shurkova¹

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF REINFORCEMENT STRUCTURES ON FIRE HAZARD CHARACTERISTICS OF THE FIBERGLASS

The influence of reinforcement scheme for fiberglass based on phenol-formaldehyde binder and equal-strength fiberglass on fire hazard characteristics determined in accordance with the requirements of aviation standards is investigated.

There is no unambiguous effect of the reinforcement scheme on the recorded values of the optical density of smoke was established.

According to the characteristics of flammability and heat release for this type of material, it was obtained that at a thickness of about 2 mm the material with a unidirectional reinforcement structure has the worst values.

Keywords: polymeric composite material, fiberglass, fire safety, flammability, smoke density, heat release, scheme of laying, reinforcement structure.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Во всем мире происходит постепенное расширение применения полимерных материалов, они вытесняют такие конструкционные материалы, как сталь или алюминий, которые во многих отраслях промышленности до последнего времени считались незаменимыми. Это происходит за счет того, что полимерные композиционные материалы (ПКМ) обеспечивают лучшие характеристики по соотношению «прочность–масса». Работы по внедрению конструкционных ПКМ наибольшую актуальность имеют в авиационно-космической отрасли. Для обеспечения наилучшей весовой эффективности

ПКМ в зависимости от видов нагружения в конкретных условиях работы применяют различные виды наполнителей и разные схемы их укладки (структуры армирования). В ВИАМ за его 85-летнюю историю разработаны многие десятки различных полимерных материалов, эта работа не прекращается и в последние годы [1–5].

Подавляющее большинство полимерных материалов из-за своей органической природы в той или иной степени являются пожароопасными, так как способны к воспламенению, самостоятельному горению с выделением тепла, распространению пламени по поверхности, образованию дыма и токсичных продуктов термодеструкции. Сопоставление характеристик пожарной опасности различных типов полимерных материалов авиационного назначения приведено, например, в работе [6].

Определение характеристик пожарной опасности материалов авиационного назначения проводят в обязательном порядке, однако оценке влияния структуры наполнителя до последнего времени практически не уделялось внимания. Например, в книге [7] отмечается влияние структуры наполнителя на механические характеристики ПКМ, в том числе после воздействия огня, но совершенно не рассматривается влияние структуры армирования на пожаробезопасность.

Ранее проведенными исследованиями, например в работе [8], показано, что на характеристики пожарной опасности ПКМ влияет не только вид и содержание полимера, но также вид и поверхностная плотность наполнителя.

В данной работе сделана попытка оценить влияние структуры армирования на характеристики пожарной опасности. Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2. «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9–11].

Материалы и методы

В качестве объекта исследований выбран стеклопластик ВПС-42П/Т-64, изготавливаемый из препрега на основе фенолформальдегидного связующего ВСМ-16М и стеклоткани Т-64(ВМП).

При изготовлении образцов изменяли следующие параметры:

- количество слоев стеклоткани – соответственно толщину и поверхностную плотность материала;
- укладку стеклоткани.

Количество слоев стеклоткани в образцах меняли от 5 до 21.

Стеклоткань Т-64(ВМП) изготавливается по ТУ5952-009-16319666–98 и имеет следующие характеристики:

- тип переплетения – сатин 8/3;
- толщина $0,09 \pm 0,01$ мм;
- плотность ткани – по основе 22 ± 1 нитей/см, по утку 24 ± 1 нитей/см;
- разрывная нагрузка – по основе 882 Н, по утку 490 Н;
- поверхностная плотность 95 ± 5 г/м².

Хотя ткань формально считается равнопрочной, тем не менее существуют значительные (почти двукратные) различия по прочности в продольном и поперечном направлениях. В связи с этим при изготовлении материалов используются различные схемы укладки (структуры армирования): однонаправленная (все слои стеклоткани имеют одинаковое направление по основе), ортотропное (чередование слоев стеклоткани в одном направлении по основе и по утку) или квазиизотропное (чередование слоев

стеклоткани с укладкой продольной, поперечной и под углом 45 градусов). Различия в толщине и плотности нитей по основе и утку, а также их пространственная ориентация в схеме укладки оказывают влияние на теплофизические свойства материала, а соответственно – на его прогрев, образование и выход на поверхность газообразных продуктов термодеструкции. Влияние анизотропного наполнителя на теплофизические свойства композиционного материала отмечено в работе [12].

Поэтому в процессе исследования определены характеристики пожарной опасности при различных вариантах укладки – использованы следующие варианты укладки стеклоткани:

- однонаправленная (0° или 90°);
- ортотропная ($\pm 45^\circ$ или $0-90^\circ$);
- квазиизотропная ($0^\circ-90^\circ\pm 45^\circ$).

Содержание полимерной матрицы в составе образцов варьировали от 40,1 до 48,4% (по массе).

Огневые испытания образцов материалов для определения характеристик пожарной опасности проводили в соответствии с требованиями и методами, описанными в Авиационных правилах (АП-25, Приложение F, Части I, IV и V) [13]:

– метод определения горючести (АП-25, Приложение F, Часть I, ГОСТ Р 57924–2017, ОСТ1 90094–79). Испытания проводили на оборудовании марки AA07 производства фирмы Noselab (Италия) по методу 2 (вертикальная ориентация образца, продолжительность экспозиции пламенем горелки 60 с). В процессе испытания регистрировали продолжительность остаточного (самостоятельного) горения и длину прогорания образца;

– метод определения тепловыделения при горении (АП-25, Приложение F, Часть IV, ГОСТ Р 57928–2017). Испытания проводили в проточном калориметре типа OSU (модификация оборудования для испытаний авиационных материалов – ASTM E906 Configuration A) при падающем тепловом потоке на образец, равном 35 кВт/м^2 . По результатам испытаний регистрировали следующие показатели: максимальная интенсивность выделения тепла (MHRR), кВт/м^2 ; время достижения максимальной интенсивности тепловыделения, с; общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин испытания (THR2), $(\text{кВт}\cdot\text{мин})/\text{м}^2$;

– метод определения дымообразующей способности (АП-25, Приложение F, Часть V, ГОСТ 24632–81). Испытания по определению дымообразования проводили в двух режимах: «горение» (одновременное воздействие теплового потока и пламени) и «пиролиз» (только воздействие теплового потока). Испытания проводили на оборудовании марки SD#1 производства фирмы Govmark (США), соответствующем стандартам ASTM E662 и ASTM F814, при вертикальном положении образца и падающем тепловом потоке на образец, равном 25 кВт/м^2 . В процессе испытания регистрировали оптическую плотность дыма через 2 мин (D2), 4 мин (D4) и максимально достигаемую в процессе эксперимента (D_{max}).

Для каждого вида/режима огневых испытаний в соответствии с принятой практикой испытаний материалов авиационного назначения на пожаробезопасность [13–16] испытывали по три параллельных образца.

На образцах для измерения тепловыделения при горении (размер $150\times 150 \text{ мм}$) определяли массу и рассчитывали поверхностную плотность материала в г/см^2 .

Данные по образцам, предназначенным для определения характеристик пожарной опасности, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры образцов из стеклопластика ВПС-42П/Т-64
для проведения огневых испытаний**

Направление укладки	Условный номер образца	Количество слоев стеклоткани	Толщина образца, мм	Поверхностная плотность, г/м ²	Содержание связующего, % (по массе)
[0°]	1	6	0,65–0,68	1023	41,5
	2	10	1,04–1,05	1673	41,8
	3	20	2,00–2,01	3339	41,7
[0°; 90°]	4	5	0,54–0,56	875	42,5
	5	11	1,18–1,19	1934	43,0
	6	19	1,81–1,86	3166	40,1
[±45°]	7	5	0,59–0,62	929	44,8
	8	11	1,20–1,30	1983	45,0
	9	21	2,51–2,58	4031	48,4
[0°; 90°; ±45°]	10	6	0,60–0,67	1017	41,7
	11	12	1,21–1,25	2057	41,2
	12	18	1,89–1,91	3171	43,6

Результаты и обсуждение

Полученные данные по характеристикам пожарной опасности образцов из стеклопластика ВПС-42П/Т-64 приведены в табл. 2–4.

Все испытанные образцы по дымообразующей способности относились ко второй группе (слабодымящие) или незначительно ее превышали – оптическая плотность дыма (в зависимости от толщины образцов) за первые 2 и 4 мин составляла 0–39 ед., а максимальная – от 5 до 53 ед. Зарегистрированный разброс значений оптической плотности дыма при параллельных испытаниях сопоставим с регистрируемыми значениями оптической плотности дыма. В связи с этим оценить влияние различных факторов строения на характеристики дымообразующей способности для данного типа материала не представляется возможным. Поэтому в последующем проводился анализ влияния структуры (схемы укладки) только на характеристики горючести и тепловыделения.

Авторами данной статьи была сделана попытка оценить влияние укладки на характеристики горючести и тепловыделения. Как было показано ранее, например в работе [17], характеристики пожарной опасности, определяемые в соответствии с требованиями авиационных норм, существенным образом зависят от таких факторов, как количество слоев наполнителя, толщина образца и содержание полимерного связующего. Поскольку в связи с различными вариантами структур армирования использовалось различное количество слоев наполнителя и образцы несколько различались по содержанию связующего, то для получения объективной информации опробованы несколько вариантов построения зависимостей характеристик пожарной опасности: с изменением толщины, поверхностной плотности, массы полимера и количества слоев наполнителя.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости изменения характеристик горючести – длины прогорания и продолжительности остаточного (самостоятельного) горения.

Таблица 2

**Данные по характеристикам горючести стеклопластика ВПС-42П/Т-64
при времени экспозиции 60 с**

Условный номер образца – см. табл. 1	Продолжительность остаточного горения, с	Длина обугливания, мм
<i>1</i>	2	74
	2	78
	1	76
Среднее значение	2	76
<i>2</i>	3	82
	3	93
	1	76
Среднее значение	2	84
<i>3</i>	10	45
	17	56
	16	54
Среднее значение	14	52
<i>4</i>	1	112
	1	89
	2	99
Среднее значение	1	100
<i>5</i>	2	73
	5	83
	10	92
Среднее значение	6	83
<i>6</i>	11	55
	6	53
	4	44
Среднее значение	7	51
<i>7</i>	1	87
	2	102
	2	99
Среднее значение	2	96
<i>8</i>	1	84
	3	74
	10	75
Среднее значение	5	78
<i>9</i>	8	42
	7	33
	0	44
Среднее значение	5	40
<i>10</i>	1	88
	2	94
	1	90
Среднее значение	1	91
<i>11</i>	2	71
	1	86
	0	70
Среднее значение	1	76
<i>12</i>	0	53
	10	54
	0	60
Среднее значение	3	56

Таблица 3

Данные по характеристикам тепловыделения стеклопластика ВПС-42П/Т-64

Условный номер образца – см. табл. 1	Максимальная интенсивность выделения тепла (пик), кВт/м ²	Время достижения максимума, с	Общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин, кВт·мин/м ²
1	65	28	43
	78	34	47
	47	27	42
Среднее значение	63	–	44
2	46	79	51
	74	35	59
	65	60	61
Среднее значение	62	–	57
3	109	69	86
	78	117	70
	86	66	87
Среднее значение	91	–	81
4	65	27	39
	110	22	44
	80	29	47
Среднее значение	85	–	43
5	67	65	66
	58	76	67
	78	61	73
Среднее значение	68	–	69
6	49	178	30
	52	141	34
	48	189	20
Среднее значение	50	–	28
7	97	28	56
	97	28	47
	87	28	52
Среднее значение	94	–	52
8	90	56	87
	78	57	80
	78	67	87
Среднее значение	82	–	85
9	64	151	42
	56	213	8
	77	175	20
Среднее значение	66	–	23
10	73	33	52
	104	30	51
	47	33	42
Среднее значение	75	–	48
11	53	79	62
	83	64	76
	72	64	78
Среднее значение	69	–	72
12	84	102	82
	57	153	24
	75	125	43
Среднее значение	72	–	50

Таблица 4

Данные по характеристикам дымообразования стеклопластика ВПС-42П/Т-64

Условный номер образца – см. табл. 1	Дымообразование при горении/пиролизе		
	D ₂	D ₄	D _{max}
1	4/0	4/1	5/23
	8/1	12/7	39/17
	3/0	6/1	53/6
Среднее значение	5/1	7/3	32/15
2	0/1	1/3	12/13
	8/1	10/5	10/14
	1/1	6/5	12/10
Среднее значение	3/1	6/4	11/12
3	1/1	3/6	15/19
	1/1	3/2	13/11
	1/0	5/2	15/13
Среднее значение	1/1	4/3	14/14
4	9/1	10/2	16/6
	1/1	2/3	9/6
	1/1	4/2	10/5
Среднее значение	4/1	5/2	12/6
5	4/0	7/1	11/7
	13/0	17/0	17/6
	21/1	26/2	27/7
Среднее значение	12/1	17/1	18/7
6	1/1	3/4	14/17
	0/2	2/7	9/24
	1/1	5/2	15/16
Среднее значение	1/1	3/4	13/19
7	4/2	4/6	7/9
	4/2	5/4	9/7
	3/3	4/5	6/7
Среднее значение	4/2	4/5	7/8
8	23/2	39/7	39/15
	22/1	27/2	27/10
	2/1	6/2	13/9
Среднее значение	16/1	24/4	26/11
9	1/1	6/1	16/7
	1/2	1/3	9/11
	1/0	11/2	17/12
Среднее значение	1/1	6/2	14/10
10	6/2	7/5	12/10
	1/2	3/5	9/10
	1/1	3/4	8/8
Среднее значение	3/2	4/5	10/9
11	1/0	3/2	9/7
	17/0	19/1	19/8
	29/0	29/2	30/8
Среднее значение	16/0	17/2	19/8
12	1/3	3/3	10/4
	0/1	2/1	17/13
	1/0	3/1	17/17
Среднее значение	1/1	3/2	15/11

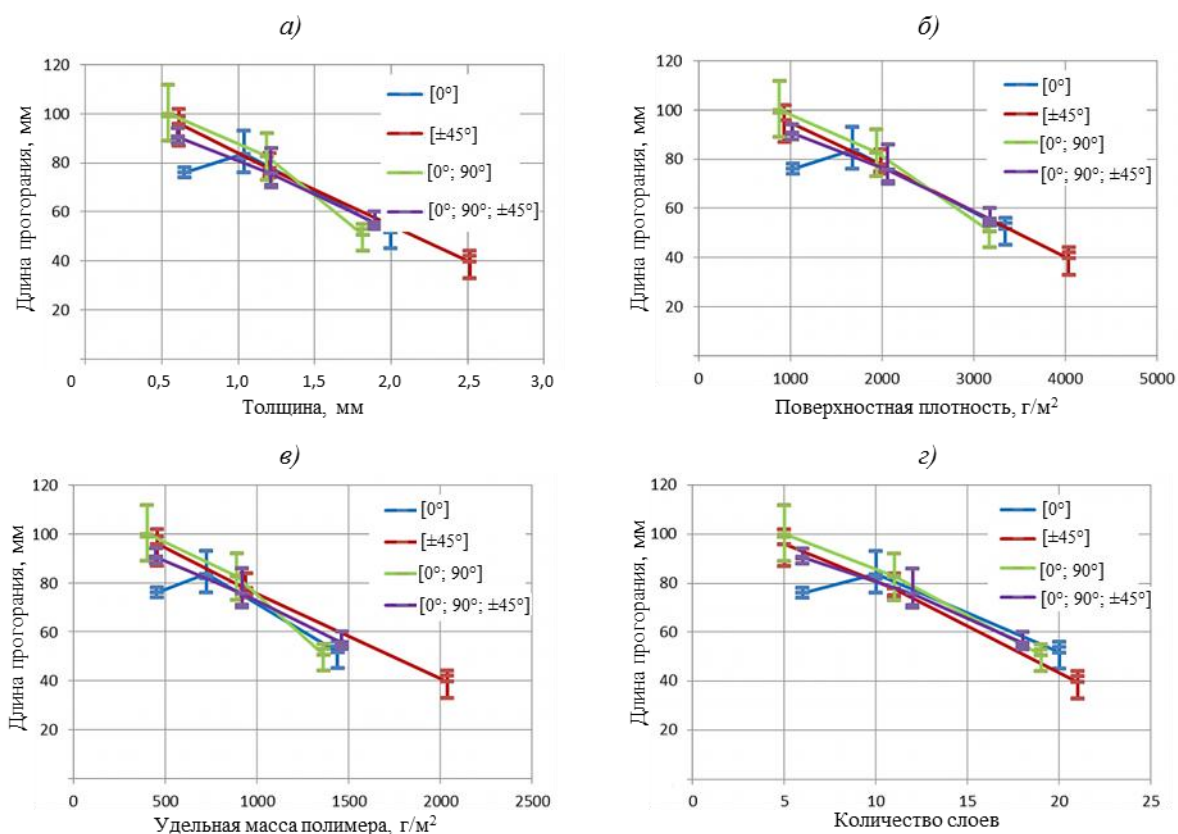


Рис. 1. Влияние структуры армирования на длину прогорания материала

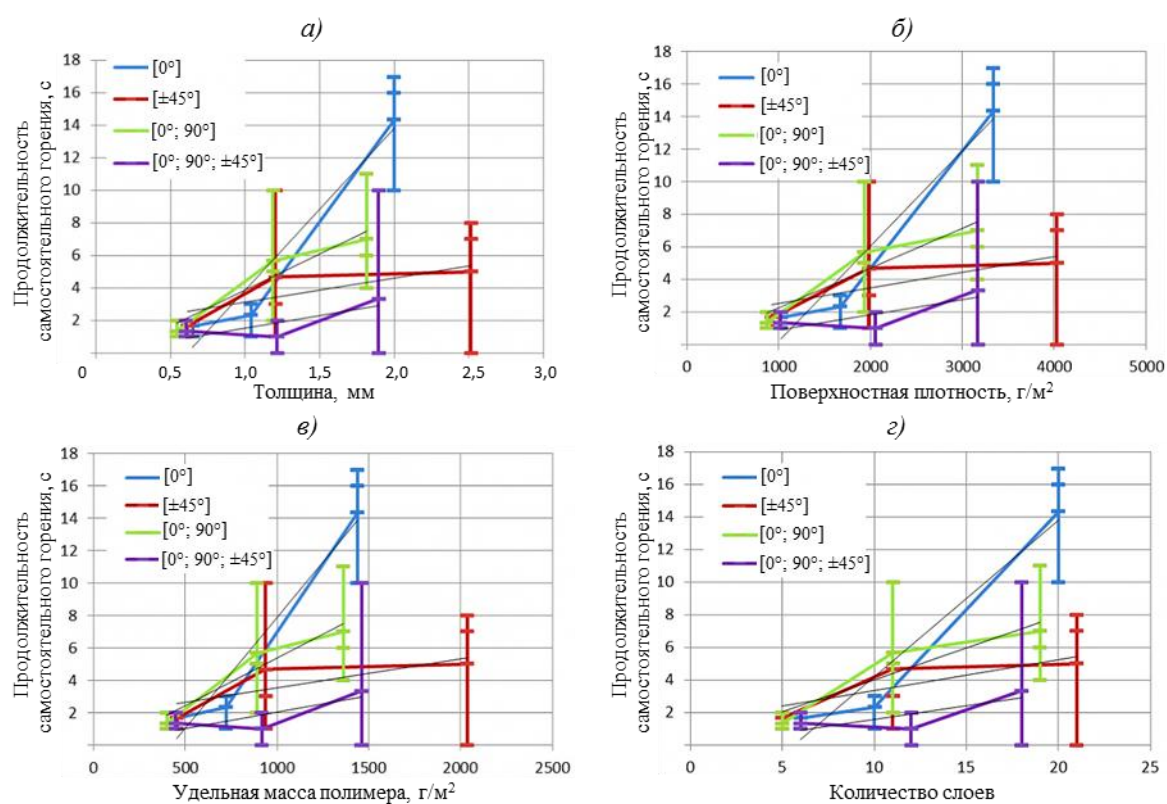


Рис. 2. Влияние структуры армирования на продолжительность остаточного (самостоятельного) горения

Известно, что длина прогорания в зависимости от толщины образца, как правило, монотонно снижается, при этом характер изменения близок к экспоненциальной функции [18]. Поэтому обычно считается, что наибольшую пожарную опасность по характеристике горючести представляют наиболее тонкие образцы [18, 19]. Полученные данные показывают монотонное снижение длины прогорания с увеличением толщины образца. Все образцы независимо от структуры армирования показывают практически идентичные результаты в различных системах координат (толщина, поверхностная плотность, масса полимера, количество слоев наполнителя), хотя наибольшее совпадение графиков наблюдается для систем координат «длина прогорания–толщина» и «длина прогорания–поверхностная плотность». Единственным зафиксированным отклонением по вариантам укладки является несколько меньшая длина прогорания для наиболее тонкого образца со схемой укладки $[0^\circ]$ – у этого образца наблюдается длина прогорания на ~20 мм меньше по сравнению с образцами других структур армирования и аналогичной толщины.

Другой характеристикой при оценке горючести является продолжительность остаточного горения. Во всех использованных вариантах систем координат можно наблюдать идентичное изменение продолжительности остаточного горения. При этом наибольшей крутизной роста отличается вариант материала с однонаправленной укладкой наполнителя. Но необходимо прокомментировать полученные результаты:

- все варианты образцов имели значительный разброс значений при параллельных испытаниях, поэтому отклонения разбросов значений достаточно широки и зачастую пересекаются;

- ранее показано [20], что с увеличением толщины образца продолжительность горения имеет ярко выраженный максимум. Так, величина максимума при продолжительности экспозиции пламенем горелки 60 с находится в области толщины ~2 мм, поэтому не исключен вариант, что при испытаниях образцов из материала с укладкой $[\pm 45^\circ]$ максимальные значения продолжительности остаточного горения не были экспериментально зафиксированы, так как изготовлены образцы несколько большей толщины.

Большие отклонения разброса данных свидетельствуют о близости значений толщины испытываемого образца к «критическим» значениям толщины, при которых наблюдается максимум продолжительности остаточного горения и они могут относиться как к восходящей, так и к нисходящей ветвям кривой. Поэтому сразу невозможно сделать вывод об однозначном различии по значениям характеристики горючести для наполнителя из равнопрочной ткани между вариантом укладки $[0^\circ]$ и остальными вариантами. Однако если для сравнительной оценки характеристики горючести при различных структурах армирования использовать комплексный индекс, описываемый по формуле среднего степенного (квадратичного) из относительной продолжительности остаточного горения и относительной длины прогорания [21], то видно существенное отличие однонаправленного материала от материалов с другими схемами укладки – материалы, имеющие перекрестное армирование, с увеличением толщины имеют не большое уменьшение индекса, в то время как однонаправленный материал показывает значительное возрастание индекса горючести (рис. 3).

Для характеристик тепловыделения полученные зависимости приведены на рис. 4. Все графики, независимо от использованной системы координат (толщина, поверхностная плотность, масса полимера, количество слоев стеклоткани) имели идентичный характер, поэтому на рисунках приведены только зависимости от толщины образца.

Все результаты по времени достижения максимальной интенсивности выделения тепла независимо от структуры армирования практически совпадали (рис. 4, а).

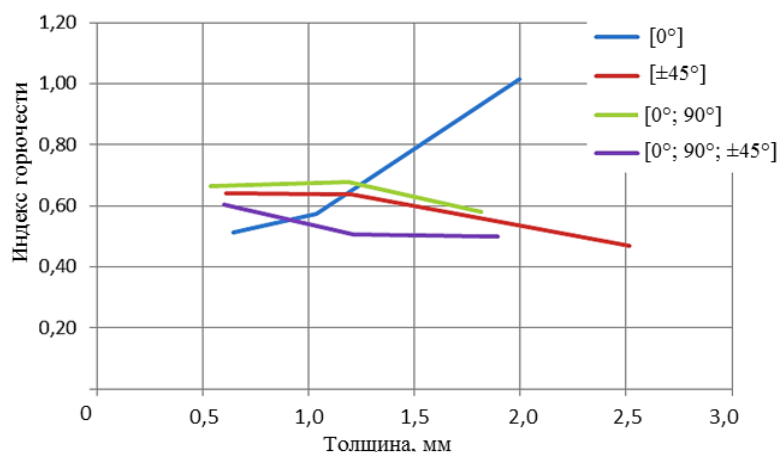


Рис. 3. Влияние структуры армирования на величину комплексного индекса горючести

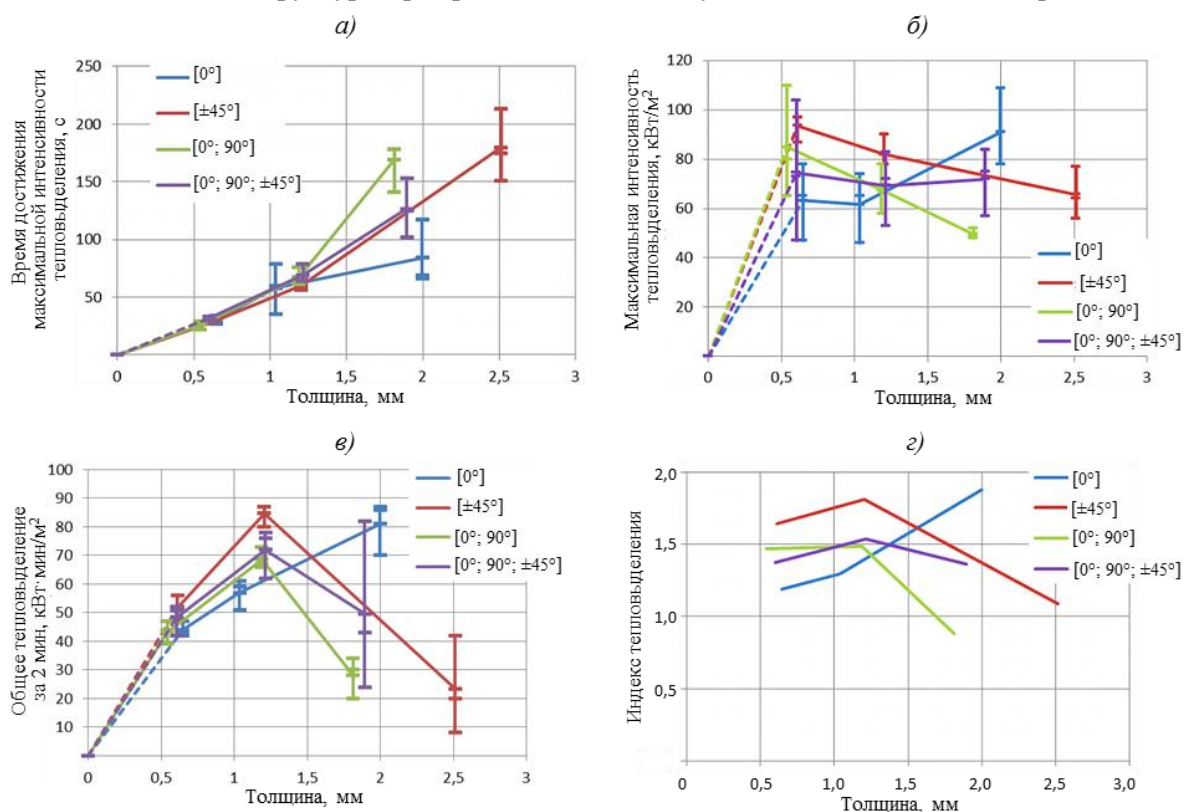


Рис. 4. Влияние структуры армирования на время достижения максимальной интенсивности тепловыделения (а), максимальную интенсивность тепловыделения (б), величину общего тепловыделения при горении (в) и комплексный индекс тепловыделения (г)

При испытании на тепловыделение образец подвергается воздействию теплового потока, действующего в трансверсальном направлении относительно плоскости материала, поэтому различия в ориентации образца ($0-90^\circ$ или $\pm 45^\circ$) не должны сказываться на полученных результатах. Имеющиеся отличия должны быть отнесены к статистическому разбросу данных. На основании этого можно сделать заключение, что не существует различий в характеристиках тепловыделения для ортотропной и квазиизотропной структур армирования (рис. 4, б, в).

Для однонаправленной схемы укладки есть небольшие отличия в характеристиках тепловыделения (максимальная интенсивность и общее количество выделившегося

тепла за первые 2 мин), но отклонения ошибок между данными для однонаправленной и ортотропной структурами близки. До толщины от 0 до 1 мм схема укладки наполнителя практически не влияет на зависимости «толщина–максимальная интенсивность тепловыделения» и «толщина–общее количество выделившегося тепла». При толщинах >1 мм наблюдается небольшое превышение значений тепловыделения для однонаправленной схемы укладки над аналогичными значениями для материалов с другими структурами армирования (рис. 4, б, в). Этот же вывод подтверждается и при расчете комплексного индекса тепловыделения (рис. 4, г).

В результате проведенного исследования установлено небольшое отличие по показателям пожарной опасности однонаправленной структуры армирования от ортотропной и квазиизотропной. Малые различия в зарегистрированных характеристиках пожарной опасности для различных структур армирования могут быть объяснены тем, что для испытаний выбрали равнопрочный тканый наполнитель. Для однонаправленного наполнителя (ровинга) эти различия могут быть значительными.

Заключения

Проведены исследования по влиянию схемы укладки тканого наполнителя (равнопрочная стеклоткань Т-64) на характеристики пожарной опасности стеклопластика на фенолформальдегидном связующем. Изучено влияние однонаправленной $[0^\circ]$, ортотропной $[0^\circ/90^\circ]$ или $[\pm 45^\circ]$ и квазиизотропной $[0^\circ/-45^\circ/90^\circ/+45^\circ]$ структур армирования на характеристики горючести (длина прогорания и продолжительность остаточного горения), дымообразования (оптическая плотность дыма за 2, 4 мин и максимальная) и тепловыделения при горении (максимальная интенсивность выделения тепла, время достижения максимальной интенсивности и общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин), определяемые в соответствии с требованиями авиационных норм. Исследования проведены для стеклопластиков в интервале толщин от 0,65 до 2,5 мм.

По характеристике дымообразования не установлено однозначного влияния структуры армирования на регистрируемые значения оптической плотности дыма.

По характеристикам горючести для данного типа материала не выявлено влияния структуры армирования на длину прогорания. Продолжительность остаточного горения тонких образцов (толщина – до 1,2 мм) практически не зависит от схемы укладки, для однонаправленных образцов толщиной ~2 мм зарегистрирована большая продолжительность остаточного горения.

По характеристикам тепловыделения при горении для данного типа материала не выявлено влияния схемы укладки на время наступления максимальной интенсивности выделения тепла. Аналогично характеристикам горючести характеристики тепловыделения (максимальная интенсивность выделения тепла и общее количество выделившегося тепла за первые 2 мин испытания) для тонких образцов данного материала практически не различаются при варьировании структуры армирования, а при большей толщине (~2 мм) наихудшие значения имеет материал с однонаправленной структурой армирования.

Несколько более высокая пожарная опасность при толщине образца 2 мм у однонаправленного материала, по сравнению с материалом, имеющим ортотропную или квазиизотропную структуру армирования, подтверждена при помощи расчета комплексных индексов горючести и тепловыделения.

Несколько худшие значения по пожарной опасности, зарегистрированные для материала с однонаправленной структурой армирования, могут объясняться различиями в условиях прогрева и выхода образующихся газообразных продуктов. В результате этого так называемая «критическая» толщина, при которой регистрируются наихудшие

значения пожарной опасности, для однонаправленного материала наблюдается при несколько больших величинах толщины образцов, чем для других схем укладки.

Сравнительно небольшое влияние схемы укладки на характеристики пожарной опасности стеклопластика может объясняться тем, что для данных исследований выбран наполнитель из равнопрочной ткани, имеющей небольшие различия в своих теплофизических свойствах в продольном и поперечном направлениях. Планируется продолжить данные исследования с наполнителем другой структуры – например, ровингом или жгутом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. На перекрестке науки, образования и промышленности // Эксперт. 2015. №15 (941). С. 49–53.
2. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 344–348. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348.
3. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
4. Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Тюменева Т.Ю. Клеевые препреги – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 379–387. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
5. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
6. Mouritz A.P. Fire Safety of Advanced Composites for Aircraft // ATSB Research and Analysis Report. Aviation Safety Research Grant – B2004/0046. 2006. 39 p. URL: http://www.atsb.gov.au/grant_20040046 (дата обращения: 08.11.2018).
7. Mouritz A.P., Gibson A.G. Fire Properties of Polymer Composite Materials. Springer, 2006. 398 p.
8. Шуркова Е.Н., Вольный О.С., Изотова Т.Ф., Барботько С.Л. Исследование возможности снижения тепловыделения при горении композиционного материала за счет изменения его структуры // Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 27–30.
9. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
10. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
11. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2001. №1. С. 3–8.
12. Staggs J.E.J. Modeling the Endothermic Decomposition of Hydrated Solids / In: Polymer Green Flame Retardants. Elsevier, 2014. P. 323–365.
13. Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 35-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 23.10.2015. 5-е изд. с поправками 1–8. М.: Авиаиздат, 2015. 290 с.
14. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes. CS-25. Amendment 15. July 21, 2014. 921 p.
15. Federal Regulations. Part 25 – Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes. URL: <http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=d7f8803c7bd1d50b6d68749e0b42d848&node=14:1.0.1.3.11&rgn=div5> (дата обращения: 08.11.2018).
16. Aircraft Materials Fire Test Handbook // DOT/FAA/AR-00/12. 2000. 235 p. URL: <http://www.fire.tc.faa.gov/handbook.stm> (дата обращения: 08.11.2018).

17. Барботько С.Л. Прогнозирование на основе математической модели изменения кинетики тепловыделения при горении стеклопластика // Пожаровзрывобезопасность. Т. 17. 2008. №5. С. 23–28.
18. Cambell S., Jensen M., Sattayatham P. Flammability Standardization Task Group – Final Reports: Federal Aviation Administration Draft Policy Memo. August 20, 2009. FAA Report DOT/FAA/TC-12/10. 2012. 881 p.
19. Flammability Testing of Interior Materials: Policy Statement No: PS-ANM-25.853-01-R2 / U.S. Department of Transportation. Federal Aviation Administration. 2013. 28 p.
20. Барботько С.Л., Вольный О.С., Шуркова Е.Н. Построение феноменологической модели, описывающей изменение характеристики горючести (продолжительность остаточного горения) в зависимости от толщины полимерного материала // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №10 (70). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-107-116.
21. Барботько С.Л., Голиков Н.И. О комплексной оценке пожарной опасности материалов // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. №6. С. 16–24.

РЕШЕНИЕ

**V МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ»**

22 марта 2019 г.

ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, г. Москва

Для развития и внедрения аддитивных технологий в Российской Федерации разработан и одобрен Минпромторгом России Комплексный план мероприятий, направленных на решение ключевых задач по следующим направлениям:

- создание единой информационной платформы на базе цифровых технологий;
- создание отечественных материалов нового поколения и аддитивных технологий изготовления деталей;
- разработка отечественного оборудования на базе отечественного программного обеспечения;
- разработка национальных стандартов и нормативной документации;
- совершенствование системы подготовки кадров по базовым инженерным специальностям;
- применение аддитивных технологий в производстве изделий высокотехнологичных наукоемких секторов медицины и препаратов фармацевтической промышленности;
- создание цифровых аддитивных производств.

В настоящее время рядом отечественных организаций начаты работы по данным направлениям в части разработки и квалификации материалов, разработки оборудования, а также подготовки и переподготовки кадров, выпуска национальных стандартов. Однако без централизованной поддержки государства масштабное внедрение аддитивных технологий в ключевых отраслях промышленности, требующее гибкого межотраслевого взаимодействия для предотвращения дублирования и сокращения сроков проведения исследований и опытно-конструкторских работ, не может быть реализовано.

По итогам обмена мнениями по тематике конференции ее участники решили:

1. Признать необходимым скорейшее формирование на базе Комплексного плана мероприятий по развитию и внедрению аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2025 года Государственной программы Российской Федерации «Развитие аддитивных технологий и создание цифровых производств».

Поручить Организационному комитету направить соответствующее обращение в адрес Минпромторга России.

2. Считать приоритетными в рамках реализации Комплексного плана перспективные работы, направленные на создание:

- оборудования, программного обеспечения, технологий для получения крупногабаритных деталей и узлов из легких, высокопрочных и жаропрочных материалов;
- композиционных металло- и керамоматричных, интерметаллидных высокотемпературных материалов, оборудования и технологий получения из них деталей и узлов специальной и гражданской техники;
- оборудования и методов неразрушающего контроля изделий аддитивного производства, в особенности крупногабаритных;
- унифицированных материалов, пригодных к использованию в различных отраслях.

3. Для обеспечения создания научно-технического задела, проведения прикладных работ по разработке оборудования, материалов и технологий, их внедрения в серийное производство, отметить необходимость комплексного решения задач в части создания и освоения аддитивных технологий, включая:

- фундаментальные задачи, связанные с созданием и прогнозированием свойств материалов, в рамках грантов РФФИ;
- фундаментально-прикладные работы в рамках грантов РНФ;
- прикладные задачи, связанные с разработкой материалов и технологий под задачи потребителей и конкретных изделий, а также освоение аддитивных технологий в опытном и серийном производстве – в рамках целевой подпрограммы, реализующей мероприятия Комплексного плана.

Повторно обратиться в Российский фонд фундаментальных исследований с предложением об обязательном объявлении отдельного конкурса ориентированных фундаментальных научных исследований по актуальным междисциплинарным темам в области аддитивных технологий, включая: фундаментальные и поисковые исследования по направлениям создания отечественного программного обеспечения, материалов нового поколения и технологий аддитивного производства и контроля; поиск решений по созданию аппаратной части и управляющих программ при разработке отечественного оборудования для аддитивного производства.

4. Отметить работу предприятий и организаций, входящих в Технический комитет по стандартизации «Аддитивные технологии» (ТК-182). К настоящему моменту в разной степени готовности и согласования находятся 28 национальных стандартов и их проектов по аддитивным технологиям.

Поручить заинтересованным участникам конференции проработать предложения по разработке нормативных документов в рамках деятельности ТК-182 на 2020 год и направить их в адрес Секретариата ТК.

5. Заинтересованным участникам конференции направить в адрес ТК-182 предложения для рассмотрения и включения в Программу национальной стандартизации на 2020 год.

Настоящее решение обсуждено и согласовано с участниками конференции.