

УДК 536.24

РАЗРУШЕНИЕ УГЛЕПЛАСТИКОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРУЕЙ ПЛАЗМЫ

А.Г. Архипов, Г.В. Кузнецов*, Т.Н. Немова**, Г.В. Притворов, В.П. Рудзинский***

ФГУП «Московский институт теплотехники», г. Москва

*Томский политехнический университет

**Томский государственный архитектурно-строительный университет

***Томский государственный университет

E-mail: ntn@ftf.tsu.ru

Приведены методика и результаты экспериментального исследования процессов тепломассопереноса в углепластике на основе фенольноформальдегидной смолы при воздействии на него высокотемпературной струи азотной плазмы. Сделаны выводы о термомеханическом режиме разрушения углепластика, сопровождаемом образованием мелкодисперсных частиц вследствие механического разрушения углеродной основы. Результаты позволяют оценить масштаб радиационного внутрипористого теплообмена в прококсованном углепластике при температурах свыше 1500 К и интенсивном механическом уносе обугленного слоя материала при температурах более 2300 К.

Развитие современной ракетной техники и ряда прикладных отраслей, связанных с решением проблемы защиты поверхностей теплонапряженных элементов конструкций от теплового воздействия высокотемпературных потоков газа, в большой степени зависит от оценки степени разрушения теплозащитного покрытия в процессе эксплуатации изделий. Это позволяет организовать тепловую защиту таким образом, чтобы оптимизировать параметры при движении спускаемых летательных аппаратов или эксплуатации теплонапряженных узлов энергоустановок [1].

Теплозащитные полимерные материалы, в которых применяются волокна с высокой механической прочностью и низкой плотностью, а в качестве связующих используются эпоксидные, фенольные и другие смолы, имеют удельные свойства выше аналогичных для металлических сплавов. Это значительно расширяет область их применения как в ракетной технике, так и в областях народного хозяйства [2].

Одними из наиболее перспективных композиционных материалов являются материалы на основе углеродных (графитовых) волокон, обладающих высокими механическими свойствами [3]. Несмотря на то, что такие материалы используют давно, научный интерес к процессам тепломассопереноса, протекающим в них при различного рода внешних воздействиях, в частности, тепловых, значителен до сих пор. Основные результаты по исследованию механизма разрушения ряда типичных теплозащитных материалов, установлению физических закономерностей разрушения и влиянию на них, в частности, температуры и скорости нагрева, были получены экспериментально. Объектом исследования выступали теплозащитные композиционные материалы на основе тканевых или углеграфитовых волокон с фенолформальдегидным связующим [1, 3], поскольку такие пластики являются в настоящее время наиболее востребованными.

Сложность исследования процессов тепломассопереноса при воздействии на теплозащитные материалы высокотемпературных потоков газа заключа-

ется в том, что преимущественно используют экспериментальные методы исследования при более низких по сравнению с реальными скоростях нагрева с дальнейшей экстраполяцией полученных результатов в область высоких температур. Это может привести к необоснованным выводам, заметно искажающим физическую модель процесса разрушения теплозащитных материалов. До настоящего времени в научно-технической литературе отсутствуют данные о закономерностях поведения углепластиков в потоках плазмы с температурой более 2000 К.

Композиционные материалы на основе углеграфитового волокна и органических связующих являются сложной системой [2, 3]. Наиболее изученными в этой системе являются связующие, термическое разложение которых достаточно полно исследовано как при низких, так и высоких скоростях нагрева и уровнях тепловых нагрузок [2, 3]. Менее изученными являются волокна, в частности, углеграфитовые. Полученные на основе одного материала, например, полиакрилонитрила, они могут различаться по плотности в 1,2 раза, а по величине модуля упругости в 1,7 раз [4]. Волокна имеют сложную структуру, в которой есть ядро и высокоориентированная оболочка, а между ними – высокопористая промежуточная область, не имеющая трехмерного упорядочивания [4]. В настоящее время в литературе практически отсутствует информация об изменении свойств углеграфитовых волокон в составе теплозащитных покрытий.

Таким образом, для создания физической и математической моделей процессов тепломассопереноса при воздействии высокотемпературных струй газа на композиционные теплозащитные материалы и прогнозирования поведения аналогичных материалов в заданных условиях эксплуатации необходимо проводить экспериментальные исследования в условиях, соответствующих реальным условиям работы.

В настоящей работе приведены методика и результаты экспериментального исследования процессов тепломассопереноса в углепластике – теплозащитном материале на основе фенольнофор-

мальдегидного связующего и ориентированных углеродных нитей – при температуре набегающего газового потока свыше 3000 К.

Исследования проведены на экспериментальном стенде [5], позволяющем воспроизводить физические параметры, соответствующие локальному участку поверхности теплозащитного материала в реальных условиях его работы. Высокотемпературная струя азотной плазмы генерировалась с помощью электродугового плазмотрона. Параметры теплового и газодинамического воздействия газового потока: $Re=5\cdot 10^2 \dots 10^4$; энтальпия $H=(2\dots 15)\cdot 10^3$ кДж/кг; плотность теплового потока $10^4 \leq q \leq 10^7$ Вт/м² [5]. Зависимость температуры на оси струи от расстояния до среза сопла определена экспериментально с помощью термпарных измерений (в области температур до 2000 К) и оптическими методами (при температурах выше 2000 К) [6]. На основании этого выбрано рабочее сечение струи, в котором устанавливался образец углепластика. Сечение соответствовало уровню температур набегающего потока газа в реальных условиях эксплуатации (3400 К). Время воздействия струи на исследуемый образец не превышало 140 с.

Образцы теплозащитного композиционного материала представляли собой набор дисков разного диаметра, изготовленных из пластин углепластика методом штамповки. Поверхность не подвергалась механической обработке. Между дисками по оси симметрии закреплялись вольфрам-рениевые (вблизи поверхности образца) и хромель-алюмелевые термпары для непрерывной регистрации температуры в течение эксперимента. Расстояния от спая термпар до поверхности воздействия варьировались в диапазоне $(2\dots 10)\cdot 10^{-3}$ м. Для предотвращения шунтирования термпары изолировались от образца с помощью специальных электроизолирующих покрытий. Концы термпар выводились к регистрирующей аппаратуре через специальные каналы в державке или с помощью керамических изоляционных капилляров.

ТермоЭДС термпар в автоматическом режиме вводились в память ПЭВМ и обрабатывались специальной программой с учетом данных по калибровке. Результаты выводились на печать в виде таблиц и графиков зависимости температуры от времени отдельно для каждой из термпар, что позволило определить температурное поле углепластика в процессе воздействия на него высокотемпературной струи азотной плазмы.

Образцы помещались в специальный держатель, выполненный из асбоцемента. Форма держателя обеспечивала выполнение следующего условия: величина диаметра внешнего диска образца превышает соответствующее значение внутреннего диска. Вследствие этого исключалось влияние краевых эффектов при воздействии на образец струи азотной плазмы. Размеры образца и держателя обеспечивали плотное расположение образца углепластика в держателе. Боковая поверхность образца для дополнительного уплотнения обрабатыва-

лась клеящим составом, идентичным составу связующего.

Держатель с образцом углепластика устанавливался на стенде таким образом, чтобы оси симметрии образца и сопла плазмотрона совпадали. Чтобы исключить возможное влияние неустойчивости параметров струи в момент зажигания на процессы тепломассопереноса и точного определения момента начала теплового воздействия на материал непосредственно перед экспериментом в пространство между образцом и соплом плазмотрона помещалась металлическая «шторка».

В течение эксперимента в разные моменты времени методом яркостной пирометрии с помощью оптических пирометров ЭОП-66 и «Проминь» была проведена оценка величины температуры поверхности углепластика. По полученным данным температура поверхности теплозащитного материала не превышала 2300...2400 К.

Для измерения температуры поверхности материала в ходе эксперимента применен метод цветовой пирометрии с использованием двулучевого цветового пирометра [6]. Это позволило исключить влияние изменяющейся яркости при протекании процессов нагрева и разрушения поверхностного слоя углепластика на определяемую оптическими методами величину температуры поверхности.

Температура поверхности углепластика измерялась в центре образца в точке, положение которой фиксировалось с помощью лазерного луча. При воздействии струи плазмы на углепластик свет от этой точки проходил через специальную оптическую систему, делящую его на два луча. Последние, пройдя через синий и красный светофильтры и попадая на фотодиоды, регистрировались АЦП с дальнейшей обработкой результатов специальными программами. Температура поверхности определялась по зависимости отношения интенсивностей сигналов синего и красного луча от температуры. Калибровка прибора проведена с помощью миниатюрной галогенной лампы, помещенной в выбранную точку на поверхности образца углепластика. На лампу ступенчато подавалось известное напряжение, а температура нити накала регистрировалась оптическими пирометрами.

На рис. 1 приведена типичная зависимость изменения температуры поверхности углепластика от времени. На рис. 2 показаны типичные зависимости температуры углепластика от времени на расстояниях $5\cdot 10^{-3}$ и 10^{-2} м от поверхности воздействия соответственно. Сплошными линиями показаны кривые, аппроксимирующие экспериментальные данные.

Был проведен визуальный анализ состояния поверхности образца углепластика в процессе воздействия на него высокотемпературной струи азотной плазмы. С момента начала теплового воздействия наблюдался равномерный нагрев материала. Затем на поверхности углепластика начинали от-

четливо проявляться в виде «сетки» нагретые углеграфитовые нити основы углепластика. По-видимому, это происходит вследствие выгорания связующего (фенольноформальдегидной смолы) в приповерхностных слоях материала и сопровождается эндотермическим эффектом [7].

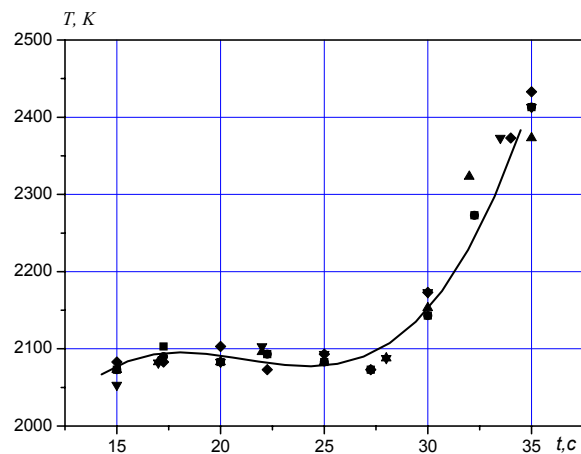


Рис. 1. Зависимость изменения температуры поверхности углепластика от времени

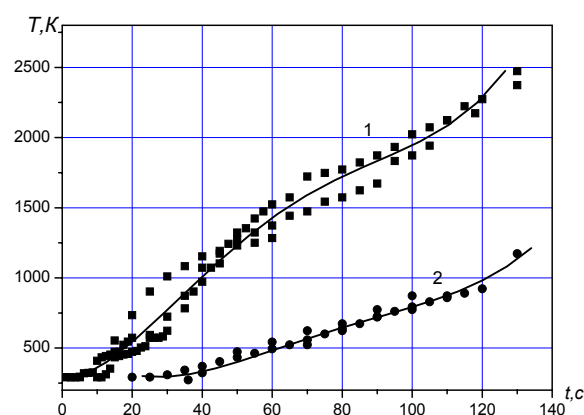


Рис. 2. Типичные зависимости температуры углепластика от времени

Повышение температуры поверхности углепластика и существенное отличие температур основы и связующего отмечалось как оптическими методами, так и результатами анализа фотографий поверхности образца, сделанных в разные моменты времени.

Одновременно в экспериментах наблюдалось разрушение углепластика и появление раскаленных мелкодисперсных частиц, отлетающих от поверхности. Так как температура поверхности углепластика в течение эксперимента не превышала 2400 К, а яркость частиц и поверхности одинакова, то можно предположить, что эти частицы образуются в результате механического разрушения нитей основы после выгорания связующего.

Визуальный анализ внешнего вида образца после эксперимента показал, что в приповерхностной области воздействия высокотемпературной струи плазмы на углепластик происходит механи-

ческое разрушение основы на глубину 2–3 слоев (рис. 3). На фотографии отчетливо видны блестящие углеродные нити основы, структура которых отличается от исходной. Нити увеличиваются в размерах и становятся механически хрупкими, что, по-видимому, обусловлено протеканием при высоких температурах физико-химических процессов взаимодействия углеродной основы с продуктами термического разложения связующего.

Более глубокие слои углепластика механически не повреждены. Внутри материала при разделении его слоев наблюдалось присутствие сажистых отложений. Температура углепластика на расстоянии 10^{-2} м от поверхности воздействия была существенно ниже соответствующих значений в приповерхностной области материала (рис. 1), поэтому здесь не наблюдалось и механических разрушений. Присутствие сажистых отложений обусловлено термическим разложением связующего и фильтрацией продуктов разложения через каркас основы углепластика.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет предположить, что разрушение исследуемого углепластика происходит в термомеханическом режиме. При полном завершении процесса термического разложения связующего (фенольноформальдегидной смолы) в приповерхностной области углепластика образуется графитоподобная структура. В этой структуре реализуется процесс интенсивного внутрипорового радиационного теплообмена, с одной стороны, и возникают термические напряжения сжатия, обусловленные большими градиентами температуры в тонком приповерхностном слое углепластика, с другой стороны. В результате нагрева до высоких температур возможно возникновение напряжений сжатия в приповерхностном слое углепластика, которое может привести к возникновению трещин на нагреваемой поверхности. Сетка трещин, в свою очередь, приводит к образованию фрагментов поверхности малых размеров, плохо сцепленных с основным материалом прококсованного слоя углепластика. При воздействии на эти фрагменты высокотемпературной струи азотной плазмы происходит их отрыв и унос.

Образование на нагреваемой поверхности дефектов даже малых размеров (50...100 мкм) будет приводить как к интенсификации теплообмена с внешней средой, так и к росту напряжений трения внешнего потока из-за наличия крупномасштабной шероховатости поверхности углепластика.

На основании полученных экспериментальных данных — значений температур углепластика в трёх точках, расположенных на различных расстояниях от поверхности нагрева, и температуры поверхности образца — путем решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности была определена зависимость коэффициента теплопроводности углепластика (?) от температуры.

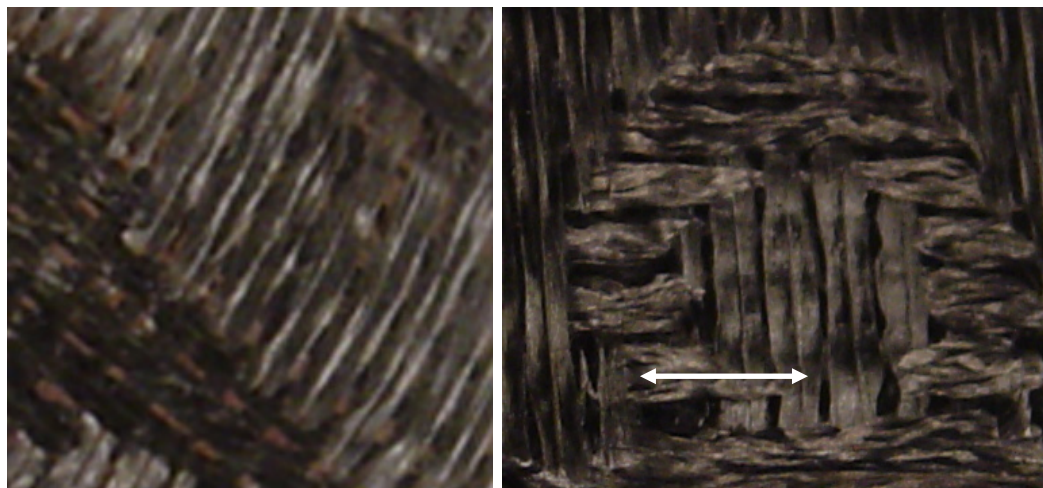


Рис. 3. Внешний вид поверхности углепластика до и после теплового воздействия. Масштаб соответствует 1 см

Решение коэффициентной обратной задачи теплопроводности проводилось в одномерной постановке, при этом коэффициент теплопроводности был представлен в виде полинома третьей степени с неизвестными постоянными. Оптимальный выбор постоянных полинома сводился к минимизации функционала, определяющего отклонение расчетного температурного поля от экспериментального. Тестирование алгоритма и программы расчета проводились для варианта, когда в качестве исходных данных для решения обратной задачи принимались решения прямой задачи. Нулевые приближения выбирались соответствующими этому решению.

Получено аппроксимационное выражение для коэффициента теплопроводности углепластика

$$\lambda = 0,86 - 4,9 \cdot 10^{-4} (T - T_0) + 2,09 \cdot 10^{-10} (T - T_0)^3,$$

где T_0 – начальная температура. Это аппроксимационное выражение соответствует температурному диапазону от 300 до 1500 K.

Анализ зависимости показал, что она с достаточно высокой надежностью аппроксимируется выражением, в котором учитывается радиационный внутрипористый теплоперенос при высоких (более 2000 K) температурах. Аппроксимационная

зависимость описывает изменение коэффициента теплопроводности с увеличением температуры для трех характерных диапазонов изменения температур материала (1 – инертный нагрев, 2 – нагрев с термическим разложением связующего, 3 – область смешанного – кондуктивно-радиационного теплопереноса – в прококсированном материале).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о значимости радиационного внутрипористого теплообмена в прококсированном углепластике при температурах свыше 1500 K и интенсивном механическом уносе обугленного слоя материала при температурах более 2300 K.

Таким образом, на основании разработанной методики экспериментального исследования процессов тепломассопереноса в углепластике при воздействии на него высокотемпературной струи азотной плазмы получены данные по распределению температуры в материале. Разработана физическая модель высокотемпературного разрушения углепластика. Из решения обратной задачи теплопроводности на основании экспериментальных данных получено аппроксимационное выражение для коэффициента теплопроводности углепластика в диапазоне температур 300...1500 K.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Теплообмен и разрушение тел в сверхзвуковом гетерогенном потоке. – М.: Янус-К, 2007. – 391 с.
2. Термостойкость пластиков конструкционного назначения / Под ред. Е.Б. Тростянской. – М.: Химия, 1980. – 240 с.
3. Справочник по композиционным материалам. Кн. 1 / Под ред. Дж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – 448 с.
4. Куроленткин Е.И., Чугунова Т.К. Исследование структуры углеродных волокон // В сб.: Углеродные материалы. Тематический сборник научных трудов. – М.: Металлургия, 1989. – С. 106–110.
5. Абалтусов В.Е., Немова Т.Н. Исследование взаимодействия высокотемпературных одно- и двухфазных потоков с элементами активной тепловой защиты // Теплофизика высоких температур. – 1992. – Т. 30. – № 4. – С. 798–803.
6. Немова Т.Н., Колесникова Е.А., Саморокова Н.М., Колесников А.А. Опыт измерения температуры поверхности тела двухлучевым цветовым пирометром // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Матер. V Всеросс. научной конф. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2006. – С. 142–144.
7. Абалтусов В.Е., Алексеенко Н.Н., Немова Т.Н. Методика экспериментального исследования процессов тепломассообмена композиционных материалов при воздействии высокотемпературных газовых потоков // Теплофизика и аэромеханика. – 1998. – Т. 5. – № 2. – С. 175–181.

Поступила 25.09.2007 г.