Д. т. н. **С. А. Колесников** (✉), **Л. В. Ким**, **В. Р. Дудин**

АО «НИИграфит», Москва, Россия

УДК 666.762.81:620.22-419.8]:621.3.035.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. Сообщение 1. Формирование теплофизических характеристик углеродного композиционного материала

Приведен анализ механизма теплопередачи в объеме углерод-углеродных композиционных материалов. Опытным путем установлено, что однородное тепловое состояние формируется на глубине до 20 структурных ячеек композита. Выявлена характерная слоистая структура пористости материала в форме пор – трещин, показана величина снижения теплопроводности образцов при их разделении на части. Установлено, что процесс охлаждения горячего стержня армирования в углеродном веществе композита определяется в меньшей степени эффективной теплопроводностью в трансверсальном направлении параллельного пучка волокон в одномерно-армированном стержне, а в большей степени — контактными тепловыми сопротивлениями по границам пор – трещин при теплопроводности воздуха в трещине около 0,3 Вт/(м·К).

Ключевые слова: *углерод-углеродный композиционный материал (УУКМ), стержень армирования, филаменты армирования, углеродная среда (матрица КМ), поры в матрице, поры расслоения.*

ВВЕДЕНИЕ

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) содержат углеродные компоненты разной кристаллической структуры, различающиеся надмолекулярной структурой и схемой армирования. Их сочетание создает широкий спектр технических возможностей при изготовлении высокотемпературных огнеупорных конструкций [1, 2]. Армирующие углеродные волокна, пронизывающие весь объем деталей, являются основным фактором формирования упругих и термических свойств материала. В публикации [1] приведены результаты исследования теплофизических характеристик ряда углеродных волокон на основе различных синтетических прекурсоров. Показано, что теплопроводность волокон из полиакрилонитрила в противоположность конструкционному графиту возрастает с повышением температуры до 2000 К. Дисперсная углеродная матрица, напротив, отличается снижением в несколько раз теплопроводности в широком интервале температур. При этом температуропроводность снижается в еще большей степени за счет роста удельной теплоемкости углеродных материалов при высоких температурах [2]. В публикации [2] приведен справочный материал на этап разработки УУКМ на основе пиролитических матриц из неграфитирующихся коксов фенолоформальдегидных смол и пиролитического углерода. В настоящее время наиболее ответственные высокотемпературные узлы, как правило, изготавливают с применением углеродных графитирующихся матриц на основе кокса каменноугольных пеков.

✉
С. А. Колесников
E-mail: Skolesnikov02@mail.ru

В статье [3] теплопроводность углеродного композита увязывают в единую модель с учетом свойств углеродного волокна, углеродной матрицы, пористости и теплофизических свойств интерфазного слоя и газовой среды. Разработанная модель дает возможность оценить изменение теплофизических свойств УУКМ в вакууме или воздушной среде. Для таких материалов авторами настоящей статьи ранее [4, 5] была предложена структурная модель формирования уровней теплопроводности УУКМ с учетом свойств углеродных веществ армирующего наполнителя, углеродной матрицы и схемы армирования. В результате на основе расчетной модели показано, что в УУКМ, армированных высокомодульными углеродными волокнами, обладающими высокой теплопроводностью, температура рабочей поверхности огнеупорной конструкции может быть неоднородной. Размер неоднородности и

время ее существования определяются температурной проводимостью фрагментов структурной ячейки и длительностью экспозиции. Неоднородность температурного поля по поверхности может приводить к развитию характерной микрогеометрии поверхности и влиянию на механизм взаимодействия рабочей поверхности детали с газовой средой.

Пример подобного технологического решения описан в публикации [6], в которой показана перспективность теплофизического конструирования высокотемпературных узлов из УУКМ за счет изменения объемного содержания стержней армирования в направлении воздействия внешних тепловых потоков. Вторым эффективным приемом показано применение высокотеплопроводного углеродного волокна из каменноугольного пека в направлении воздействия теплового потока [6]. В остальных направлениях армирования используется углеродное волокно из полиакрилонитрила с относительно меньшими теплопроводностью и температуропроводностью. Более высокомодульные углеродные волокна из каменноугольного пека имеют еще меньшие значения ТКЛР до 1000 К. Еще одним примером теплофизического конструирования огнеупорных конструкций является механическое интегральное совмещение в конструкции одномерно- и многомерно-армированных элементов из углеродных композитов [7]. Все эти примеры базируются на реализации дискретно-гетерогенного механизма прогрева поверхности многомерно-армированного УУКМ при ее высокоскоростном нагреве.

УУКМ на основе углеродных коксовых матриц из каменноугольного пека характеризуются высокой жаростойкостью, что предопределяет их выбор в лазерной технике в качестве современных защитных материалов [8]. Стендовые испытания подтвердили ожидаемые уровни жаростойкости и огнеупорности. Максимальная плотность мощности энергетического потока на всех образцах поддерживалась постоянной и составляла около 22 кВт/см^2. Температуру светящейся точки на образцах измеряли пирометром, а температуру холодных частей образцов фиксировали термопарой. Максимальная температура на рабочей поверхности образцов составляла до 2200 К, длительность воздействия — несколько сотен секунд. После испытаний поверхности образцов сохранились целыми. Выявленная особенность углеродных материалов значительно влияет на долговечность деталей в высокотемпературной среде; в еще более высокотемпературной области температуропроводность в несколько раз снижается. В результате скорость прогрева в области высоких температур (2000–2300 К) ниже, чем в области относительно невысоких (до 1300 К).

Локализация участков относительного перегрева рабочих поверхностей в гетерогенном УУКМ с существенным различием теплофизических свойств компонентов привлекает все большее внимание при прогнозировании работоспособности углеродных деталей. Выступающие шероховатости и дефекты поверхности (некоторые размерами несколько миллиметров) в скоростном потоке могут приводить к местному перегреву их кромок до 2800 К при средней температуре поверхности детали 1800–2000 К [9]. Геометрия, структура и состав рабочей поверхности изделия становятся важными факторами сохранения его работоспособности. Долговечность рабочей поверхности огнеупорного изделия определяется уровнем температуры и изменением механизма ее деградации (например, для углеродных поверхностей окисление ⇄ термодеструкция ⇄ сублимация).

В последнее время в связи с расширением областей применения УУКМ в высокотемпературной технике появляется все больше работ с усиленным вниманием к влиянию структурных особенностей УУКМ на их теплофизические свойства. Так, такие макрохарактеристики, как термопрочность, окислительная стойкость рабочих поверхностей исследуются на фоне управления гетерогенной структуры УУКМ [10]. При этом показано, что вариация стойкости углеродных поверхностей может зависеть на один – два порядка величины при вариации строения материала при практически неизменной его химической структуре. В ряде последних работ [11] исследуют свойства стержней армирования с углеродной матрицей из пеков, которые в отличие от ранних работ [1, 2] рассматривают в качестве первичных структурных элементов многомерно-армированных УУКМ.

Современное моделирование уровня теплофизических характеристик объемно-армированных УУКМ основывается на дискретной природе формирования теплового состояния рабочих поверхностей углеродных материалов, что, соответственно, определяет долговечность этой «зернистой» поверхности. Так, авторы статьи [12] моделировали теплопередачу в ортогональной трехмерной структуре из стержней, состоящих из углеродных волокон. Модель теплопередачи состояла из учета следующих одновременно происходящих процессов: теплопередачи по стержню армирования, переизлучения в поровом объеме и кондуктивной теплопередачи в объеме матрицы в зонах контакта стержней между собой. Расчет в соответствии с моделью показал, что при скоростном нагреве внутреннее переизлучение на расстоянии от горячей поверхности в 5 слоев армирования может обеспечить прогрев от температуры 2273 К только до 872 К. Благодаря высокой температуропроводности вдоль волокна выступающие торцы стерж-

ней нагреваются до 2273 К, а трансверсальные стержни в первом ряду от горячей стенки имеют температуру не выше 1923 К. Причем глубина распространения теплового градиента от поверхности (2273 К) до 1223 К составляет не более шести диаметров стержней армирования.

Цель настоящей работы — исследование масштабного эффекта в формировании теплофизических свойств УУКМ различных видов армирования, анализ закономерности прогрева материала детали, численное моделирование теплового поля в объеме УУКМ на основе решения нестационарной задачи теплопроводности.

МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальной базой настоящего исследования служила совокупность армированных УУКМ [13]. Основными фрагментами технологии изготовления высокоплотных УУКМ являются до пяти последовательных процессов изостатической карбонизации, получившей в иностранной литературе обозначение «high pressure– high temperature» [14]. Базовый статистический объем контроля теплофизических характеристик получен на заготовках, представляющих собой толстостенные кольца [15]. Структура армирования и вид углеродной матрицы испытанного материала описаны в патенте [16].

Методика определения плотности, удельной теплоемкости, температуропроводности, а также теплопроводности графитов и УУКМ в интервале 1200–3000 К описана в статье [5]. Температуру углеродных поверхностей определяли с помощью бесконтактных пирометров оптического (800–3000 °С) типа «Проминь» с погрешностью до 3 % и инфракрасного (700–2200 °С) типа С-500.7 с погрешностью 1,0 %.

Определение теплопроводности при (300+10) К

Схема измерения теплопроводности показана на рис. 1. Сущность метода заключается в измерении величины теплового потока, пропускаемого через испытуемый образец *1*, и возникающего при этом перепада температур между рабочими поверхностями *2* образца *1*. Установка для определения теплопроводности состоит из термостатируемой камеры *3*, в которой находится медный термостатируемый теплоприемник *4* и охлаждаемый водой цилиндрический корпус *5*. На блоке нагрева *6* с помощью дифференциального термоэлектрического термометра *7* устанавливают температуру регулирования от 20 до 30 °С. Разность потенциалов на концах дифференциального термоэлектрического термометра измеряют микровольтметром (класс точности 0,005). Предельная относительная погрешность измерения теплопроводности не более 10 % при доверительной вероятности P = 0,95 с учетом предельной относительной погрешности теплопроводности.

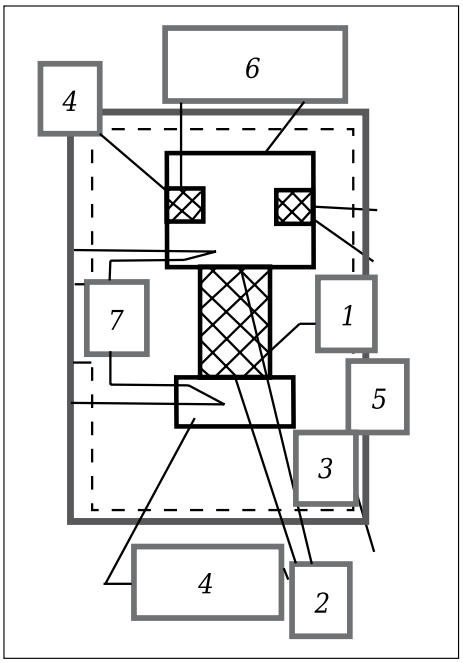

Рис. 1. Схема измерения теплопроводности

Исследование структуры УУКМ методом рентгеновской томографии

Микроструктуру УУКМ исследовали на основе изображений, реконструированных методом объемной рентгеновской томографии образцов на micro-CT SkyScan 1172 фирмы Bruker с разрешением 3,84 мкм/пиксель цифрового изображения. В основе метода лежит восстановление пространственного распределения величины линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения в плоском слое объекта исследования на основе компьютерной математической обработки теневых проекций, получаемых при просвечивании образца рентгеновским лучом в различном направлении вдоль исследуемого слоя [17]. Исследовали фрагменты размерами, достаточными для помещения в область рабочего столика томографа (100 мм), внутри которых отсутствовало механическое разрушение.

Исследование скорости деградации поверхности УУКМ в высокоэнергетическом потоке

Образцы материала были подвержены воздействию лазерного излучения. Параметры энергетического воздействия: длина волны λ 1,06 мкм; максимальный диаметр пятна контакта около 28 мм; при диаметре пятна на образце до 10 мм мощность при пуске достигала последовательно на каждом пуске 1270–6370 Вт/см^2, при диаметре пятна на образце до 5 мм — на каждом пуске 5090–24480 Вт/см^2; длительность воздействия лазерного потока во всех опытах 45 с. После экспозиции измеряли глубину каверны в материале в зоне пятна контакта с лучом лазера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Схема испытания при лазерном воздействии и поверхность некоторых образцов после испытаний показаны на рис. 2. Общий вид воздействия светового пучка показан на рис. 2, *а*. В момент пуска на 1–3 с в результате деградации углеродной матрицы формировалось пыльное облако углеродной взвеси. После испытаний в окружности пятна наблюдалось отсутствие углеродной матрицы из перекрестий стержней армирования (см. рис. 2, *б*). Такой характер деструкции композитного материала при высокоэнергетическом потоке был прогнозирован ранее [8]. На рис. 2, *в* показана яркостная структура поверхности исследованного армированного композиционного материала в процессе нагрева примерно до 10 с при мощности энергетического потока 6370 Вт/см^2. Гетерогенная поверхность УУКМ не имеет одинакового уровня прогрева. К этому моменту относительно в наибольшей степени прогрелись стержни армирования, расположенные параллельно наружной поверхности.

При испытании начиная от мощности энергетического потока около 5000 Вт/см^2 на поверхности образца оставался заметный темный четкий след окисления воздухом. Начиная от мощности 15290 Вт/см^2 в образце появлялась воронка диаметром менее диаметра пятна свечения и глубиной от 0,0012 м при меньшем уровне мощности потока и до 0,0035 м при максимальной мощности примерно до 25000 Вт/см^2. По краю воронки формировался валик из конденсированного углерода. Очевидно, температура поверхности при этом достигала температуры сублимации углеродного материала.

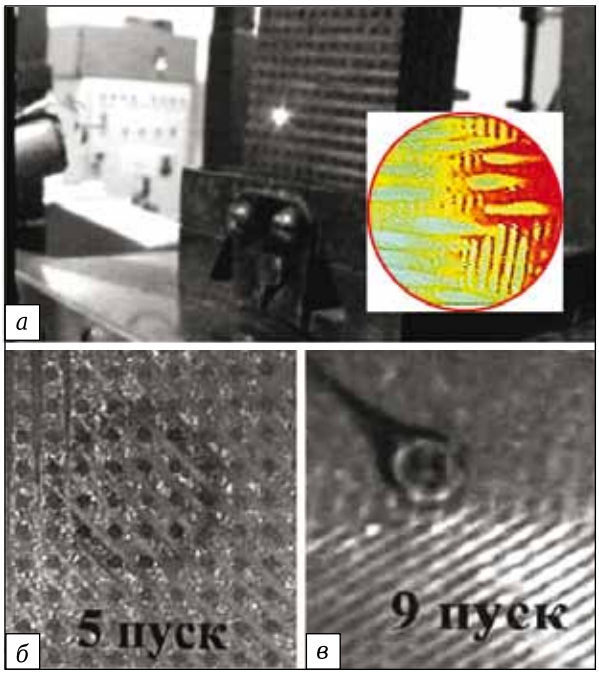

Рис. 2. Схема испытания (*а*), поверхность образца УУКМ после 15-с воздействия энергетического потока мощностью ~ 6370 Вт/см^2 (*б*) и на 10-й секунде в энергетическом потоке мощностью ~ 20380 Вт/см^2 (*в*)

Как видно, определяющим на поверхности материала является поток тепла по дискретным проводникам — стержням армирования. Часть стержней (краевые стержни армирования) высвечиваются на поверхности с достигнутой температурой на сотни градусов выше, чем на ближайших участках. Относительно активными акцепторами энергии в первую очередь служат фрагменты, выступающие из объема композита. Тепло по длине стержня (в направлении армирования) передается намного быстрее, чем в трансверсальных направлениях, и не усредняется с внешней поверхностью в ближайшем ареале даже до 10–15 с.

При охлаждении эти фрагменты структуры — ранее первичные акцепторы энергии (краевые стержни на поверхности) — первыми теряли высокую температуру (на рис. 2 не показано). Причинами этого, вероятно, являются их относительно малая масса и, соответственно, низкое теплосодержание. При скоростной съемке было также отмечено, что белая зона (относительно более нагретая) медленнее распространяется на относительно менее нагретую желтую зону, чем желтая зона на красную, еще менее нагретую. Вероятно, средняя температура объема материала в разных его зонах повышается не только за счет перемещения теплового фронта от лобовой поверхности, но и за счет передачи тепла по стержням армирования *X*, *Y* и *R*. Размер стержней и других фрагментов поверхности (~0,0012 м) абсолютно мал для идентификации различий их температуры при измерении известными промышленными оптическими приборами.

На рис. 3 показана структура материала, полученная методом рентгеновской томографии. Экспериментально установленная общая пористость образца около 5 %. Рентгенотомографический метод исследования внутренней структуры материала позволяет наблюдать ее строение без разрушения поверхности. В данном случае поле зрения структуры рентгеновской томограммы показывает одно из сечений детали. В плоскости наблюдения расположены стержни армирования, которые можно обозначить в любом порядке как *X* и *Y*. Стержни в той же плоскости, обозначаемые как *R*, в поле сечения глубиной до 10 мкм не попали. Сечения стержней направления *Z*, расположенные перпендикулярно условной плоскости *X* – *Y* – *R*, выглядят окружностями. Каждый из них представляет собой одномерно-армированный УУКМ.

Видно, что ячейка УУКМ состоит из перекрещивающихся прямоугольных параллелепипедов, содержащих однонаправленные стержни из углеродных филаментов. Диаметр филаментов углеродного волокна менее 8 мкм, диаметр стержня

(0,0012±0,0002) м. Остальной объем прямоугольной ячейки заполнен углеродной матрицей. Наиболее крупный ее объем в форме куба находится на перекрестье ячеек. Практически по всей длине поля наблюдения до 15 мм продольные стержни на значительной длине разделены трещинами термического происхождения.

Как показано в статье [5], теплопроводность материала в основных направлениях развития теплового потока можно рассчитать по аддитивности по схеме преодоления термических сопротивлений. В структуре объема УУКМ на рис. 3 выделено несколько направлений для продвижения тепловых потоков в объем материала детали, которые могут приводить к неоднородному температурному состоянию. В продольном направлении стержня армирования расчетный уровень теплопроводности λ находят из выражения

$$\lambda_{\text{арм.ст}} = \lambda_f V_f + \lambda_{\text{матрицы}} V_{\text{матрицы}} (1 - V_{\text{пор}}), \quad (1)$$

где индекс f — относится к армирующему волокну; V — объемное содержание компонентов и пор (трещин).

Ранее [5] на отдельных образцах диаметром 10 и высотой 15 мм при 300 К получены значения λ 114,0, 124,5, 120,9, 118,3 и 117,0 при среднем значении 119,0 Вт/(м·К). В направлении, поперечном жгуту армирования, эффективная теплопроводность λ заметно снижается из-за контактных термических сопротивлений на границах пор согласно выражению

$$\lambda_{\text{эффективная}} = \frac{h_\delta + h_{\text{поры}}}{\dfrac{h_\delta}{\lambda_\perp} + \dfrac{h_{\text{поры}}}{\lambda_{\text{воздуха}}}}, \quad (2)$$

где $\lambda_\perp$ и $\lambda_{\text{воздуха}}$ — теплопроводность соответственно для стержня армирования в поперечном направлении и для воздуха в объеме поры; h_δ — толщина стержня армирования; $h_{\text{поры}}$ — толщина поры.

При толщине детали несколько десятков миллиметров можно ожидать заметного влияния толщины на эффективную теплопроводность за счет попадания нескольких рядов полос пор (трещин, см. рис. 3) на пути теплового потока от внешней горячей поверхности. Оценку процесса торможения теплового потока в объем материала провели экспериментально и численно: на первом этапе при измерении эффективной теплопроводности на образцах различной толщины, на втором этапе из образцов меньшей толщины набирали макрообразец одинаковой общей толщины. Исследовали уровни эффективной теплопроводности образцов одинаковой общей толщиной для совокупностей 20 или 10 мм. При одинаковой общей толщине образцы набирали в различных сочетаниях из шайб толщиной каждая 2, 3, 5, 10 и 20 мм. Результаты измерения зависимости эффективной теплопроводности от толщины образцов из материалов различных

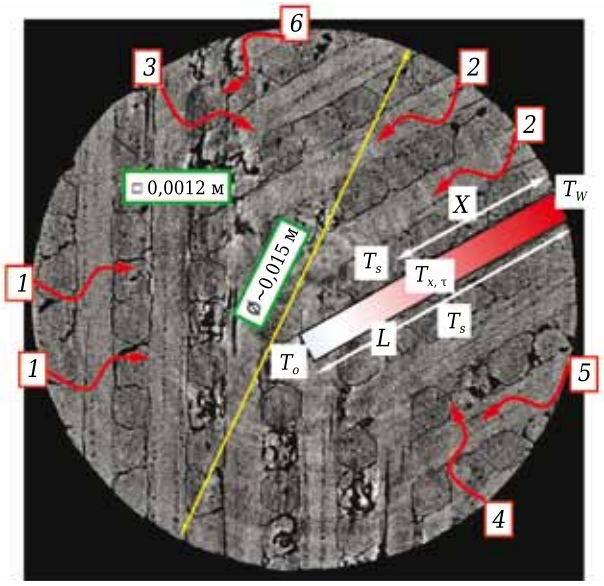

Рис. 3. Структура фрагмента объема УУКМ. Типовые направления в объеме композита с характерными направлениями: *1* — в трансверсальном направлении (90°) к стержню армирования с поперечными трещинами; *2* — в продольном направлении к стержню армирования (0°); *3* — псевдоизотропная структура (±45°); *4* — в трансверсальном направлении к стержню армирования в зоне сплошной матрицы; *5* — краевой стержень армирования, продольно-ограниченный порами, ему продольными; *6* — краевой стержень армирования в зоне сплошной матрицы; *L* — схема теплового потока в объем материала по длине стержня с рассеянием тепла в зонах с меньшей температуропроводностью (теплопроводностью)

схем армирования представлены в таблице. Для изотропного конструкционного графита (ГМЗ) при двукратном изменении размеров зависимость эффективной теплопроводности от толщины образца отсутствует; такая зависимость отсутствует также у пиролитического графита (УПВ-1) при четырехкратном изменении их толщины. Пиролитический графит является наиболее высокотекстурированным углеродным материалом. Образцы пиролитического графита испытывали в направлении, перпендикулярном плоскости его осаждения.

У образцов объемно-армированных УУКМ зависимость эффективной теплопроводности от толщины образца в интервале толщины до 10–12 мм является сильно выраженной. У образцов с минимальной толщиной, соизмеримой с размером ячейки армирования (см. рис. 2), теплопроводность составляет 110–116 Вт/(м·К), которая, как показано в публикации [8], соответствует расчетному уровню для одномерно-армированного стержня. Можно полагать, что по мере увеличения толщины образца все более часто встречающиеся поры на пути теплового потока все более его снижают, но все менее эффективно. Следует отметить также, что в относительно более разориентированных схемах армирования (4D-L и 4D) в тонких слоях композита

Результаты экспериментального определения теплопроводности λ образцов различной толщины при комнатной температуре (300–400 К)

Образец — УУКМ						
Толщина образца УУКМ, м	~0,002	~0,003	~0,005	~0,01	~0,012	~0,02
λ, Вт/(м·К), при схеме армирования для УУКМ:						
1D	–	–	122,4	121,5	–	116,3
3D	110,3	87,2	78,3	66,1	–	66,8
3D*[1]	–	101,0	75,8	74,1	–	71,6
4D-L	71	63,2	–	–	56,1	48,6
4D*[2]	87,1	64,0	54,9	51,2	–	47,1
Образец — конструкционный графитовый материал ГМЗ						
Толщина образца УУКМ, м	–	–	–	–	~0,0122	~0,020
λ, Вт/(м·К)	–	–	–	–	137,8	140,3
Образец — пиролитический графит УПВ-1 (измерение перпендикулярно слою)						
Толщина образца УУКМ, м	~0,0024	~0,0036	~0,0073	~0,008	–	–
λ, Вт/(м·К)	2,08	2,09	2,08	2,10	–	–

*[1] Материал с толщиной стержня армирования около 0,9 мм, остальные УУКМ — на основе стержней толщиной 1,2 мм.
*[2] Четырехмерная схема армирования по осям куба.

их теплопроводность не достигает наибольших величин, найденных для одномерной (1D) и трехмерной (3D) схем армирования. Полученный результат свидетельствует о преобладающей части теплового потока по объему стержня армирования. У одномерно-армированного образца (1D) в пределах погрешности метода (~10 %) не получено достоверного снижения теплопроводности с ростом толщины его образца.

Результаты измерения эффективной теплопроводности образцов одной макротолщины с разным набором образцов малой толщины показаны на рис. 4 в форме зависимости эффективного уровня теплопроводности от числа контактов на длине теплового потока. Степень снижения эффективной теплопроводности зависит от степени сжатия составляющих микрообразцов, поэтому эти данные носят качественный характер. Как видно, разделение на фрагменты по

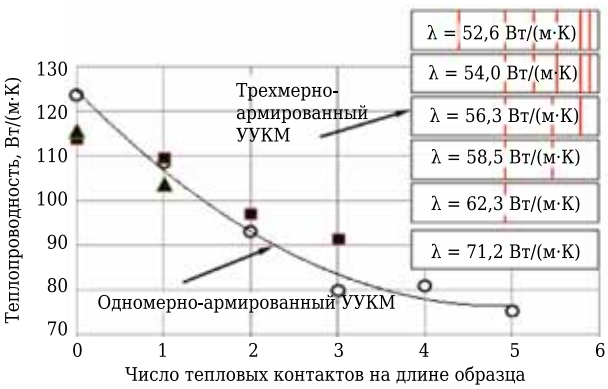

Рис. 4. Изменение эффективной теплопроводности одномерно-армированного (кривая) и трехмерно-армированного (численные значения справа) УУКМ при увеличении числа сечений при разрезе образца на части. Красные полоски справа — сечения разреза образца на пути теплового потока или, соответственно, число тепловых контактов при разрезе образца на части

толщине одномерно-армированного материала повышает термические контактные местные сопротивления и общая теплопроводность снижается почти вдвое. В трехмерно-армированном композите исходный уровень теплопроводности существенно ниже, а разделение образца по толщине на отдельные пластины последовательно снижает общую теплопроводность. Пределом снижения является теплопроводность двумерно-армированного УУКМ марки КМ-ВМ-2D в трансверсальном направлении. В этом направлении теплопроводность определяется слоем углеродной матрицы и наличием (или отсутствием) трещин расслоений. Материал КМ-ВМ-2D получают на одинаковой технологической платформе с исследованными многомерно-армированными композитами. Уровень теплопроводности материала КМ-ВМ-2D примерно при 300 К находится в пределах от 29 до 36 Вт/(м·К).

Для выделенных на схеме структуры (см. рис. 3) характерных направлений теплового потока провели численное исследование изменения температуры ($T_{x,\tau}$) по глубине материала от горячей внешней стенки. По глубине огнеупорной стенки углеродного материала расчетная температура снижается. Расчетное выражение для температуры $T_{x,\tau}$ на расстоянии X от горячей стенки с температурой T_W во времени τ имеет известный вид:

$$T_{x,\tau} = T_W - (T_W - T_\infty)\,\mathrm{erf}\left[\frac{X}{2\sqrt{\frac{\lambda}{\gamma C_P}\tau}}\right], \qquad (3)$$

где T_∞ — температура в глубине стенки, К; C_P — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); γ — плотность материала, кг/м^3.

Результаты расчетных оценок показаны на рис. 5. Можно легко получить корреляционные зависимости, которые имеют экспоненциальную

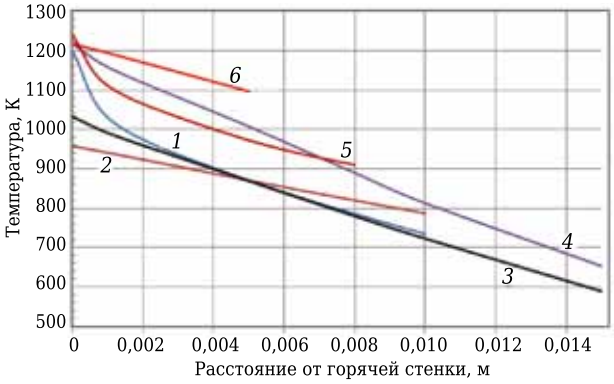

Рис. 5. Расчетное изменение температуры по толщине стенки; цифры на кривых — номера основных типовых направлений в структуре композита (см. рис. 3)

форму при высоком функциональном коэффициенте корреляции.

Тепловые потоки в объеме материала рассеиваются со скоростью, которая определяется анизотропией температуропроводности в объеме, содержащем как участки плотного углеродного вещества, так и поры и протяженные (по сравнению с толщиной стержней армирования) микрорасслоения. Как видно, расчетные уровни температуры на фрагментах поверхности могут различаться на сотни градусов. Обращает на себя внимание относительно сильное яркостное свечение стержней, расположенных параллельно внешней поверхности. Для таких стержней, как наблюдалось на рис. 1, отмечали отслоения в приповерхностном слое (позиция *6*). В целом на этапе прогрева по поверхности формируется дискретная картина температурного состояния материала. Различие связано с особенностями структуры композита и наличием структурных дефектов — пористости, отделяющей стержни армирования от большей части материала. Сопоставление рис. 1 и 5 показывает возможные причины различной яркостной и цветовой гаммы на рис. 1. Яркостное свечение углеродных материалов начинает использоваться в оптических средствах измерения начиная от 700–1000 К [18].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из эксперимента (см. таблицу) следует, что в объеме композита со схемой армирования 3D или 4D на расстоянии между 0,008 и 0,012 м от горячей поверхности устанавливается процесс прогрева с усредненным уровнем теплопроводности. Для последующего практического использования полученных результатов необходимо иметь численную модель этого процесса (рассеяния), соответствующую результатам эксперимента.

Рассеяние частных тепловых потоков в объеме материала по схемам, показанным на рис. 3, можно оценивать из правила смеси, поскольку оба компонента углеродного композита в силу единой природы имеют примерно равные плотности и одинаковые уровни теплоемкости. Интенсивность такого процесса достаточно велика, поскольку доля стержня по направлению Z составляет 0,25 объема ячейки композита (см. рис. 1).

Из соответствия количества тепла, проходящего по длине стержня, и отдачи количества тепла в окружающую среду можно оценить изменение температуры по длине стержня. Распределение температуры по длине стержня армирования может определять уровни микронапряжений в структуре композита при значимых различиях температуры по отдельным частям детали и уровни макронапряжений в деталях. Численно распределение температуры по длине стержня армирования (см. позицию L на рис. 3) может быть рассчитано с учетом одновременного рассеяния его тепла в окружающей среде материала.

Стержень толщиной δ с теплопроводностью λ_1, периметром P и площадью сечения A прогревается с опережением прогрева окружающей среды S, имеющей теплопроводность λ_s. Необходимо найти закономерность изменения температуры по длине стержня. Решение задачи приводит к дифференциальному уравнению с частными производными, поскольку температура по толщине стержня непостоянна. Однако если стержень достаточно длинный и тонкий (в нашем случае $L/d \to 10–30$, см. рис. 3) и если его λ в продольном и трансверсальном направлении достаточно велика по сравнению с λ среды, то зависимость может быть описана обыкновенным дифференциальным уравнением. Изменение температуры T в стержне по его длине ($x \to L$) в тепловом потоке по длине $\lambda_{||}$ с одновременным рассеянием в объем материала за счет кондуктивной теплопроводности $\lambda_\perp$ находится из уравнения

$$\frac{d^2T}{dX^2} = \frac{\alpha P}{\lambda_{||} A}(T_{x,\tau} - T_s), \qquad (4)$$

где P — периметр сечения стержня, $P = 4\delta$; A — площадь сечения стержня, $A = \delta^2$; T — температура среды; a_x — коэффициент теплоотдачи от стержня в объем материала, равный

$$a_x = \frac{Q_\perp}{S\Delta T} = \frac{\frac{\lambda_\perp S}{\delta}\Delta T}{S\Delta T} = \frac{\lambda_\perp}{\delta}, \qquad (5)$$

где $Q_\perp$ — тепловой поток рассеяния тепла от боковой поверхности стержня в объем композита; S — площадь сечения теплового потока; ΔT — температурный градиент.

В результате снижения λ в трансверсальном направлении в соответствии с выражением (3) в полосе расслоения структуры (см. рис. 2) местное рассеяние тепловых потоков значимо замедляется. При равных плотности и теплоемкости сравниваемых фрагментов углеродной структуры решение уравнения (5) дается в виде

$$T_{x,\tau} = T_S + \frac{(T_0 - T_S)\mathrm{Sh}\left(\sqrt{\frac{\alpha P}{\lambda_{||} A}}\right)x + (T_W - T_S)\mathrm{Sh}\left(\sqrt{\frac{\alpha P}{\lambda_{||} A}}\right)(L - x)}{\mathrm{Sh}\left(\sqrt{\frac{\alpha P}{\lambda_{||} A}}\right)L}. \quad (6)$$

Для начального этапа прогрева с наибольшими температурными градиентами, приводящими к максимальным внутренним напряжениям, в случае приближенного расчета при условии $T_0 \sim T_S$ можно применять выражение в виде

$$\frac{T_{x,\tau} - T_S}{T_W - T_S} = \frac{\mathrm{Sh}\left(\sqrt{\frac{4\lambda_{\perp}}{\lambda_{||}\delta^2}}\right)(L - x)}{\mathrm{Sh}\left(\sqrt{\frac{4\lambda_{\perp}}{\lambda_{||}\delta^2}}\right)L}. \quad (7)$$

При установившемся процессе теплопередачи в объеме с усредненным уровнем теплопроводности, очевидно, достигается состояние

$$T_{x,\tau} - T_s \to 0. \quad (8)$$

Из выражения (7) можно получить численное значение эффективного параметра $\lambda_{\perp}$, которое при известном уровне параметра $\lambda_{||}$, как показано экспериментально, на расстоянии между 0,008 и 0,012 м от горячей поверхности в объеме материала обеспечивает процесс прогрева с усредненным уровнем теплопроводности.

Для температурного диапазона 970–1300 К в структурных объектах, показанных на рис. 3, могут быть реализованы следующие частные случаи:

№ 1 — в слое в трансверсальном направлении к стержню для углеродного вещества с усредненными теплофизическими параметрами, а именно $\lambda_{\perp} \sim 38$ Вт/(м·К);

№ 2 — трансверсальные одномерно-армированные слои, расположенные перпендикулярно стержню L, без отделения трещиной, $\lambda_{\perp} \sim 23$ Вт/(м·К);

№ 3 — трансверсальный слой углеродного вещества ($\lambda_{\perp} \sim 23$ Вт/(м·К)), отделен от одномерно-армированного стержня трещиной ($\delta_{\text{поры}} \sim 0{,}0002$ м) с теплопроводностью воздуха ($\lambda_{\text{в трещине}} \sim 0{,}3$ Вт/(м·К)) и в целом с эффективной теплопроводностью согласно выражению (3) на уровне 3,9 Вт/(м·К);

№ 4 — одномерно-армированный слой ($\lambda \sim 116$ Вт/(м·К)) полностью отделен трещиной ($\lambda_{\text{в трещине}} \sim 0{,}3$ Вт/(м·К)) от остального материала без контакта с углеродным веществом матрицы.

Условие (8) выполняется (с точностью до 5 %) при расстоянии X от горячего края детали: для варианта № 1 $X \sim 0{,}002$ м (2 структурные ячейки композита, см. рис. 3), для варианта № 2 $X \sim 0{,}005$ м (4 структурные ячейки композита, см. рис. 3), для варианта № 3 $X \sim 0{,}012$ м (10 структурных ячеек композита), для варианта № 4 $X \sim 0{,}02$ м (до 20 структурных ячеек композита). Вариант № 3 в наибольшей степени соответствует экспериментальным результатам, представленным в таблице.

Как видно, дискретно-гетерогенный механизм прогрева поверхности многомерно-армированного УУКМ при наличии одномерно-армированных стержней с высокой температуропроводностью по длине углеродного волокна и с длиной, соизмеримой с толщиной детали, относительно быстро может приводить к росту температуры в объеме детали. Вторым эффективным приемом стабилизации температурного поля в объемах деталей может стать применение в стержнях армирования высокотеплопроводного углеродного волокна из каменноугольного пека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально показано проявление дискретно-гетерогенного механизма прогрева поверхности многомерно-армированного УУКМ при высокоскоростном нагреве детали.

2. Локальные местные аномалии нагрева поверхностей деталей из УУКМ по длине стержней армирования, обладающих относительно более высокими теплопроводностью и температуропроводностью, могут передаваться на большую глубину детали.

Библиографический список

1. ***Pradere, Ch.*** Thermal and thermomechanical characterization of carbon and ceramic fibers at very high temperature / *Ch. Pradere.* — Ecole Natiionale Superiered`Artset Metiers Centre de Bordeaux, 2004. — 296 p. https://pastel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/500111/filename/ThesePradere.pdf.

2. ***Ohlhorst, C. W.*** Thermal conductivity data base of various structural carbon-carbon composite materials / *C. W. Ohlhorst, W. L. Vauhn, P. O. Ransone, H.-T. Tsou.* — Hampton, Virginia, Langley Research Center, 1997. — 96 p. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.82.682&rep=rep1&type=pdf.

3. ***Grujicic, M.*** Computational analysis of the thermal conductivity of the carbon–carbon composite materials / *M. Grujicic, C. L. Zhao, E. C. Dusel* [et al.] // J. Mater. Sci. — 2006. — Vol. 41, Iss. 24. — P. 8244–8256. https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-1003-x.

4. ***Kolesnikov, S. A.*** Formation of carbon-carbon composite material thermal conductivity standarts / *S. A. Kolesnikov, M. Yu. Bamborin, V. A. Vorontsov* [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 1. — P. 94–102.

Колесников, С. А. Формирование уровня теплопроводности углерод-углеродного композиционного материала / *С. А. Колесников, М. Ю. Бамборин, В. А. Воронцов* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 2. — С. 30–38.

5. ***Kolesnikov, S. A.*** Study of thermophysical property formation of spatially reinforced carbon-carbon composite materials / *S. A. Kolesnikov, L. V. Kim, V. A. Vorontsov* [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 4. — P. 439–449.

Колесников, С. А. Исследование формирования теплофизических характеристик объемно-армированных углерод-углеродных композиционных материалов / *С. А. Колесников, Л. В. Ким, В. А. Воронцов* [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 8. — С. 45–56.

6. ***Glass, D. E.*** Ceramic matrix composite (CMC) thermal protection systems (TPS) and hot structures for hypersonic vehicles / *D. E. Glass* // 15th AIAA Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080017096.pdf.

7. **Пат. 2651344 Российская Федерация.** Наконечник гиперзвукового летательного аппарата / Горяев А. Н., Назаренко В. В., Матросов А. В., Горский В. В., Ватолина Е. Н., Тащилов С. В., Тимофеев А. Н. — № 2016149536 ; заявл. 16.12.16 ; опубл. 19.04.18, Бюл. № 11. http://www.findpatent.ru/patent/265/2651344.html.

8. ***Колесников, С. А.*** Углерод-углеродные композиты, разработка, исследование и применение в высокотемпературной технике / *С. А. Колесников, А. К. Проценко* // Сб. докл. Междунар. конф. «Современное состояние и перспективы развития электродной продукции, конструкционных и композиционных углеродных материалов» (25–26 ноября 2010 г., Челябинск). — С. 259–271.

9. ***Mullenix, N.*** Parallel tightly coupled solver for unsteady hypersonic ablation of graphite / *N. Mullenix, A. Povitsky* // AIAA 2010-4451 40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit (28 June – 1 July 2010, Chicago, Illinois). http://www.enu.kz/repository/2010/AIAA-2010-4451.pdf.

10. ***Feng, Zhi-Hai.*** Analytical model of thermal conductivity for carbon/carbon composites with pitch-based matrix / *Zhi-Hai Feng, Jia-Yun Zhi, Zhen Fan* [et al.] // Advances in Mechanical Engineering. — 2015. — Vol. 7, № 1. — Article ID 242586. DOI: 10.1155.-2014/242586. https://www.researchgate.net/publication/275513278_An_Analytical_Model_of_Thermal_Conductivity_for_CarbonCarbon_Composites_with_Pitch-Based_Matrix.

11. ***Медведский, А. Л.*** Исследование физико-механических свойств 4D-углеродного композиционного материала на макро- и микроуровнях при воздействии высоких температур / *А. Л. Медведский, Ю. В. Корнеев, А. С. Курбатов* // Электронный журнал «Труды МАИ». — 2015. — Вып. № 41. www.mai.ru/science/trudy/.

12. ***Minapoor, Sh.*** Simulation of non-crimp 3D orthogonal carbon fabric composite for aerospace applications using finite element method / *Sh. Minapoor, S. Ajeli, M. Javadi Toghchi* // International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering. — 2015. — Vol. 9, № 6. — P. 982–990. https://waset.org/publications/10001564/simulation-of-non-crimp-3d-orthogonal-carbon-fabric-composite-for-aerospace-applications-using-finite-element-method.

13. Многомерно-армированные углерод-углеродные композиционные материалы. http://niigrafit.ru/produktsiya/kompozity.php.

14. ***Manocha, Lalit M.*** High performance carbon-carbon composites / *Lalit M. Manocha* // Sadhana. — 2003. — Vol. 28, Parts 1/2. — P. 349–358. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.582.8031&rep=rep1&type=pdf.

15. ***Проценко, А. К.*** Разработка углерод-углеродных технологий и перспективы их развития. В сб. Научно-исследовательскому институту конструкционных материалов на основе графита — 55 лет / *А. К. Проценко, С. А. Колесников*. — М. : Научные технологии, 2015. — 246 с. http://www.niigrafit.ru/nauka-i-obrazovanie/sbornik.pdf.

16. **Пат. 2498962 Российская Федерация**. Армирующий каркас углерод-углеродного композиционного материала / Кречка Г. А., Клейменов В. Д., Савельев В. Н. — № 2011127880/02 ; заявл. 06.07.11 ; опубл. 20.11.13, Бюл. № 32. http://www.findpatent.ru/patent/249/2498962.html.

17. ***Иженбин, И. А.*** Томографическая система на базе томографа «Орел» для осуществления томографического сканирования образцов из УУКМ материалов типа 39п7.001 и 4КМС-Л / *И. А. Иженбин* // Электронный научный архив Томского политехнического университета, 2016 г. http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/28151/1/TPU174557.pdf.

18. Радиационные пирометры типа РАПИР, Кельвин, LandRT8A. http://echome.ru/radiacionnyj-pirometr.html. ■

Получено 07.11.18

© С. А. Колесников, Л. В. Ким, В. Р. Дудин, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

62nd International Colloqium on Refractories 2019

62-й Международный коллоквиум по огнеупорам 2019

25–26 сентября 2019 г. **г. Аахен, Германия**

Темы

- ► Сырьевые материалы
- ► Технологические процессы
- ► Логистика сервисного обслуживания футеровки
- ► Защита окружающей среды
- ► Ответственность за качество продукции
- ► Отраслевая программа и деятельность в области научных исследований и разработок
- ► Законодательство

EUROPEAN CENTRE ECREF FOR REFRACTORIES