

УДК 669.715

*В.В. Антипов¹, А.Н. Коновалов¹, Н.Ю. Серебрянникова¹,
А.В. Сомов¹, Ю.Н. Нефедова¹*

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ И ОГНЕНЕПРОНИЦАЕМОСТЬ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКОВ КЛАССА СИАЛ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АВИАСТРОЕНИИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-40-46

Разработана методика проведения испытаний на огнестойкость и огнестойкость с учетом требований зарубежных и отечественных нормативных документов к материалам, предназначенным для пожароопасных зон в авиационной технике. Проведены испытания на огнестойкость и огнестойкость алюминостеклопластиков различных экспериментальных составов на базе листов Al–Li сплава марки 1441. Приведены рекомендации по формированию алюминостеклопластиков с целью повышения их огнестойкости и огнестойкости. Показана возможность применения материалов класса СИАЛ для изготовления авиационных деталей, имеющих требования по огнестойкости и огнестойкости, на примере получения прототипа капота двигателя летательного аппарата.

Ключевые слова: алюминий-литиевый сплав, огнестойкость, огнестойкость, прогорание, гибридный материал, формирование алюминостеклопластиков.

*V.V. Antipov¹, A.N. Konovalov¹, N.Yu. Serebrennikova¹,
A.V. Somov¹, Yu.N. Nefedova¹*

INFLUENCE OF STRUCTURE ON FIRE RESISTANCE AND FIREPROOF FMLS SIAL-TYPE AND POSSIBILITY OF APPLICATION OF DATA OF MATERIALS IN AIRCRAFT INDUSTRY

A method of fire resistance testing subject to foreign and national regulations of materials made for fire dangerous areas in aircraft engineering was developed. Different compositions of aluminum fiber-glass materials based on 1441 Al–Li alloy sheets were tested to determine a fire-resistance value. Recommendations of forming an aluminum fiber-glass material to enhance a fire resistance level are stated. Technological process of manufacturing of aviation details with requirements of fire resistance is described through the example aircraft engine cowling prototype manufacture.

Keywords: Al–Li alloy, fire resistance, fireproof, burn-through, hybrid material, forming an aluminum fiber-glass material.

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

Разработка новых авиационных конструкционных материалов ведется непрерывно практически с момента зарождения авиакосмической отрасли [1]. Одной из групп материалов, которую можно рассматривать в качестве альтернативы по отношению к традиционным металлическим сплавам, являются гибридные материалы –

в частности, слоистые алюмокомпозиты. В отечественной практике за подобными материалами закрепилось наименование СИАЛ (Стеклопластик И АЛюминий), в зарубежной – более широко распространено обозначение GLARE (GL – стекло, A – алюминий, RE – армирование). Алюмокомпозиты обладают рядом преимуществ по сравнению с монолитными сплавами. Прежде всего, это высокое сопротивление развитию трещин усталости, обеспечиваемое благодаря многослойной структуре СИАЛов – чередованию металлических слоев и прослоек стеклопластика, армированных стекловолокном, которые тормозят развитие усталостных трещин. Кроме того, СИАЛы имеют высокий уровень удельных прочностных свойств в силу своей пониженной плотности, достигаемой за счет сочетания листов из алюминий-литиевого сплава и стеклопластиков [2, 3]. При этом довольно широко изучен уровень механических и эксплуатационных свойств алюмокомпозитов [4–15]. Однако имеется еще ряд особенностей данных слоистых материалов, выгодно отличающих их от традиционных. В частности, ранее специалистами ФГУП «ВИАМ» получены результаты, свидетельствующие о высокой пожаростойкости алюмокомпозитов [16]. Предложена теория, объясняющая механизм сопротивления алюмокомпозитов распространению пламени, суть которой состоит в следующем. Проведенный анализ характера разрушения при воздействии открытого пламени на слоистый алюмокомпозит показал, что внешний алюминиевый лист, имеющий толщину не более 0,4 мм, прогорает в течение 20–25 с, после чего действию пламени подвергается слой стеклопластика, который создает барьер воздействию пламени на последующие слои алюмокомпозитов. Эпоксидная (клеевая) матрица не выдерживает температуру открытого пламени (~1000°C) и происходит ее термодеструкция ($T_{\text{кокс}}=350\text{--}400^\circ\text{C}$). Образование газообразных продуктов вызывает расслаивание слоистого материала, т. е. разделение слоев алюмокомпозитов. Это разделение позволяет воздуху проходить через промежуточные слои, действуя как дополнительный изолятор [17–19]. Таким образом, для сквозного прогорания СИАЛа требуется существенно большее время по сравнению с монолитными металлическими сплавами, поскольку распространению пламени противодействуют два фактора – наличие стекловолокон и абляционный эффект, формирующийся за счет образующихся продуктов горения и термодеструкции полимера.

В данной работе проведены исследования с целью выявления основных структурных факторов, влияющих на огнестойкость и огнестойкость слоистых алюмокомпозитов на базе металлических листов алюминиевого сплава марки 1441, и разработки рекомендаций по повышению сопротивления распространению горения для данного типа материалов. Дополнительно показана возможность применения огнестойких СИАЛов на примере изготовления прототипа капота двигателя летательного аппарата.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 6.2. «Слоистые трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6].

Материалы и методы

В рамках формирования СИАЛов имеется возможность изменять как металлическую, так и стеклопластиковую составляющую. Согласно предложенной схеме формирования пожаростойкости основное влияние на этот показатель оказывает неметаллическая составляющая. В связи с этим большой интерес представляет изучение влияния структуры стеклопластика на сопротивление распространению горения.

В настоящее время широкое распространение получили композиционные препреги на основе ровинга или стеклоткани. При этом содержание связующего компонента в этих материалах может варьироваться. Кроме того, имеется возможность применения стеклоткани различной ориентации – однонаправленной и равнопрочной. В данной работе использовались ровинг РВМПН-10-600-14 с содержанием связующего ВСК-14-2МР в количестве 24 и 30% (по массе), а также стеклоткани КМКС-2.120.Т60 (однонаправленная) и КМКС-2м.120.Т64 (равнопрочная) с содержанием связующего ВСК-14-2 в количестве 37 и 55% (по массе) соответственно. Листы из алюминий-литиевого сплава марки 1441 перед сборкой пакетов обезжиривали и подвергали анодированию в хромовокислотном электролите. Сборку пакетов СИАЛа осуществляли послойной выкладкой клеевых препрегов. Соединение препрега в монослоях производилось «встык», без нахлестов. Формование алюмостеклопластиков проводили в автоклаве при температуре отверждения клеевого препрега с последующей выдержкой под давлением. Охлаждение заготовок алюмостеклопластиков до температуры 40°C после процесса формования проводили с низкой скоростью в автоклаве без снятия давления.

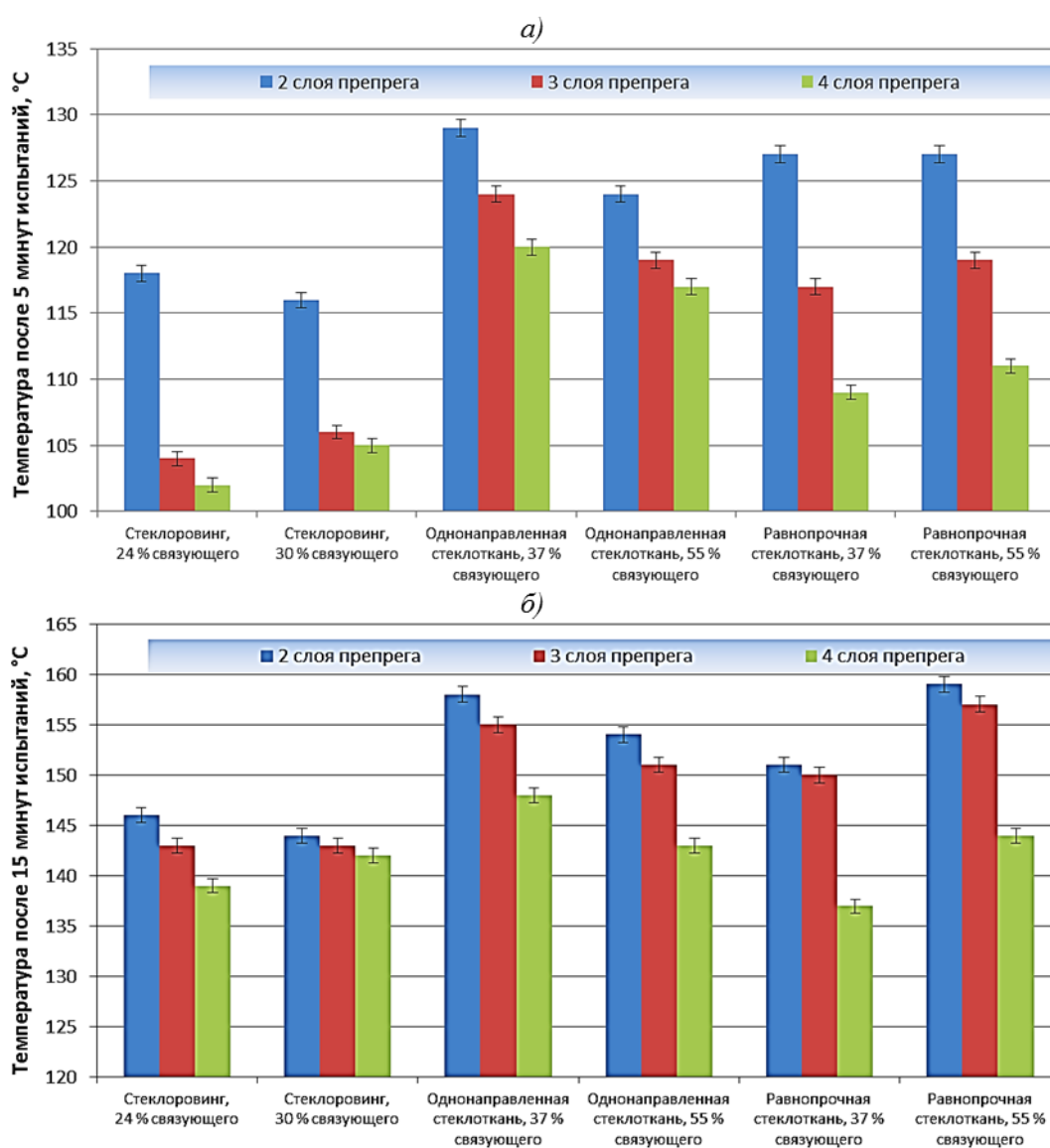
Таким образом, на базе металлической составляющей, представленной алюминий-литиевым сплавом марки 1441, и стеклопластиковой составляющей, сформированной из препрегов на основе стеклоровинга РВМПН-10-600-14, а также однонаправленной (КМКС-2.120.Т60) и равнопрочной (КМКС-2м.120.Т64) стеклотканей, изготовлены алюмостеклопластики для проведения испытаний на огнестойкость и огненепроницаемость. Дополнительно при формировании алюмостеклопластиков менялось количество слоев препрега (от двух до четырех) с целью оценки влияния толщины СИАЛа на показатели сопротивления распространению горения.

Отдельного упоминания заслуживает методика проведения испытаний, примененная при проведении данной работы. Нормативные документы, регламентирующие обеспечение безопасности при эксплуатации авиационной техники, предъявляют требования по огнестойкости и огненепроницаемости к ряду конструктивных элементов летательных аппаратов. Указанные требования приводятся как в Американских Федеральных авиационных нормах (FAR) и Европейских сертификационных правилах (CS), так и в отечественных авиационных правилах. В частности, в АП-23, АП-25, АП-27, АП-29, АП-33 и АП-ВД имеются требования по огнестойкости и огненепроницаемости материалов, используемых при изготовлении летательных аппаратов. Однако в указанных авиационных правилах не приводится методика проведения испытаний. При этом АП-29 дает определение терминов «огнестойкость» и «огненепроницаемость». Согласно этому документу, применительно к материалам и деталям, *огнестойкость* – способность противостоять в используемой конфигурации нагреву, возникающему вследствие пожара, в соответствии с целью их использования, по крайней мере, не хуже, чем алюминиевый сплав; *огненепроницаемость* – способность противостоять в используемой конфигурации нагреву в зоне сильного продолжительного горения в соответствии с целью их использования, по крайней мере, не хуже, чем сталь. Зарубежный стандарт ISO 2685 содержит подробное описание методики проведения испытаний на огнестойкость и огненепроницаемость. С учетом требований данного стандарта сотрудниками ФГУП «ВИАМ» разработана методика для оценки огнестойкости и огненепроницаемости материалов, предназначенных для пожароопасных зон в авиационной технике, согласно которой огнестойким признается материал или конструктивный элемент, способный выдерживать стандартное пламя как минимум в течение 5 мин при выполнении своих функций, а огненепроницаемым – в течение 15 мин. Дополнительно фиксируется время достижения температуры 200°C на расстоянии 100 мм от необогреваемой поверхности.

Для проведения испытаний изготовлены образцы с размером рабочей зоны 200×200 мм, толщина образцов составляла от 1 до 1,7 мм в зависимости от количества слоев препрега при выкладке. Температуру пламени устанавливали, равной 1100°C. Результаты измерений температуры фиксировали на протяжении всего времени проведения испытаний с помощью термопар, установленных с тыльной стороны образцов. Контроль испытываемых образцов на наличие прогара осуществляли визуальным способом.

Результаты и обсуждение

Испытаниям подвергали образцы, изготовленные с использованием листов алюминий-литиевого сплава марки 1441 и препрегов (ткань или ровинг) с различным содержанием связующего. Следует отметить, что по результатам испытаний воспламенение тыльной стороны и сквозное проникновение пламени отсутствовало для всех образцов как спустя 5 мин, так и после 15 мин воздействия пламени. Результаты измерений температуры представлены в графическом виде на рисунке.



Температура на расстоянии 100 мм от тыльной стороны испытываемых образцов СИАЛов различной структуры при воздействии пламени в течение 5 (а) и 15 мин (б)

Результаты, полученные спустя 5 мин испытаний, позволяют сделать следующие выводы. Все образцы, независимо от типа стеклопластикового наполнителя и количества связующего, являются огнестойкими, поскольку в течение указанного времени проведения испытаний не наблюдалось ни воспламенения тыльной стороны образца, ни сквозного проникновения пламени сквозь испытуемый образец. Температура на расстоянии 100 мм от тыльной стороны образцов на протяжении данного этапа испытаний не превышала 130°C. При этом для каждого из испытанных алюмопластиков наибольшую температуру с тыльной стороны имели образцы, изготовленные с применением двуслойного препрега. Наименьшая температура наблюдалась при испытаниях СИАЛов, полученных с использованием четырехслойных препрегов. В целом, на тыльной стороне образцов, полученных с применением ровинга, температура на 10–15°C ниже, чем на тыльной стороне образцов, изготовленных с использованием стеклотканей.

Спустя 15 мин испытаний для всех образцов также не наблюдалось ни воспламенения тыльной стороны образца, ни сквозного проникновения пламени, т. е. все испытанные типы слоистых алюмопластиков являются огнестойкими. Температура на расстоянии 100 мм от тыльной стороны образцов на протяжении данного этапа испытаний не превышала 160°C. Как и ранее, наименьшая температура наблюдалась при испытаниях СИАЛов, полученных с использованием четырехслойных препрегов. Образцы на двуслойных и трехслойных препрегах на данном этапе испытаний продемонстрировали близкие показатели по ограничению распространения температуры. Образцы, изготовленные с использованием стеклоровинга, спустя 15 мин испытаний также имеют некоторое преимущество перед образцами на базе стеклотканей.

Таким образом, согласно полученным результатам, испытанные образцы СИАЛов являются как огнестойкими, так и огнестойкими. Очевидно, что для данного типа материалов имеется значительный запас относительно регламентированного текущими нормативными документами времени сохранения огнестойкости. С целью проведения оценки величины данного запаса проведены дополнительные испытания, в которых образцы подвергались воздействию пламени вплоть до прогорания. Ранее установлено, что основной вклад в формирование огнестойкости СИАЛов вносит неметаллическая составляющая. В связи с этим, с целью упрощения и удешевления процесса изготовления образцов, испытаниям на полное прогорание подвергали образцы стеклопластиков без металлической составляющей. Результаты приведены в таблице.

Результаты испытаний на прогар стеклопластиков различной структуры

Компоненты стеклопластика		Количество слоев препрега	Время прогорания, мин
Стекловолокно	Количество связующего, %		
Ровинг	24	3	18
		4	32
	30	3	19
		4	28
Однонаправленная ткань	37	3	13
		4	25
	55	3	15
		4	28
Равнопрочная ткань	37	3	13
		4	27
	55	3	25
		4	35

Таким образом, наибольшее время сопротивления прогару демонстрируют образцы, изготовленные из четырехслойного препрега. В среднем описанные структуры стеклопластиков прогорают спустя около получаса воздействия открытого пламени, что двукратно превосходит требования действующих стандартов по огнестойкости. Исходя из

полученных результатов можно сделать следующие выводы. Поскольку испытанные СИАЛы являются как огнестойкими, так и огнестойкими, то в будущем для данного типа материалов целесообразно проводить испытания только на огнестойкость, поскольку в случае их успешного проведения материал можно считать и огнестойким. В целом наилучшим сопротивлением распространению огня обладают СИАЛы на базе стеклоровинга. Значительную роль при формировании огнестойкости алюмокомпозитов играет количество слоев препрега. Наибольшую стойкость, как и следовало ожидать, проявляют материалы с четырехслойной укладкой препрега, наименьшую – с укладкой в два слоя. Направление армирования в стеклоткани не оказывает существенного влияния на огнестойкость гибридного материала, поскольку образцы с однонаправленными и равнопрочными тканями, при прочих равных условиях, показали близкие результаты. При этом содержание связующего также не оказывает существенного влияния на огнестойкость СИАЛов.

На базе одной из исследованных в данной работе структур СИАЛов был изготовлен алюмокомпозитовый прототип капота двигателя летательного аппарата. Данный прототип удовлетворяет требованиям авиационных правил по огнестойкости с существенным запасом по времени сквозного прогорания. При этом по уровню прочностных характеристик изделие не уступает изготовленным из среднепрочных алюминиевых сплавов ($\sigma_b > 750$ МПа, $\sigma_{0,2} > 340$ МПа, $\delta > 6,5\%$), имея существенно меньшую плотность (до $2,4$ г/см³).

Отдельно следует отметить, что полученное изделие является довольно сложным с точки зрения конфигурации, поскольку содержит элементы, имеющие двойную кривизну. Изготовление данного прототипа дополнительно демонстрирует высокие технологические возможности автоклавного формообразования, позволяющего получать изделия за одну операцию, совмещая процессы спекания связующего, деформации и искусственного старения металлических листов.

Заключения

1. Независимо от укладки стекловолокон, содержания связующего и количества слоев при выкладке препрега все испытанные образцы из СИАЛов, изготовленные на базе листов из алюминиевого сплава марки 1441, удовлетворяют критериям как огнестойкости, так и огнестойкости. Кроме того, для ряда исследованных структур прогорание наступало не ранее 30 мин воздействия пламени, что свидетельствует о более чем двукратном превосходстве над требованиями современных нормативных документов в части огнестойкости материалов, используемых в авиационной технике.

2. Огнестойкость СИАЛа зависит от типа стекловолокна (ровинг или ткань) и количества слоев препрега. Наилучшую способность ограничивать распространение огня имеют алюмокомпозиты, изготовленные с применением препрегов со стеклоровингом РВМПН-10-600-14, обеспечивающие с тыльной стороны образца температуру не более 150°C . Увеличение количества слоев препрега с двух до четырех повышает огнестойкость алюмокомпозитов. Образцы, изготовленные с четырьмя слоями препрега, также обеспечивают температуру не более 150°C , независимо от типа используемого стеклонеполнителя в препрегах.

3. В случае применения для изготовления препрега стеклоткани (однонаправленная КМКС-2.120.Т60 и равнопрочная КМКС-2м.120.Т64) огнестойкость алюмокомпозитов несколько снижается, но продолжает соответствовать требованиям нормативной документации. Для равнопрочной стеклоткани прослеживается зависимость огнестойкости от количества связующего. Уменьшение доли связующего с 55 до 37% (по массе) приводит к снижению температуры на тыльной стороне образца на $7-8^\circ\text{C}$.

4. С учетом полученных результатов испытаний был изготовлен огнестойкий прототип капота двигателя летательного аппарата, имеющий высокие механические

свойства ($\sigma_b > 750$ МПа, $\sigma_{0,2} > 340$ МПа, $\delta > 6,5\%$) и низкую плотность (до $2,4$ г/см³). Получение данного прототипа свидетельствует о широких возможностях применения материалов класса СИАЛ, в том числе для изготовления деталей с повышенными требованиями по огнестойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука, 2005. 275 с.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект & Технологии. 2016. №2. С. 41–46.
3. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
4. Каблов Е.Н. О настоящем и будущем ВИАМ и отечественного материаловедения: интервью // Российская академия наук. 2015. 19 января. С. 10–15.
5. 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.
6. 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.
7. Roebroeks G.H.J.J. GLARE: a structural material for fire resistant fuselages // AGARD Conference Proceedings. October, 1996. P. 26–1; 26–13.
8. Characterisation of Fibre Metal Laminates under Thermo-mechanical Loadings / ed. M. Hagenbeek. Netherlands, 2005. P. 17–22.
9. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И. Структура и свойства конструкционных алюмокомпозитов марки СИАЛ // Слоистые композиционные материалы – 98: сб. тр. Междунар. конф. Волгоград, 1998. С. 131–133.
10. Шавнев А.А., Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В. Методы создания алюминиевых композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 35–42. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-35-42.
11. Фридляндер И.Н., Аниховская Л.И., Сенаторова О.Г. Клееные металлические и слоистые композиты. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. М.: Машиностроение, 2001. Т.: II–3. С. 814–832.
12. Подживотов Н.Ю., Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ерасов В.С. Слоистые металлополимерные материалы в элементах конструкции воздушных судов // Перспективные материалы. 2016. №10. С. 5–19.
13. Шестов В.В., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Конструкционные слоистые алюмокомпозиты 1441-СИАЛ // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. №9. С. 28–32.
14. Лещинер Л.Н., Латушкина Л.В., Федоренко Т.П. Сплав 1441 системы Al–Cu–Mg–Li // Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. Металловедение сплавов алюминия с литием. М.: ВИЛС, 1991. С. 76–77.
15. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Лукина Н.Ф., Сидельников В.В., Шестов В.В. Слоистые металлополимерные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 226–230.
16. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Сидельников В.В. Исследование пожаростойкости слоистых гибридных алюмокомпозитов класса СИАЛ // Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 36–41.
17. Барботько С.Л., Кириллов В.Н., Шуркова Е.Н. Оценка пожарной безопасности полимерных композиционных материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 56–63.
18. Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Влияние наполнителей на свойства клеевых препрегов и ПКМ на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2017. №4 (49). С. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
19. 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.