

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И СЖИГАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛА ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. И. Трушляков, Д. Ю. Давыдович

Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

**Проведен анализ состояния современных технологий утилизации армированных полимеров. Произведена постановка задачи исследования. На основе термодинамического анализа и рассмотрения различных комбинаций составов для проведения экспериментов было отобрано шесть типов тестовых многокомпонентных образцов для проведения экспериментальных исследований по их сжиганию. Определены максимальные температуры горения, температуры воспламенения образцов и масса остатков сгорания. Проведен анализ полученных результатов, выявлены составы компонентов для дальнейших исследований.**

**Ключевые слова:** сжигание, пластики, энергетические материалы, отделяющиеся части летательных аппаратов.

## Введение

В настоящее время существует серьезная проблема с наличием отделяющихся частей летательных аппаратов, например, головных обтекателей, хвостовых отсеков ракет-носителей, которые после выполнения миссии падают на выделенные территории государств, находящиеся под трассами пусков. Как правило, современные конструкции таких отделяющихся частей изготавливаются из полимерных композиционных материалов (ПКМ). В связи с чем возникает проблема утилизации таких объектов, усложняющаяся тем, что для ПКМ, используемых в ЛА, предъявляются высокие требования к термочувствительности, устойчивости к внешним воздействиям окружающей среды и т.д. [1, 2]. В ряде работ представлены исследования по поиску решений утилизации отделяющихся частей в полете с применением подвода дополнительных источников теплоты [3–5]. Специфика предлагаемых решений представляет собой утилизацию отделяющихся частей из традиционных материалов, т.е. без изменения материалов конструкции.

Также существуют технологические решения, направленные на вторичную переработку различных ПКМ в наземных условиях.

В основном все существующие технологии утилизации сводятся к разрушению связующего (матрицы), чтобы отделить армирующий наполнитель с последующей вторичной переработкой.

В работах [6, 7] приведены методы и технологии утилизации полимерных композиционных материалов, используемые за рубежом. Например, методы включают в себя физические (прим. механические), химические (прим. термокатализ, сольволиз) и термические (прим. сжигание, пиролиз). По простоте переработки механический метод занимает особое место из-за своей универсальности, такой метод подходит для любых ПКМ. В случае химических методов утилизации

необходимы дополнительные реагенты и емкости, в которых происходят реакции разложения, в частности, используются различные жидкости. Преимуществом таких методов является низкое энергопотребление. В свою очередь преимуществом, например, пиролиза, является сохранение свойств армирующих волокон после процесса пиролиза. Основным ограничением данного метода является возможность применения только в случае термостойких наполнителей. Тем не менее данный метод получил широкое распространение в таких странах, как Германия, Великобритания, США и др.

Таким образом, границы применимости различных методов утилизации приводят к необходимости понимания самого процесса деструкции и параметров, влияющих на эффективность утилизации. Так, в работах [8–10] приведены исследования по выявлению особенностей потерь массы и тепловых превращений при нагревании ПКМ. Показано, что термостабильность композитов на основе полимерной матрицы определяется природой матрицы, наполнителя, объемным содержанием компонентов, технологическими параметрами их получения и отверждения.

Таким образом, проведение утилизации отделяющихся частей ЛА в полете после отделения от ЛА возможно преимущественно термическими методами, но, принимая во внимание то, что для конструкций ЛА применяются ПКМ с повышенными свойствами термочувствительности, устойчивости и т.д., для этого требуются значительные затраты энергии, что ведет за собой критическое увеличение массы сжигаемой конструкции. Решением этой проблемы может послужить использование ПКМ с измененными свойствами термочувствительности и горючести. В текущей статье предлагается использовать в качестве материалов для изготовления отделяющихся частей ЛА пластики с добавлением в их состав высокоэнергетических материалов.

**Таблица 1. Перечень композиций тестовых образцов**  
**Table 1. List of test sample compositions**

№	Формула
I	90 % (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>3</sub> ) + 10 % (2KNO <sub>3</sub> + 3C + S)*
II(n)	70 % (KNO <sub>3</sub> ) + 0 % (Mg) + 2 % (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O) + 28 % (C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub> )
III(n)	80 % (KNO <sub>3</sub> ) + 0 % (Mg) + 4 % (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O) + 16 % (C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub> )
IV(n)	50 % (KNO <sub>3</sub> ) + 20 % (Mg) + 2 % (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O) + 28 % (C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub> )
V(n)	60 % (KNO <sub>3</sub> ) + 10 % (Mg) + 2 % (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O) + 28 % (C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub> )
VI(n)	40 % (KNO <sub>3</sub> ) + 30 % (Mg) + 2 % (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O) + 28 % (C <sub>8</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub> )

\* — образец, изготовленный экструзивным методом для печати с помощью аддитивных технологий. Отсюда следует ограничение по массовой доле дымного пороха в пластике — 10%. Образцы с более высокой массовой долей для печати на 3D принтере в данном случае не подходят из-за низкой адгезии дымного пороха.

\* — the sample made by the extrusion method for printing using additive technologies. This leads to a limit on the mass fraction of smoke powder in plastic — 10%. Samples with a higher mass fraction for printing on a 3D printer are not suitable in this case, because of the low adhesion of the smoke powder.

В целях снижения временных и ресурсных затрат для проведения теоретико-экспериментальных исследований вводится понятие «сжигаемый демонстратор» (СД), который представляет собой уменьшенный сжигаемый образец конструкции отделяющихся частей РН, например, трёхслойный элемент конструкции оболочки головного обтекателя ракеты-носителя, межступенного отсека.

СД изготавливаются для решения следующих задач:

— тип А (технологические): для отработки процессов изготовления на различных принципах, отработка процесса зажигания заряда-заполнителя и т.д.;

— тип Б (прочностные): для определения прочности;

— тип В (сжигание): для экспериментов по сжиганию в различных условиях (давление, различный состав энергетического материала, формы заполнителя-заряда, материал обшивки и т.д.).

Форма и линейные размеры СД определяются из условий решаемых задач А, Б, В [11].

### Постановка задачи

На основании выше изложенного формулируется концепция создания сжигаемых отделяющихся частей ЛА, на текущем этапе представляющих собой сжигаемый демонстратор, изготовленный из многокомпонентных пластиков с включением в их состав энергетических материалов.

В соответствии с проведённым обзором работ по утилизации различных элементов конструкций ЛА формулируется следующая постановка задачи исследований.

Разработка упрощённых технологий изготовления элементов СД на основе литья, аддитивной технологии, механизмов их зажигания, формирования требований к составам материалов заряда-заполнителя из условий возможности изготовления и т.д.

В качестве критерия эффективности решения задач {А} принимается формирование образцов заданной плотности и целостности с учетом включения в пластик дополнительных порошковых энергетических материалов.

В качестве критерия эффективности решения задач {Б} принимается соответствие прочностных характеристик аналогам традиционных материалов, используемых в конструкции отделяющихся частей ЛА.

В качестве критерия эффективности решения задач {В} принимается наивысшая температура горения, температура возгорания выше эксплуатационных температур ЛА, наименьшие остатки твердых продуктов сгорания.

Допущения:

1. Эксперименты по сжиганию проводятся при комнатных условиях (1 атм, 20 град. Цельсия).

2. В качестве формы и размеров тестовых образцов приняты образцы в форме прямоугольников с размерами 10×5×2 мм.

Ограничения:

1. Рассматриваются материалы с относительно низким классом опасности, т.е. нетоксичные, взрывобезопасные.

2. Для изготовления многокомпонентных материалов используются относительно недорогие составляющие компоненты.

3. Температуры возгорания отдельных компонентов и смеси в целом выше эксплуатационных температур на участке выведения РН.

4. Агрегатное состояние компонентов ограничивается возможностью смешения друг с другом.

### Термодинамический расчет фазового состояния продуктов реакции трехкомпонентных групп материалов

В качестве смесевых материалов используются: — энергетический материал для обеспечения горения: порошок магния, нитрат калия, дымный порох и т.д.;

— пластики, для обеспечения прочности конструкции заполнителя: полиметилметакрилат,

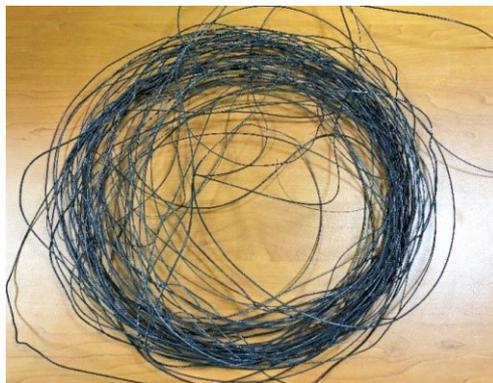


Рис. 1. Нить «полилактид+дымный порошок» диаметром ~1,75 мм

Fig. 1. «Polylactide+smoky powder» filament with a diameter of ~1,75 mm

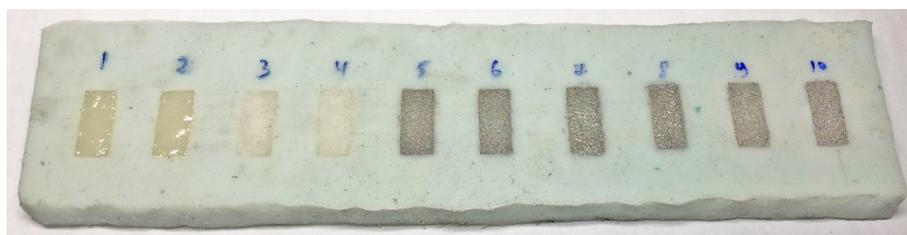


Рис. 2. Силиконовая форма для 10-ти тестовых образцов (с образцами внутри)

Fig. 2. Silicone mold for 10 test samples (with samples inside)

пластик на основе ортофосфорной кислоты, полилактид и т.д.

Допущения и ограничения:

— не учитывается химическая кинетика, т.е. не учитывается механизм и закономерности протекания химической реакции во времени;

— при расчетах предполагается, что вещества, участвующие в реакции, сгорают полностью.

На основе термодинамического анализа и рассмотрения различных комбинаций составов для проведения экспериментов по сжиганию было отобрано 6 типов тестовых образцов, включающих в свой состав следующие компоненты: полимер холодного формования на основе полиэфирной смолы (основа — ортофталевая кислота) и отвердителя на основе смеси пероксида метилэтилкетона в диметилфталате ( $C_8H_6O_4 + C_4H_8O$ ), порошок магния мелкой дисперсии, нитрат калия ( $KNO_3$ ), полилактид ( $C_3H_6O_3$ ), дымный порошок ( $2KNO_3 + 3C + S$ ). Эти компоненты были замешаны в композиции, приведенные в табл. 1.

Группы образцов под номерами II, III, V выбраны как варианты с наибольшей температурой сгорания на основании проведенного термодинамического расчета в программном комплексе для моделирования фазовых и химических равновесий [12]. Группы образцов IV и VI представлены как границы применимости вариаций связки магния и нитрата калия без потери цельности полимерной структуры, в основе которой заложен пластик.

На основании расчета фазового равновесия получены возможные продукты сгорания в зависимости от весового содержания реагирующих веществ, а также получены возможные температуры продуктов сгорания реагирующих веществ. Данные представлены в табл. 1.

#### Отработка изготовления тестовых многокомпонентных образцов пластиков

Для формирования конструкции заполнителя с помощью аддитивных технологий использовался 3D принтер Picasa 250 Pro. Принтер использует технологию послойного наплавления (Fused deposition modeling (FDM)) [13], при которой в качестве расходного материала используются термопластичные пластики. В данном случае для базового материала наиболее подходил PLA [14], в т.ч. из-за невысокой температуры плавления (до  $170^\circ C$ ), необходимой для изготовления филамента с включением дымного пороха, имеющего температуру воспламенения  $270 - 300^\circ C$ .

Для композиции под номером I, была изготовлена нить, для дальнейшего использования в 3D-печати (рис. 1).

Перед экструдированием порошок подвергался механическому измельчению в «пудру» с размерами частиц  $< 200$  мкм.

При изготовлении нити возникает проблема получения однородной субстанции из-за низкой адгезии дымного пороха, из-за чего нить полу-

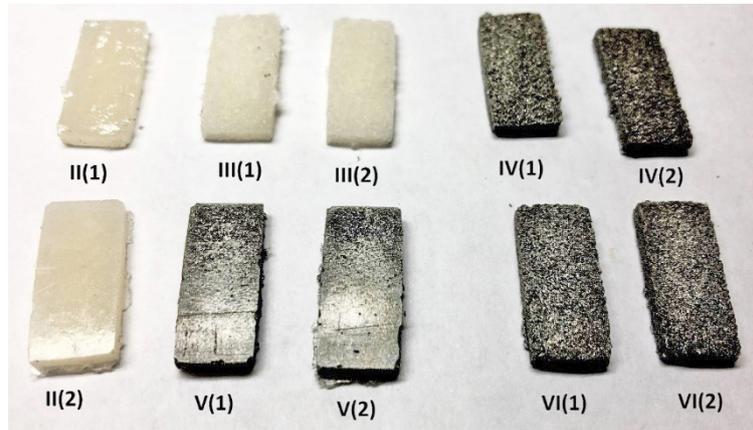


Рис. 3. Образцы, изготовленные по композициям из табл. 1  
 Fig. 3. The samples made according to the compositions from table 1

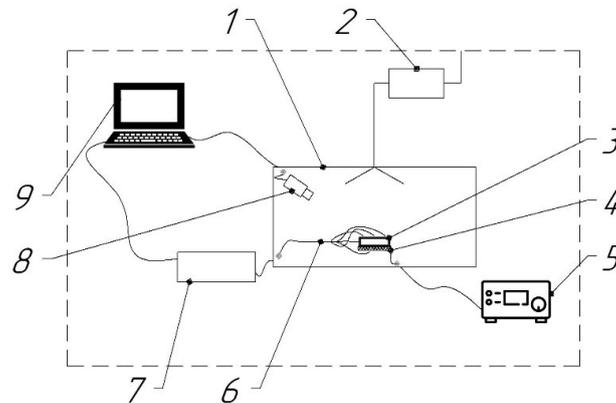


Рис. 4. Принципиальная схема стенда:

- 1 — вытяжная камера;
- 2 — фильтрующая система удаления продуктов сгорания;
- 3 — исследуемый образец; 4 — электрический нагреватель;
- 5 — источник питания для электрического нагревателя;
- 6 — система термопар; 7 — сканер температур;
- 8 — пирометр; 9 — ЭВМ.

Fig. 4. Stand schematic diagram:

- 1 — exhaust chamber;
- 2 — filter system for removing combustion products;
- 3 — test sample; 4 — electric heater;
- 5 — power supply for electric heater;
- 6 — thermocouple system; 7 — temperature scanner;
- 8 — pyrometer; 9 — computer

чается неодинакового диаметра с выступами за счет консолидированных частичек пороха. В результате чего возникает проблема с печатью на 3D принтере — при подаче нити через печатающий экструдер происходит закупоривание проходного сечения сопла, которое приводит к остановке печати. При печати подбирались различные параметры печати, в том числе различные температуры сопла и стола, разная скорость печати, силы прижима прутка в механизме подачи не привел к положительному результату. А также производился подбор диаметра проходного сечения печатной головки с помощью сменных сопел. В результате при-

менения перечня превентивных мер ни в одном из случаев не удалось получить требуемого результата печати. Принято решение на данном этапе отказаться от использования аддитивных технологий.

Для остальных композиций принято решение использовать способ изготовления энергетического материала с помощью литья полимеров холодного формования, а не с помощью аддитивных технологий.

Для проведения анализа влияния % массы в композициях II<sub>n</sub>, III<sub>n</sub>, IV<sub>n</sub>, V<sub>n</sub>, VI<sub>n</sub> были изготовлены силиконовые формы (рис. 2) для тестовых образцов, размерами 10×5×2 мм. На рис. 3



**Рис. 5. Состав оборудования для проведения экспериментальных исследований по сжиганию**  
**Fig. 5. Configuration of equipment for conducting experimental research on combustion**



**Рис. 6. Иницирование горения с помощью открытого пламени**  
**Fig. 6. The initiation of combustion with direct flame**

показаны изготовленные образцы в соответствии с перечнем в табл. 1.

#### **Состав оборудования для проведения экспериментальных исследований**

На рис. 4 приведена принципиальная схема стенда для проведения экспериментальных исследований по сжиганию при атмосферных условиях.

В том числе перечень оборудования, используемого при проведении экспериментальных исследований (рис. 5):

- вытяжной шкаф;
- многоканальный прецизионный сканер для измерения температур при помощи термопар (с автоматической компенсацией температуры холодного спая) МІС-140-96;
- эталонный термометр ЛТ-300;
- пирометр Compact СТ LT22;

- термопары ХК, ХА;
- система поджига образца, включающая электрический нагреватель и источник питания, устройство генерации открытого пламени;
- ЭВМ;
- видеоаппаратура для записи процесса горения и фиксации времени горения;
- лабораторные весы ВМ-510ДМ;
- система удаления продуктов сгорания.

Программное обеспечение для регистрации и анализа результатов измерения:

CompactConnect 1.10.5 позволяет просто и быстро параметризовать любые стационарные инфракрасные термометры серий Compact. Кроме этого, оно служит для анализа и документирования измеренных значений температуры; Recorder 3.4.0.1 — программа предназначена для работы в составе измерительного комплекса МІС, позволяет просматривать измеряемый сигнал в темпе эксперимента в графическом (графики, осцил-

Таблица 2. Результаты экспериментов  
Table 2. Experimental results

Измеряемый параметр	Образцы типа II(n)	Образцы типа III(n)	Образцы типа IV(n)	Образцы типа V(n)	Образцы типа VI(n)	
Температура возгорания	[K]					
	628	633	653	673	640	
Температура горения	[K]					
	1066	703	1173	1157	1150	
Время горения	[с]					
	≈130	≈68	≈11	≈11	≈22	
Масса продуктов сгорания твердой фазы	[гр]					
	(1)	≈0,858	≈0,602	≈0,380	≈0,352	≈0,363
	(2)	≈0,203	≈0,058	≈0,351	≈0,321	≈0,121
Продукты сгорания твердой фазы	% от начальной массы					
	(1)	59	40	28	27	26
	(2)	12	4	27	25	8

лограммы, гистограммы) и цифровом представлении; GraphMaker — программа предназначена для построения графиков температур в реальном времени.

#### Порядок проведения эксперимента

1. Включение вытяжной вентиляции, включение измерительно-регистрирующей аппаратуры, закрепление образца в рабочей части стенда, подключение регистрирующих датчиков.
2. Включение видео регистрирующей аппаратуры, начало записи;
3. Включение системы поджига образца. Регистрация температуры возгорания. Выключение системы поджига.
4. Регистрация времени и температуры горения образца.
5. После завершения горения: выключение измерительно-регистрирующей аппаратуры, снятие остатков продуктов сгорания образца со стенда. Взвешивание образца.
6. Завершение измерительной части эксперимента.
7. Анализ полученных результатов.

#### Обсуждение полученных результатов

В ходе экспериментов образцы были подвергнуты двум видам исследования:

- 1) выявление максимальной температуры горения образцов;
- 2) выявление температуры воспламенения образцов.

Для первого вида использовалось оборудование для замера температуры в двух точках, в качестве устройства инициирования горения использовался источник открытого пламени (рис. 6). Было исследовано 5 образцов (результаты исследования представлены в табл. 2). Наглядный, поэтапный процесс горения на примере образца IV продемонстрирован на рис. 7.

Второй вид исследований проводился с помощью оборудования для замера температуры в нескольких точках, в качестве устройства инициирования горения в данном случае использовался плоский нагреватель (рис. 8). Путем плавного изменения мощности нагревателя последовательно инициировалось возгорание образцов.

На основании проведенных исследований выявлено, что почти все группы образцов 5 типов композиций преодолевают границу максимальной температуры горения в 1000 К, кроме группы образцов типа III. Температура возгорания для всех групп образцов превышает 600 К, причем температура возгорания для образцов с более высоким содержанием порошка магния выше, чем для образцов без него. Также уменьшается время сгорания образцов с добавлением порошка магния, т.е. горение происходит интенсивнее. Сравнение по массе продуктов сгорания твердой фазы показывает, как влияют условия внешнего теплового воздействия на полноту сгорания образцов. Так, если в образцах нет высокоэнергетического компонента типа магния, например, образцы II (1) и III (1), то при инициировании горения с помощью открытого пламени остатки продуктов сгорания составляют до 60% твердой фазы. Но если образцы предварительно прогреть, как происходило с образцами II (2) и III (3), то величина продуктов сгорания твердой фазы значительно уменьшается и составляет уже до 12%. В то время как для образцов с добавлением магния такого различия не происходит и величина продуктов сгорания твердой фазы примерно соразмерна в независимости от условий инициирования горения.

Таким образом, после проведения серии экспериментов по зажиганию и сжиганию групп образцов с различными соотношениями компонентов в композициях можно заключить, что использование в составе композиции высокоэнергетических компонентов типа магния, и добавление окислителя типа нитрата калия,



$t = 0 \text{ c}$



$t = 3 \text{ c}$



$t = 6 \text{ c}$



$t = 9 \text{ c}$

Рис. 7. Процесс горения на примере образца IV(1)  
 Fig. 7. The combustion process on the example of sample IV (1)

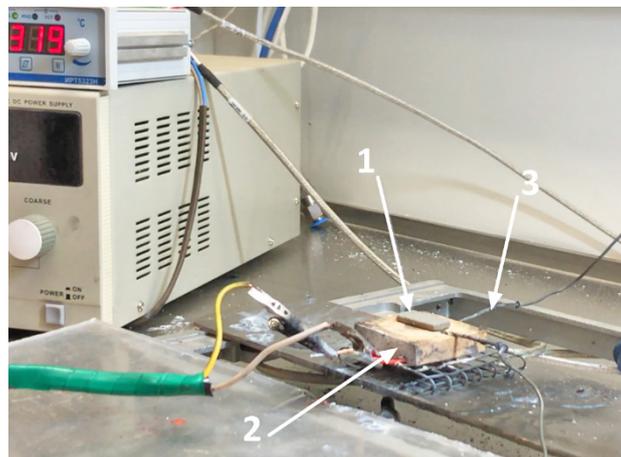


Рис. 8. Измерение температуры возгорания с помощью электрического нагревателя:  
 1 — исследуемый образец; 2 — нагреватель; 3 — термопары  
 Fig. 8. Measuring the ignition temperature using an electric heater:  
 1 — the test sample; 2 — the heater; 3 — thermocouples

приводит к значительному повышению температуры горения таких составов, а также приводит к увеличению температуры возгорания по сравнению с температурой возгорания пластиков без энергетических материалов, что имеет благоприятный характер для выполнения требований по

термопрочности для полета РН на участке выведения. Тем не менее необходимы дальнейшие исследования, в том числе по сжиганию и определению термопрочностных параметров уже на элементах конструкции различной формы типа сотовых конструкций.

## Заключение

1. Проведен предварительный анализ состояния современных технологий утилизации армированных полимеров.

2. Сформулирована постановка задачи исследования.

3. Отобрано шесть типов тестовых многокомпонентных образцов и проведены эксперименты по их сжиганию.

4. Отработана технология изготовления смесевых композиций, которая в дальнейшем будет использоваться для получения и исследования новых составов.

5. Проведен анализ полученных результатов, выявлены составы компонентов для дальнейших исследований.

## Благодарности

Исследования проведены при поддержке гранта Российского научного фонда №16-19-10091-П «Разработка научно-технических основ сжигания отделяющихся элементов конструкций ракет космического назначения с целью снижения площадей районов их падения».

## Список источников

1. Кириллов В. Н., Ефимов В. А., Шведкова А. К., Николаев Е. В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 4 (21). С. 41–45.

2. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Кротов А. С., Кириллов В. Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения // *Деформация и разрушение материалов*. 2010. № 11. С. 19–27.

3. Trushlyakov V., Panichkin A., Lempert D., Davydovich D. [et al.]. Method of heating of the separated parts of launch vehicle during the atmospheric phase of the descent trajectory // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 157. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.12.015.

4. Trushlyakov V., Davydovich D. The Use of Pyrotechnic Composition for Dispersing Fairings During Atmospheric Re-entry // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 174. P. 4–10. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.130.

5. Пат. 2672683 Российская Федерация, МПК F 42 В 15/36, В 64 G 1/64. Способ минимизации зон отчуждения отделяемых частей ракеты-носителя / Трушляков В. И., Давыдович Д. Ю., Лемперт Д. Б., Шатров Я. Т., Моногаров К. А., Муравьев Н. В. № 2017141320; заявл. 27.11.17; опубл. 19.11.18, Бюл. № 32.

6. Петров А. В., Дориомедов М. С., Скрипачев С. Ю. Технологии утилизации полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2015. № 8. С. 1–7. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-9-9.

7. Palmer J., Ghita O. R., Savage L., Evans K. E. Successful closed-loop recycling of thermoset composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009. Vol. 40 (4). P. 490–498. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.02.002.

8. Сабадаха Е. Н., Прокопчук Н. Р., Шутова А. Л., Глоба А. И. Термостабильные композиционные материалы // *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. 2017. № 2 (199). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termostabilnye-kompozitsionnye-materialy> (дата обращения: 09.01.2020).

9. Нистратов А. В., Ву Ким Лонг, Клушин В. Н., Мишкин С. И. [и др.]. Термографическое исследование отходов угле- и термопластиков как средство оценки рациональных условий их деструкции // *Труды ВИАМ*. 2017. № 11 (59). С. 98–106. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-10-10.

10. Бурдюгов С. И., Батракова Г. М., Вайсман Я. И., Карманов В. В. Исследование эффектов термического разложения композиционных материалов конструкционного назначения // *Химическая физика и мезоскопия*. 2011. Т. 13 (3). С. 319–325.

11. ГОСТ 25.601-80. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах. Введ. 1981-07-01. М.: Стандартинформ, 2005. 12 с.

12. Трусков Б. Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1995. 96 с.

13. Лысыч М. Н., Шабанов М. Л., Качурин А. А. Обзор современных технологий 3d печати // *Современные наукоемкие технологии*. 2015. № 6. С. 26–30.

14. Lebedev S. M., Gefle O. S., Amitov E. T., Zhuravlev D. V. [et al.]. Mechanical properties of PLA-based composites for fused deposition modeling technology // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97, Issue 1–4. P. 511–518. DOI: 10.1007/s00170-018-1953-6.

**ТРУШЛЯКОВ Валерий Иванович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код; 2910-2159

AuthorID (РИНЦ); 9914

AuthorID (SCOPUS); 56454317700

ResearcherID; D-7270-2015

Адрес для переписки: [vatrushlyakov@yandex.ru](mailto:vatrushlyakov@yandex.ru)

**ДАВЫДОВИЧ Денис Юрьевич**, аспирант кафедры «Авиа- и ракетостроение».

SPIN-код; 8904-4340

AuthorID (SCOPUS); 57193768965

ResearcherID; L-3363-2016

Адрес для переписки: [d-davydovich@mail.ru](mailto:d-davydovich@mail.ru)

## Для цитирования

Трушляков В. И., Давыдович Д. Ю. Экспериментальные исследования по технологии изготовления и сжигания конструкций ЛА из многокомпонентных материалов // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2020. Т. 4, № 1. С. 50–59. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-50-59.

Статья поступила в редакцию 20.01.2020 г.

© В. И. Трушляков, Д. Ю. Давыдович

# EXPERIMENTAL RESEARCH ON TECHNOLOGY OF MANUFACTURING AND BURNING OF AIRCRAFT STRUCTURES MADE OF MULTICOMPONENT MATERIALS

V. I. Trushlyakov, D. Ya. Davydovich

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

The analysis of the state of modern technologies for utilization of reinforced polymers is carried out. The task of the study was formulated. Based on thermodynamic analysis and consideration of various combinations of compositions for conducting experiments, six types of test multicomponent samples were selected for conducting experimental studies on their combustion. To determine the maximum combustion temperature, the ignition temperature of the samples, and the mass of combustion residues. The analysis of the results obtained was carried out, and the compositions of the components for further research were identified.

**Keywords:** combustion, plastics, energy materials, separated parts of aircraft and spacecraft.

## Acknowledgments

The research is supported by the Russian science fund grant for the project «Development of scientific-technical fundamentals of the combustion of the separated elements of space rockets with the goal of reducing the impact areas» the Agreement No. 16-19-10091-P 18.05.2016.

## References

1. Kirillov V. N., Efimov V. A., Shvedkova A. K., Nikolayev E. V. Issledovaniye vliyaniya klimaticheskikh faktorov i mekhanicheskogo nagruzheniya na strukturu i mekhanicheskiye svoystva PKM [Testing of climatic factors and the mechanical loading effect upon the polymer composite structure and properties] // *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii. Aviation Materials and Technologies*. 2011. No. 4 (21). P. 41–45. (In Russ.).
2. Kablov E. N., Startsev O. V., Krotov A. S., Kirillov V. N. Klimaticheskoye starenie kompozitsionnykh materialov aviatsionnogo naznacheniya. I. Mekhanizmy stareniya [Climate ageing of composite materials for aircraft purpose. I. Mechanisms of ageing] // *Deformatsiya i razrusheniye materialov. Deformation and Fracture of Materials*. 2010. No. 11. P. 19–27. (In Russ.).
3. Trushlyakov V., Panichkin A., Lempert D., Davydovich D. [et al.]. Method of heating of the separated parts of launch vehicle during the atmospheric phase of the descent trajectory // *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 157. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.12.015. (In Engl.).
4. Trushlyakov V., Davydovich D. The Use of Pyrotechnic Composition for Dispensing Fairings During Atmospheric Re-entry // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 174. P. 4–10. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.01.130. (In Engl.).
5. Patent 2672683 Russian Federation, IPC F 42 B 15/36, B 64 G 1/64. Sposob minimizatsii zon otchuzhdeniya otdel'nykh chastey rakety-nositelya [Method for minimizing the exclusion zones of separable parts of the launch vehicle] / Trushlyakov V. I., Davydovich D. Yu., Lempert D. B., Shatrov Ya. T., Monogarov K. A., Murav'yev N. V. No. 2017141320. (In Russ.).
6. Petrov A. V., Doriomedov M. S., Skripachev S. Yu. Tekhnologii utilizatsii polimernykh kompozitsionnykh materialov (obzor) [Recycling technologies of polymer composite materials (Review)] // *Trudy VIAM. Proceedings of VIAM*. 2015. No. 8. P. 1–7. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-9-9. (In Russ.).
7. Palmer J., Ghita O. R., Savage L., Evans K. E. Successful closed-loop recycling of thermoset composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009. Vol. 40 (4). P. 490–498. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.02.002. (In Engl.).
8. Sabadakh E. N., Prokopchuk N. R., Shutova A. L., Globa A. I. Termostabil'nyye kompozitsionnyye materialy [Thermostable composite materials] // *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskiye tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya. Proceedings of BSTU. Issues Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*. 2017. No. 2 (199). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/termostabilnye-kompozitsionnyye-materialy> (accessed: 09.01.2020). (In Russ.).
9. Nistratov A. V., Vu Kim Long, Klushin V. N., Mishkin S. I. [et al.]. Termograficheskoye issledovaniye otkhodov ugle- i organoplastikov kak sredstvo otsenki ratsional'nykh usloviy ikh destruktсии [Thermographic analysis of waste carbon and organic plastics as way of evaluation of rational conditions of their destruction] // *Trudy VIAM. Proceedings of VIAM*. 2017. No. 11 (59). P. 98–106. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-10-10. (In Russ.).
10. Burdyugov S. I., Batrakova G. M., Vaysman Ya. I., Karmanov V. V. Issledovaniye effektivov termicheskogo razlozheniya kompozitsionnykh materialov konstruktсионnogo naznacheniya [Analysis of thermal decomposition effects in structural composites] // *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya. Chemical Physics and Mesoscopy*. 2011. Vol. 13 (3). P. 319–325. (In Russ.).
11. GOST 25.601-80. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody mekhanicheskikh ispytaniy kompozitsionnykh materialov s polimernoy matritsey (kompozitov). Metod ispytaniya ploskikh obraztsov na rastyazheniye pri normal'noy, povyshennoy i ponizhennoy temperaturakh [Design calculation and strength testings. Methods of Mechanical testing of Polymeric Composite Materials Test for Tensile Properties on Plane Specimens at Normal, Elevated and Low Temperatures]. Moscow, 2005. 12 p. (In Russ.).

12. Trusov B. G. Modelirovaniye khimicheskikh i fazovykh ravnovesiy pri vysokikh temperaturakh [Modeling of chemical and phase equilibria at high temperatures]. Moscow, 1995. 96 p. (In Russ.).

13. Lysich M. N., Shabanov M. L., Kachurin A. A. Obzor sovremennykh tekhnologiy 3d pechati [Review modern technologies 3d printing] // *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. Modern High Technologies*. 2015. No. 6. P. 26–30. (In Russ.).

14. Lebedev S. M., Gefle O. S., Amitov E. T., Zhuravlev D. V. [et al.]. Mechanical properties of PLA-based composites for fused deposition modeling technology // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97, Issue 1–4. P. 511–518. DOI: 10.1007/s00170-018-1953-6. (In Engl.).

---

**TRUSHLYAKOV Valeriy Ivanovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Aviation and Rocketry Department.  
SPIN-code: 2910-2159  
AuthorID (RSCI): 9914

AuthorID (SCOPUS): 56454317700

ResearcherID: D-7270-2015

Address for correspondence:

vatrushlyakov@yandex.ru

**DAVYDOVICH Denis Yurievich**, Graduate Student, Aviation and Rocketry Department.

SPIN-code: 8904-4340

AuthorID (SCOPUS): 57193768965

ResearcherID: L-3363-2016

Address for correspondence: d-davydovich@mail.ru

#### For citations

Trushlyakov V. I., Davydovich D. Yu. Experimental research on technology of manufacturing and burning of aircraft structures made of multicomponent materials // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2020. Vol. 4, no. 1. P. 50–59. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-1-50-59.

Received January 20, 2020.

© V. I. Trushlyakov, D. Ya. Davydovich