

## Исследование термоокислительной деструкции материала на основе углеродных волокон

© П.В. Просунцов<sup>1</sup>, Д.Я. Баринов<sup>1</sup>, Е.А. Богачев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup> ОАО «Композит», г. Королёв, 141070, Россия

*Для разработки и проведения расчетов теплопереноса в теплозащитных материалах необходимо исследование механизмов деструкции материала. Для композиционного материала важно изучить поведение как материала в целом, так и каждой его составляющей. Работа посвящена исследованию термоокислительной деструкции высокопористого материала на основе рубленых углеродных волокон, который является преформой для создания перспективных углерод-керамических композиционных материалов. Исследование проводилось в окислительной среде воздуха с помощью синхронного термического анализа при варьировании исходной массы образцов и различных скоростях нагрева (5, 10, 20 К/мин). Получены зависимости тепловых эффектов от температуры в материале и от потери массы при деструкции для каждого образца. Установлено влияние изменяемых параметров на температуру начала деструкции материала и установившуюся скорость уноса. Показано, что деструкция материала происходит в поверхностном слое некоторой толщины. По результатам термогравиметрических исследований с различными скоростями нагрева разработана обобщенная кинетическая модель деструкции и определены кинетические характеристики разрушения.*

**Ключевые слова:** деструкция, абляция, окисление, скорость деструкции, температура деструкции, термогравиметрический анализ, кинетическая модель

**Введение.** В последнее время основной упор в материаловедении делается на композиционные материалы [1]. Эти материалы сочетают в себе высокие механические характеристики, низкую плотность и возможность конструирования, т. е. создания материала для определенных условий эксплуатации.

Особое место занимают материалы для тепловой защиты аппаратов от высокоинтенсивного теплового воздействия относительно небольшой продолжительности [2, 3]. Такие условия могут реализовываться при спуске аппарата с орбиты.

В настоящее время одним из наиболее перспективных материалов для тепловой защиты спускаемых аппаратов являются материалы, в которых силовым каркасом являются углеродные волокна [4]. Материалы могут быть пористыми, или пространство между волокнами материала может быть заполнено полимерной матрицей. Пористые материалы широко применяют для тепловой изоляции элементов оборудования (например, высокотемпературных вакуумных печей), работающих в инертной среде, до температур около 1500 °С. Такие

материалы изготавливают в виде панелей, плит, рулонов на основе углеродного войлока, имеющего теплопроводность  $0,07...0,5$  Вт/(м · К) (например, углеродный войлок компании «М-Карбо»).

В материалах с полимерной матрицей отвод теплоты от нагреваемой поверхности происходит за счет физико-химических процессов при деструкции связующего [5]. Эти материалы сочетают в себе низкую плотность наряду с высокой энтальпией разрушения [6] и могут применяться как при спуске с орбиты в атмосфере Земли, так и при полетах в атмосферах других планет. Например, их использовали для тепловой защиты спускаемых капсул миссий Stardust, Mars Science Laboratory (MSL), применяют в аппаратах Dragon компании SpaceX и планируют использовать для изготовления теплозащитного щита перспективного спускаемого аппарата Orion.

Создание материалов на основе углеродных волокон ведется и в нашей стране. Так, предложены керамические и углерод-керамические материалы с волокнами из углерода, карбида кремния и оксида алюминия [7]. Разрабатываются углерод-углеродные материалы (C–C) и углерод-керамические материалы (C–SiC), сочетающие в себе высокую прочность наряду с низкой плотностью [8]. Однако следует отметить, что такие материалы имеют невысокую окислительную стойкость при повышенных температурах, что ведет к необходимости нанесения защитных покрытий. Подобным защитным покрытием является карбид кремния, осаждаемый на пористый каркас из газовой фазы [9–11].

При проектировании композиционных материалов важное место занимает расчетно-экспериментальное определение теплофизических свойств [12]. В большей степени этот вопрос усложняется при расчете элементов тепловой защиты летательных аппаратов, работающих при высоких температурах в окислительной среде. Это связано с тем, что при эксплуатации происходит деструкция материала, изменяются его геометрические размеры и структура, формируются новые фазы. Кроме того, теплофизические свойства и характеристики протекания деструкции зависят от скорости нагрева материала. Поэтому для проведения моделирования тепло- и массообмена в материалах такого класса необходимо знать скорости разрушения и уноса материала в целом и отдельных его компонентов в зависимости от условий окружающей среды и тепловой эффект деструкции [13].

Целью данной работы является экспериментальное исследование термоокислительной деструкции материала на основе углеродных волокон и определение кинетических параметров деструкции.

**Объект и методы исследования.** Исследовалась деструкция пористого нетканого материала на основе рубленых углеродных волокон [14]. Материалы такого типа используют в качестве преформ при

изготовлении перспективных УККМ [15]. Исследуемый материал имеет кажущуюся плотность около  $150 \text{ кг/м}^3$ , при этом пористость может достигать 80...90 %. Общий вид материала на основе углеродного войлока показан на рис. 1.



**Рис. 1.** Общий вид материала на основе углеродного войлока

Одним из методов изучения физических свойств композиционных материалов являются термогравиметрический или синхронный термический анализ [16]. Эти методы хорошо зарекомендовали себя при исследовании массовой доли компонентов в полимерных композиционных материалах [17, 18], а также при определении температуры начала деструкции и выявлении особенностей выгорания на отдельных стадиях огнетеплозащитных эластомерных материалов [19].

Исследование термоокислительной деструкции углеродного материала проводилось с помощью метода синхронного термического анализа на приборе STA449F1 фирмы Netzsch. Этот прибор совмещает в себе методы дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа. Измерения образцов проводились в среде воздуха, который подавался в измерительную ячейку с помощью поршневого насоса через ресивер для сглаживания скачков давления. Скорость продувки образца воздухом составляла 70 мл/мин. Наряду с этим, через систему весов продувался защитный газ аргон со скоростью 30 мл/мин.

Образцы исследовались в тигле из оксида алюминия. Крышка тигля содержит отверстие в центре для обеспечения выхода газообразных продуктов реакции. Для лучшего теплового контакта на дно тигля насыпался порошок из оксида алюминия навеской около 10 мг, который впоследствии уплотнялся металлическим толкателем.

Образцы помещались на дно тигля и, поскольку после вырезки образцы содержали большое количество направленных в разные стороны остатков волокон (представляли собой «ежики»), с небольшим усилием вручную поджимались для обеспечения хорошего контакта

образца с дном тигля. Также предварительно прибор был откалиброван по температурам плавления стандартных веществ (In, Zn, Al, Au) для скоростей нагрева 5, 10 и 20 °С/мин в среде воздуха и получены соответствующие базовые линии при выполнении измерений с пустыми тиглями.

Экспериментальное исследование проводилось в два этапа. На первом этапе образцы материала нагревались со скоростью 20 °С/мин в воздушной среде до полного выгорания либо до температуры 1500 °С. Образцы при этом имели различную массу (от 17,5 до 6,5 мг), но были одинаковой геометрической формы в виде прямоугольной призмы. Это было необходимо для того, чтобы выявить зависимость скорости деструкции материала от массы образца. На втором этапе образцы нагревались с различными скоростями (5, 10, 20 °С/мин) в среде воздуха до полного выгорания. Результаты экспериментов в дальнейшем позволили получить кинетические параметры деструкции (число стадий деструкции, предэкспоненциальные множители, показатели степеней, энергии активации).

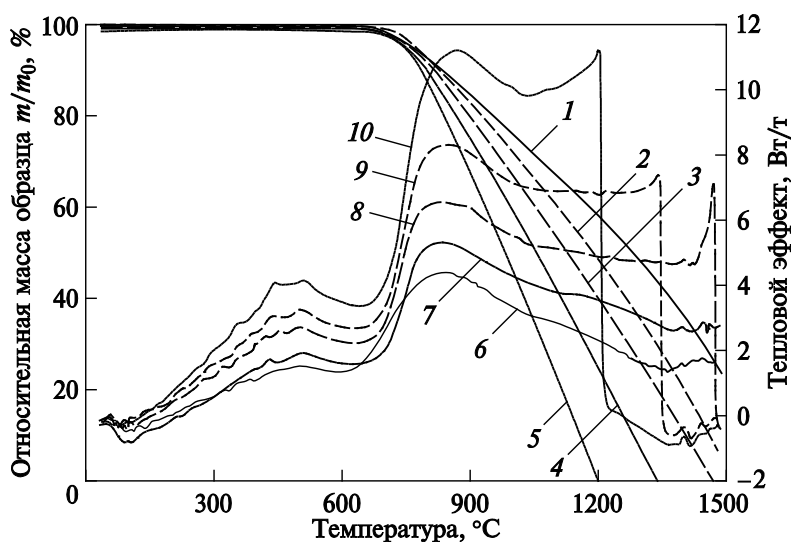
Для определения кинетической модели деструкции будем считать, что деструкция материала описывается уравнением с произвольным числом стадий. Результаты термогравиметрических исследований при различных скоростях нагрева обрабатывались с помощью метода многовариантной нелинейной регрессии. Для определения кинетических параметров деструкции использовался программный пакет Netzsch Thermokinetic 3.

**Результаты исследований.** Результаты экспериментального исследования образцов материала с различной массой при скорости нагрева 20 °С/мин приведены на рис. 2 и в табл. 1. Показаны зависимости относительных масс образцов  $(m/m_0) \cdot 100\%$  от температуры.

Температуры начала деструкции были определены двумя способами. В первом случае температура начала деструкции определялась как точка пересечения касательных, построенных до и после начала деструкции, что на рис. 2 выглядит как резкое изменение хода кривой в сторону уменьшения массы образца.

Во втором случае использовались первые производные по времени от зависимости изменения относительной массы, к которым строились касательные до и после начала деструкции, и определялась точка их пересечения. Были найдены скорости уноса массы материала в области установившейся деструкции. Эта область характеризуется постоянством значения первой производной от времени и находится в диапазоне температур от 900...1200 °С (образец 1), до 1300 °С (образец 2) или до полного выгорания (образцы 3–5). Скорость уноса определялась как отношение изменения массы образца  $\Delta m$

к приращению времени  $\Delta t$ . Для образцов 1 и 2 видно, что термогравиметрические кривые имеют изменения углов наклона в диапазоне температур 1300...1400 °С. Поэтому в табл. 1 указаны две установившиеся скорости деструкции соответственно до и после изменения угла наклона.



**Рис. 2.** Результаты экспериментальных исследований образцов материала различной массы при скорости нагрева 20 °С/мин: 1–5 — методом термогравиметрического анализа; 6–10 — методом дифференциальной сканирующей калориметрии

Таблица 1

**Результаты исследований образцов различной массы при скорости нагрева 20 °С/мин**

Номер образца	Номер кривой на рис. 2	Начальная масса образца, мг	Температура начала деструкции, °С		Установившаяся скорость деструкции, мг/мин	
			по 1-й производной	по температуре начала процесса		
1	1, 6	17,5	661	738	1,79	2,73
2	2, 7	12,8	684	749	2,41	3,24
3	3, 8	10,4	686	752	2,83	
4	4, 9	8,7	690	758	3,42	
5	5, 10	6,5	695	762	4,49	

Результаты экспериментальных исследований образцов материала, полученные при скоростях нагрева 20, 10, 5 °С/мин, приведены на рис. 3 и в табл. 2.

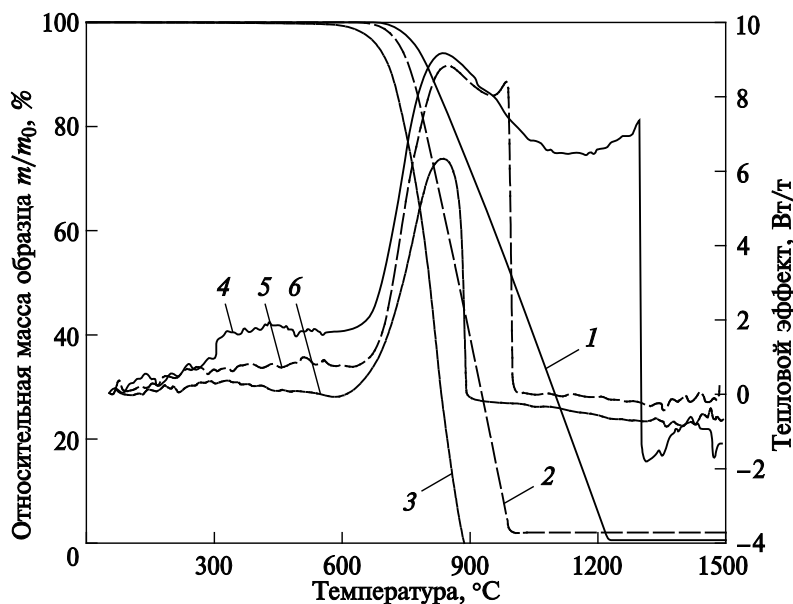


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований материала при скоростях нагрева 5 (кривые 1, 4), 10 (кривые 2, 5) и 20 °С/мин (кривые 3, 6)

Таблица 2

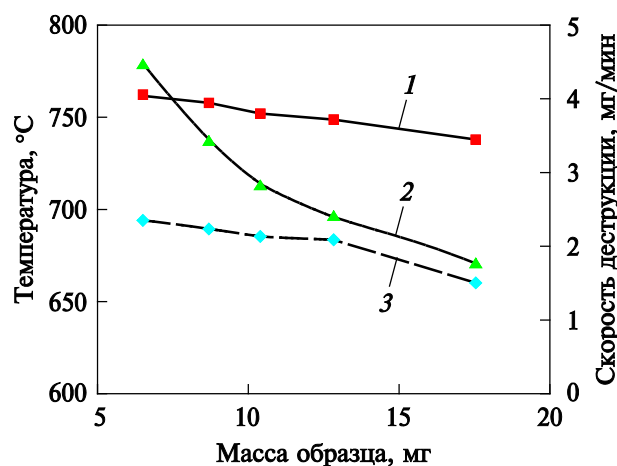
Результаты исследований образцов при различных скоростях нагрева

Номер образца	Скорость нагрева, °С/мин	Начальная масса образца, мг	Температура начала деструкции, °С		Установившаяся скорость деструкции, мг/мин
			по 1-й производной	по температуре начала процесса	
1	20	5,7	702	771	4,42
2	10	7,9	682	745	3,96
3	5	8,3	680	727	3,12

**Обсуждение результатов.** На рис. 3 видно, что образцы массой 17,5 и 12,8 мг при нагреве со скоростью 20 °С/мин сгорели не полностью. После завершения эксперимента твердого остатка в тигле не наблюдалось в связи с тем, что образец догорел при остывании прибора. При нагреве общая потеря массы остальных образцов составляет 100 % (см. рис. 2 и 3). Это свидетельствует о том, что образец сгорает полностью. При осмотре тиглей после эксперимента твердого несгоревшего остатка также не наблюдалось. Некоторый разброс значений массы (~1 %) образца в конце экспериментов связан с погрешностями определения исходной массы образцов на аналитических весах, имеющих цену деления 0,1 мг.

По данным табл. 1 были построены зависимости, которые приведены на рис. 4. Согласно рисунку, зависимость скорости деструкции от массы образца носит нелинейный характер. Можно предположить,

что в области небольших масс (до 10 мг) образец имеет более развитую удельную поверхность горения по сравнению с образцами, имеющими массу около 15 мг и более (см. табл. 1). Это условие может реализоваться в случае, если деструкция образцов большой массы происходит в слое некоторой толщины.



**Рис. 4.** Зависимости изменения температуры начала деструкции по термогравиметрической кривой 1 и по 1-й производной (кривая 3) и установившейся скорости деструкции (кривая 2) от массы образца

В центральной области образца большой массы имеется область, заполненная инертными газообразными продуктами реакции. При этом продукты разложения из периферийной области образцов удаляются воздухом, продувающим измерительную ячейку. При горении образца его масса и размеры уменьшаются, и в некоторый момент времени застойная зона, заполненная продуктами горения, перестает существовать, что можно заметить по изменению угла наклона термогравиметрической кривой для образцов 1 и 2 и увеличению скорости деструкции. Кроме того, это согласовывается со значениями установившейся скорости деструкции для образцов 3 и 4, для которых скорость деструкции постоянна.

При варьировании массы образцов температуры начала деструкции, определенные по термогравиметрическим кривым, изменяются от 738 до 762 °C, при этом меньшее значение температуры соответствует большей массе образца. Температуры деструкции, определенные по 1-м производным, соответственно изменяются от 661 до 695 °C. На рис. 4 видно, что зависимость температуры начала деструкции от массы носит линейный характер, и некоторое отклонение связано с погрешностями эксперимента. Установлено, что наблюдается тенденция уменьшения температуры начала деструкции при увеличе-

нии массы образца, однако для выявления закономерностей в изменении этой температуры необходимо проведение дополнительных исследований.

По данным табл. 2 были построены зависимости, которые приведены на рис. 5. Как показано на рисунке, при уменьшении скорости нагрева образца снижаются температура начала деструкции и скорость деструкции. Зависимость температуры начала деструкции от скорости нагрева имеет линейный характер, в то время как скорость деструкции значительно уменьшается при снижении скорости нагрева. Это может быть связано с увеличением времени воздействия температуры при уменьшении скорости нагрева. Время нахождения образца при конкретной температуре увеличивается, при этом изменения в материале начинают проявляться при более низкой температуре.

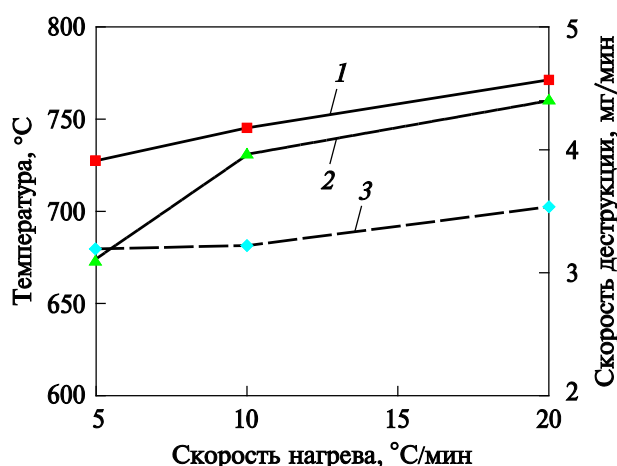


Рис. 5. Зависимости изменения температуры начала деструкции по термогравиметрической кривой 1 и по 1-й производной (кривая 3) и установившейся скорости деструкции (кривая 2) от скорости нагрева образца

Анализ термогравиметрических кривых, полученных при скоростях нагрева 5, 10 и 20 °С/мин, проводился методом многовариантной линейной регрессии. В этом случае возможен одновременный анализ нескольких измерений, проведенных при разных скоростях нагрева. В результате была определена обобщенная кинетическая модель деструкции и было установлено, что процесс описывается одностадийной реакцией первого порядка, уравнение которой имеет вид:





Было проведено математическое описание зависимостей, при этом экспериментальные и расчетные кривые согласовываются между собой со степенью корреляции 0,997, что свидетельствует о правильности выбора обобщенной модели деструкции. Определены кинетические параметры деструкции материала, значения которых приведены ниже:

Число стадий .....	1
Энергия активации $E_a$ , кДж/моль .....	136,3022
Предэкспоненциальный множитель $B$ .....	3,5868
Показатель степени .....	0,9361

Экспериментальные и расчетные зависимости, полученные для разных скоростей нагрева, приведены на рис. 6. Видно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных кривых.

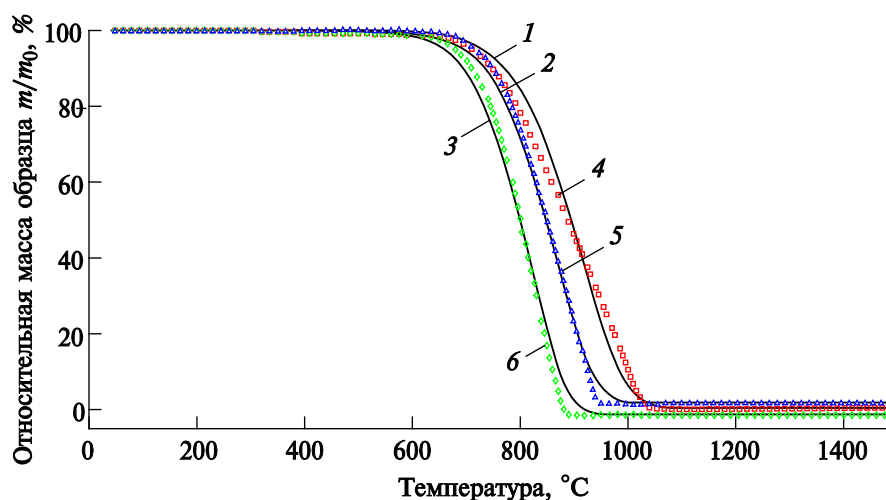


Рис. 6. Термогравиметрические кривые для скоростей нагрева 5, 10 и 20 °C/мин, полученные экспериментальным (кривые 1–3) и расчетным (кривые 4–6) путем

**Заключение.** Проведено исследование термоокислительной деструкции образцов пористого материала на основе рубленых углеродных волокон с помощью термогравиметрического анализа. Для исследования были выбраны образцы различной массы, их подвергали нагреву при разных скоростях.

Установлено влияние массы образца на температуру начала деструкции и установившуюся скорость деструкции. С увеличением массы образца с 6,5 до 17,5 мг температура начала деструкции уменьшается с 762 до 738 °C, скорость деструкции при этом уменьшается с 4,49 до 1,79 мг/мин.

Установлено влияние скорости нагрева образца на температуру начала деструкции и установившуюся скорость деструкции. При увеличении скорости нагрева с 5 до 20 °С/мин температура начала деструкции увеличивается с 727 до 771 °С, при этом скорость деструкции возрастает с 3,12 до 4,42 мг/мин.

С помощью метода многовариантной нелинейной регрессии установлен тип реакции, согласно которой происходит деструкция материала. Со степенью корреляции более 0,99 построена математическая модель деструкции и определены кинетические параметры деструкции: число стадий, предэкспоненциальный множитель, показатель степени и энергия активации.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мэттьюс Ф., Ролингс Р. *Композитные материалы. Механика и технология*. Москва, Техносфера, 2004, 408 с.
- [2] Никитин П.В. *Тепловая защита*. Москва, Издательство МАИ, 2006, 512 с.
- [3] Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. *Тепловая защита*. Москва, Энергия, 1976, 392 с.
- [4] Bessire B.K., Minton T.K. Decomposition of Phenolic Impregnated Carbon Ablator (PICA) as a Function of Temperature and Heating Rate. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, vol. 9 (25). DOI: 10.1021/acsami.7b03919
- [5] Bessire B.K., Lahankar S., Minton T.K. Pyrolysis of Phenolic Impregnated Carbon Ablator (PICA). *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, vol. 7 (3). DOI: 10.1021/am507816f
- [6] Johnson S.M. *Thermal Protection Materials: Development, Characterization and Evaluation*. NASA Ames Research Center. Munich, Germany September, 2012.  
URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120016878.pdf>
- [7] Минаков В.Т., Солнцев С.С. *Керамоматричные композиты*, 2006. URL: <https://www.viam.ru/public/files/2006/2006-204643.pdf>
- [8] Евдокимов С.А., Солнцев С.С., Ермакова Г.В., Давлетчин Д.И. Высокотемпературное защитное покрытие для С–С композиционных материалов. *Авиационные материалы и технологии*, 2016, № 3 (42), с. 82–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-82-87
- [9] Ярцев Д.В., Лахин А.В., Вольфович Ю.М., Манухин А.В., Богачев Е.А., Тимофеев А.Н., Сосенкин В.Е., Никольская Н.Ф. Исследование пористой структуры монослойного углерод-керамического композиционного материала состава С–SiC. *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*, 2009, № 4, с. 36–40.
- [10] Тимофеев А.Н., Богачев Е.А., Габов А.В., Абызов А.М., Смирнов Е.П., Персин М.И. *Способ получения композиционного материала*. Пат. РФ № 2130509 от 20.05.1999, приоритет от 26.01.1998.
- [11] Богачев Е.А. Свойства конструкционного окислительно-стойкого композиционного материала с карбидокремниевой матрицей из газовой фазы монометилсилана для изделий авиакосмической техники. *Материалы конференции «Высокотемпературные керамические композиционные материалы и защитные покрытия»*. Москва, ФГУП «ВИАМ». 11.12.2014.

- [12] Зуев А.В., Лощинин Ю.В., Баринов Д.Я., Мараховский П.С. Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических свойств. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № S, с. 575–595.  
DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-575-595
- [13] Просунцов П.В., Баринов Д.Я. Разработка математической модели прогрева и разрушения углерод-керамических композиционных материалов. *Тепловые процессы в технике*, 2017, т. 9, № 7, с. 311–318.
- [14] Богачев Е.А., Елаков А.Б., Белоглазов А.П., Денисов Ю.А., Тимофеев А.Н. Способ изготовления пористого каркаса-основы композиционного материала. Пат. РФ № 2620810 от 29.05.2017.
- [15] Богачев Е.А. Высокотемпературные конструкционные материалы с минимальной структурной ячейкой. *Композиты и наноструктуры*, 2017, т. 9, № 1, с. 12–23.
- [16] ГОСТ 29127–91. Пластмассы. Термогравиметрический анализ полимеров. Метод сканирования по температуре. Москва, ИПК «Издательство стандартов», 2004.
- [17] Антюфеева Н.В., Алексахин 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
- [18] Мухаметов Р.Р., Петрова А.П., Пономаренко С.А., Ахмадиева К.Р., Павлюк Б.Ф. Влияние тканых волокнистых наполнителей различных типов на свойства отвержденного связующего ВС-2526К. *Труды ВИАМ*, 2018, № 3 (63), с. 28–36. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-28-36
- [19] Елисеев О.А., Наумов И.С., Смирнов Д.Н., Брык Я.А. Резины, герметики и огнетеплозащитные материалы. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № S, с. 437–451. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-437-451

Статья поступила в редакцию 26.06.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Просунцов П.В., Баринов Д.Я., Богачев Е.А. Исследование термоокислительной деструкции материала на основе углеродных волокон. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-7-1899>

**Просунцов Павел Викторович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: анализ и идентификация процессов комбинированного теплопереноса в высокопористых материалах. e-mail: [pavel.prosuntsov@mail.ru](mailto:pavel.prosuntsov@mail.ru)

**Баринов Дмитрий Яковлевич** — аспирант кафедры «Ракетно-космические композитные конструкции» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — математическое моделирование тепло- и массопереноса в теплозащитных материалах. e-mail: [dybarinov@gmail.com](mailto:dybarinov@gmail.com)

**Богачев Евгений Акимович** — канд. техн. наук, начальник отделения ОАО «Композит». Область научных интересов: материаловедение и композиционные материалы. e-mail: [eug-bogatchev@mail.ru](mailto:eug-bogatchev@mail.ru)

## Investigation of thermal oxidative degradation of carbon fiber-based material

© P.V. Prosuntsov<sup>1</sup>, D.Ya. Barinov<sup>1</sup>, E.A. Bogachev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia,

<sup>2</sup> JSC "Kompozit", Korolyov, 141070, Russia

*To develop and carry out calculations of heat transfer in heat-shielding materials, it is necessary to study the mechanisms of material destruction. For a composite material, it is important to study the behavior of both the material as a whole and each of its components. The work is devoted to the study of thermal oxidative degradation of highly porous material based on chopped carbon fibers, which is the preform for making advanced carbon-ceramic composite materials. The study was conducted in an oxidizing air environment using simultaneous thermal analysis with varying the initial mass of the samples and at different heating rates (5, 10, 20 K/min). The dependences of thermal effects in the material and mass loss during destruction for each sample were obtained. The influence of variable parameters on the temperature of the beginning of material destruction and the steady removal speed was established. It is shown that the destruction of the material occurs in the surface layer of a certain thickness. According to the results of thermogravimetric studies with different heating rates, a generalized kinetic model of destruction was developed and the kinetic characteristics of destruction were determined.*

**Keywords:** destruction, ablation, oxidation, rate of destruction, temperature of destruction, thermogravimetric analysis, kinetic model

### REFERENCES

- [1] Matthews F.L., Rawlings R.D. *Composite Materials: Engineering and Science*. Woodhead Publ., 1999, 470 p. [In Russ.: Matthews F.L., Rawlings R.D. *Kompozitnyye materialy*. Mekhanika i tekhnologiya. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2004, 408 p.].
- [2] Nikitin P.V. *Teplovaya zashchita* [Thermal protection]. Moscow, MAI Publ., 2006, 512 p.
- [3] Polezhaev Yu.V., Yurevich F.B. *Teplovaya zashchita* [Thermal protection]. Moscow, Energia Publ., 1976, 392 p.
- [4] Bessire B.K., Minton T.K. (2017). Decomposition of Phenolic Impregnated Carbon Ablator (PICA) as a Function of Temperature and Heating Rate. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 9 (25) May 2017. DOI: 10.1021/acsami.7b03919
- [5] Bessire B.K., Lahankar S., Minton T.K. (2014). Pyrolysis of Phenolic Impregnated Carbon Ablator (PICA). *ACS Applied Materials & Interfaces*. 7(3) December 2014. DOI: 10.1021/am507816f
- [6] Johnson S.M. *Thermal Protection Materials: Development, Characterization and Evaluation*. NASA Ames Research Center. Munich, Germany September, 2012. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120016878.pdf>
- [7] Minakov V.T., Solntsev S.S. *Keramomatrchnye kompozity* [Ceramic matrix materials], 2006. Available at: <https://www.viam.ru/public/files/2006/2006-204643.pdf>

- [8] Evdokimov S.A., Solntsev S.St., Ermakova G.V., Davletchin D.I. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2016, no. 3 (42), pp. 82–87. Available at: [http://journal.viam.ru/download/12934c64a40f8e5deccc77a6295aec35/2016\\_3\\_11.pdf](http://journal.viam.ru/download/12934c64a40f8e5deccc77a6295aec35/2016_3_11.pdf)
- [9] Yartsev D.V., Lakhin A.V., Volfkovich Yu.M., Manukhin A.V., Bogachev E.A., Timofeev A.N., Sosenkin V.E., Nikolskaya N.F. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnye pokrytiya — Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2009, no. 4, pp. 36–40.
- [10] [10] Timofeev A.N., Bogachev E.A., Gabov A.V., Abyzov A.M., Smirnov E.P., Persin M.I. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo materiala* [The method of obtaining a composite material]. Patent RF no. 2130509, May 20, 1999, priority January 26, 1998.
- [11] Bogachev E.A. Svoystva konstruktsionnogo okislitelno-stoykogo kompozitsionnogo materiala s karbidokremnievoy matritsey iz gazovoy fazy monometilsilana dlya izdelii aviakosmicheskoy tekhniki [Properties of structural oxidative-resistant composite material with a carbide silicon matrix from the gas phase of monomethylsilane for aerospace products]. *Materialy konferentsii «Vysokotemperaturnye keramicheskie kompozitsionnye materialy i zashchitnye pokrytiya»* [Materials of the conference “High-temperature ceramic composite materials and protective coatings”]. Moscow, VIAM Publ., December 11, 2014.
- [12] Zuev A.V., Loshchinin Yu.V., Barinov D.Ya., Marakhovskiy P.S. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. S, pp. 575–595. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-575-595
- [13] Prosuntsov P.V., Barinov D.Ya. *Teplovye protsessy v tekhnike (Thermal processes in technology)*, 2017, vol. 9, no. 7, pp. 311–318.
- [14] Bogachev E.A., Elakov A.B., Beloglazov A.P., Denisov Yu.A., Timofeev A.N. *Sposob izgotovleniya poristogo karkasa-osnovy kompozitsionnogo materiala* [A method of manufacturing a porous framework of the composite material]. Patent RF no. 2620810, May 29, 2017.
- [15] Bogachev E.A. *Kompozity i nanostruktury — Composites and nanostructures*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 12–23.
- [16] *GOST 29127–91 Plastmassy. Termogravimetricheskiy analiz polimerov. Metod skanirovaniya po temperature* [State Standard 29127–91 Plastics. Thermogravity of polymers. Temperature scanning method]. Moscow, Izd. standartov Publ., 2004.
- [17] Antiufeeva N.V., Aleksashin V.M., Stolyankov Yu.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2015, no. 3 (36), pp. 79–83. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-79-83
- [18] Mukhametov R.R., Petrova A.P., Ponomarenko S.A., Akhmedieva K.R., Pavliuk B.F. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2018, no. 3 (63), pp. 28–36. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-3-28-36
- [19] Eliseev O.A., Naumov I.S., Smirnov D.N., Bryk Ya.A. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. S, pp. 437–451. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-437-451

**Prosuntsov P.V.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department Aerospace Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: analysis and identification of combined heat transfer processes in highly porous materials. e-mail: [pavel.prosuntsov@mail.ru](mailto:pavel.prosuntsov@mail.ru)

**Barinov D.Ya.**, post-graduate student, Department Aerospace Composite Structures, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: mathematical simulation of heat and mass transfer in heat-protective materials.

e-mail: dybarinov@gmail.com

**Bogachev E.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Head of Department, JSC "Kompozit". Research interests: materials science and composite materials.

e-mail: eug-bogatchev@mail.ru