

УДК 536.21

ИСАЕВ К.Б.

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ОРГАНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

Часть 3. Влияние различных факторов на теплофизические характеристики ТЗМ

Показано вплив швидкості нагріву, математичної моделі теплопереносу, типу зв'язуючого, природи і структури наповнювача та інших чинників на теплофізичні характеристики композиційних теплозахисних матеріалів з органічною матрицею.

Показано влияние скорости нагрева, математической модели теплопереноса, типа связующего, природы и структуры наполнителя и других факторов на теплофизические характеристики композиционных теплозащитных материалов с органической матрицей.

It is shown influence of heating rate, mathematical model of heat transfer, type of resin, nature and structure of filler and other factors on thermophysical properties of composite heat-shielding materials with an organic matrix.

b – скорость нагрева;
 C – удельная теплоемкость;
 c – кокс; окончание деструкции связующего;
 d – начало деструкции связующего;
 g – газ;
 o – open – пустой символ;
 q – мощность внутренних стоков тепла;
 s – solid – заполненный символ;
 T – температура;
 V – линейная скорость;
 v – объем;
 w – поверхность;
 max – максимальный;

Γ – коэффициент газификации связующего;
 ΔH – удельная теплота деструкции связующего;
 λ – коэффициент теплопроводности;
 ρ – плотность;
 τ – время;
 φ – содержание связующего в материале;
 0 – комнатная;
 MM – математическая модель;
 OZT – обратная задача теплопроводности;
 TZM – теплозащитный материал;
 TZP – теплозащитное покрытие;
 TFX – теплофизические характеристики.

Введение

Композиционные материалы с полимерной матрицей находят широкое применение в самых различных областях техники. Наиболее емкими потребителями этих материалов являются авиационная и ракетно-космическая техники. На их долю приходится более 50 % от общего потребления таких материалов в мире. Использование композиционных материалов, в особенности для тепловой защиты, невозможно без наличия достоверной информации об их различных параметрах и характеристиках, в том числе и теплофизических, в широких диапазонах температур и скоростей нагрева. В литературе имеет место разрозненная информация об основных параметрах и характеристиках теплозащитных

материалов, освещающая влияние отдельных факторов на них [1-4]. В данной работе проведен комплексный анализ влияния различных факторов на удельную объемную теплоемкость и эффективный коэффициент теплопроводности теплозащитных материалов с органической матрицей. Эта статья является третьей (заключительной) частью комплекса исследований теплофизических характеристик ТЗМ в условиях одностороннего нагрева [5,6], имитирующих эксплуатационные.

Коэффициент теплопроводности ТЗМ – эффективная характеристика материалов даже при комнатных температурах, т.к. этот класс материалов по своей природе неоднороден (в органической матрице расположены различные наполнители, или же различные наполнители пропитаны органическим

Табл. 1. Состав и теплофизические характеристики ТЗМ при комнатной температуре

№ п/п	Марка материала	Состав	Содержание связующего, %	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Фенольное связующее						
1	АТФ-1	Бакелитовый лак Асбестовая ткань АТ-1	48...50	1620	0.58...0.6	1130
2	СВФ-1	Фенолоформальд. связующее Кремнезем. нить КН-11 (длина 20мм)	25...35	1640...1800	0.3	910
3	СВФ-2	Фенолоформ. связующее Волоконкремнезем. нити КН-11	29...33	1740	0.38...0.46	870
4	СВФ-4	Фенолоформальд. связующее Кремнезем. нить КН-11	29...33	1700...1790	0.38	900
5	УТФ-1	Фенолоформальд. связующее Углерод. ткань ТМП-8	38...42	1200...1320	–	1010
6	УВФ-2	Фенолоформальд связующее К-6 Низкомодульное углерод. волокно ткани УТМ-8	40...45	1500	0.38	1110
7	УВФ-4	Фенолоформальд. связующее СФЖ-302 Высокомодульное углерод. волокно ВПР-19С	40	1610	–	1050
Эпоксидное связующее						
8	СТЭ-1	Эпоксидное связующее ЭДТ-10 Многослойная кремнез. ткань МКТ-5.25	34...42	1600...1620	0.36...0.41	1070
Кремнийорганическое связующее						
9	СТК-1	Кремнийорг. связующее КМ-9К Многослойн. кремнез. ткань МКТ-5.25	37	1580	0.44	880
10	СТК-3	Кремнийорг. связующее К-101 Многослойн. кремнез. ткань МКТ-4.2	30	1680	0.33	950
11	СТК-5	Кремнийорг. связующее КМ-9К Трехмер. кварц. блок ТТМ-100	17	1500...1700	0.64	840...910

связующим). Для определения температурной зависимости коэффициента теплопроводности ТЗМ в условиях одностороннего нагрева в работе использовался комплексный подход [7,8], который основан на двух методиках решения обратных задач теплопроводности [9,10], экспериментальной базой для которых являлись экспериментальные температурные поля в образцах материалов [6-9,11]. Методики решения обратных задач теплопроводности реализованы в программах *KV* [9] и *PR* [10]. Алгоритм исследования теплофизических характеристик ТЗМ с органической матрицей, который используется в данной работе, подробно описан в [8].

Объект исследования

В качестве теплозащитных в настоящее время используются самые разнообразные материалы. К ним относятся и армированные пластмассы (табл. 1), состоящие по существу из терморезактивной полимерной матрицы, а также неорганических (реже органических) неметаллических волокон и тканей, порошковых органических или неорганических наполнителей. Состав и свойства исследованных ТЗМ при комнатной температуре приведены в табл. 1.

Полимерная матрица может состоять из различных смол, в основном фенольных, эпоксидных, кремнийорганических и др., а также их модификаций. В качестве связующего используют полимер различной природы и химической структуры, который в ТЗМ выполняет несколько функций – достижение требуемой механической прочности теплозащитного покрытия, образование карбонизованного слоя, препятствующего проникновению тепла к защищаемому объекту, реализацию различных физико-химических процессов при нагревании ТЗМ, происходящих в основном с поглощением тепла и т.п.

В работе исследованы материалы с фенольной, эпоксидной и кремнийорганической матрицами и их модификации, т.к. это наиболее широко используемые в практике связующие. Помимо теплозащитного покрытия изделий первые два используются для изготовления различных изделий конструктивного назначения (корпуса самолетов, автомобилей, различные емкости и т.д.), а кремнийорганическое связующее используется в основном для изготовления радиопрозрачных материалов.

Асбестовые, стеклянные, кремнеземные, углеродные, графитовые и другие волокна, нити или ткани служат в качестве армировки. Последний компонент ТЗМ, как правило, обладает более высокой теплопроводностью по сравнению с полимерной матрицей и эта характеристика наполнителей может существенно различаться по своему значению. Наполнитель обладает различной структурой, которая также оказывает определенное влияние на теплопроводность ТЗМ. В качестве наполнителя могут быть использованы однослойные или многослойные ткани, волокна различного типа и длины, порошки и т.п. Эффективная теплопроводность составляющих теплозащитных материалов также существенно различается.

Математические модели теплопереноса в теплозащитных материалах

При расчете прогрева теплозащитного покрытия из композиционных материалов с органической матрицей используются математические модели, основанные на законах сохранения массы, количества движения, энергии и уравнение состояния газовой фазы [1,12]. Наиболее полная ММ термохимического и механического разрушения ТЗМ в трехмерном виде приведена, например, в [12]. Обычно при расчетах температурного поля в ТЗП изделий используются более упрощенные математические модели теплопереноса. В этой работе также проанализированы допущения, которые можно сделать в отношении математических моделей теплопереноса в ТЗП.

Достоверный расчет температурных полей в разрушающихся теплозащитных покрытиях изделий связан с определенными трудностями, которые вызваны прохождением различных физико-химических процессов при повышенных температурах, зависимостью теплофизических характеристик ТЗМ, как от температуры, так и от скорости нагрева. Обычно в математических моделях теплопереноса термическая деструкция связующего описывается уравнением аррениусовского типа (изотермическим или неизомермическим). Сложность использования этого уравнения заключается в неопределенности значений его параметров (предэкспоненциальный множитель, энергия активации, порядок реакции) при различных скоростях нагрева. В связи с этим, в данной работе применя-

ется квадратичная зависимость плотности ТЗМ от температуры в зоне деструкции связующего [8,9]. Влияние скорости нагрева на процесс термической деструкции связующего в этой зависимости учитывается температурами начала $T_d(b_{\max})$ и окончания $T_c(b_{\max})$ этого процесса, которые являются функциями скорости нагрева. В работе использовались две одномерные модели: полуограниченное тело (для квазистационарного режима нагрева) и пластина (для нестационарного нагрева).

Для объемных стоков тепла в данной работе используется следующее соотношение для квазистационарного режима нагрева:

$$q_v = V_w \left(\Phi \Delta H \frac{\partial \rho}{\partial T} + c_g \int_{T_0}^T \frac{\partial \rho}{\partial T} dT \right) \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1)$$

которое после учета квадратичной зависимости плотности ТЗМ от температуры приобретает удобный для расчета вид [7,8].

Для нестационарного режима нагрева ТЗМ, если в стоках тепла пренебречь конвективным членом (второе слагаемое в (1)), поглощение тепла за счет пиролиза связующего можно учесть через модификацию удельной объемной теплоемкости, которая с учетом квадратичной зависимости плотности от температуры представится в виде [7,8]:

$$C'_v = C_v(T) + \frac{2 \rho_0 \Phi^2 \Gamma \Delta H}{(T_c - T_d)^2} (T - T_d), \quad (2)$$

$$T_d \leq T \leq T_c$$

Соотношения (1) – (2) используются далее при определении $\lambda(T)$ решением обратной задачи теплопроводности при различных скоростях нагрева образцов ТЗМ, а также при расчете температурного поля в образцах ТЗМ в условиях одностороннего нагрева [11].

Влияние различных факторов на $C_v(T)$ ТЗМ

Для расчета температурного поля в теплозащитных покрытиях изделий необходима информация об удельной объемной теплоемкости материалов. В данной работе эта характеристика определялась по методике [7,8,11] при известных температурах начала и окончания процесса термической деструк-

ции связующего при различных скоростях нагрева. Для фенольного связующего информация об этих температурах приведена в [7,8].

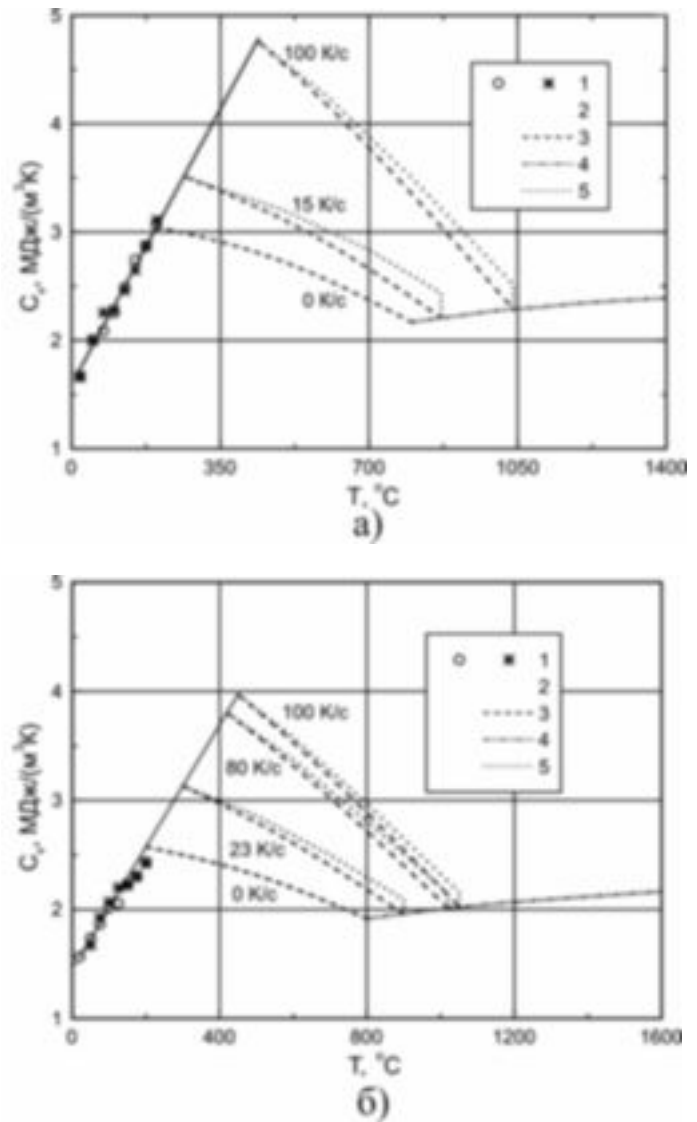


Рис. 1. Зависимость удельной объемной теплоемкости углепластика УВФ-2 (а) и стеклопластика СВФ (б) от температуры при различных скоростях нагрева:
 1 – $C_v = c_p(T)\rho\theta$ (c_p – экспериментальные данные исходного материала);
 2 – линейная аппроксимация и экстраполяция данных 1;
 3 – зона деструкции связующего материала (без учета стоков тепла);
 4 – кокс материала; 5 – $C_v'(T)$.

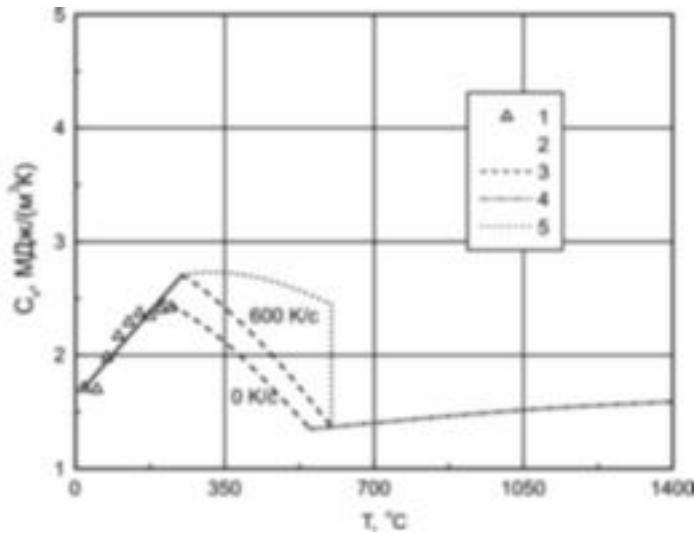


Рис. 2. Зависимость удельной объемной теплоемкости стеклопластика СТЭ-1 от температуры при различных скоростях нагрева:
 1 – усредненные по 4-м образцам
 данные $C_v = c_p(T)\rho_0$
 Остальные обозначения аналогичны рис. 1

Для исходного материала до температуры начала деструкции связующего $c_p(T)$ не зависит от скорости нагрева и эта зависимость является линейной функцией от температуры и определяется любым известным способом. Плотность исходного материала до температуры начала деструкции связующего – величина практически постоянная. Проводя линейную экстраполяцию $C_v(T)$ исходного материала в область высоких температур до температур T_d при различных скоростях нагрева получим предельные значения C_v при этих скоростях (рис. 1, а, б; рис. 2, линия 2). Кокс – это зона материала (при $T \geq T_c$), в которой уже закончился процесс деструкции связующего и он состоит из твердого пористого каркаса и газообразных продуктов разложения связующего, которые через него фильтруются. Для этой зоны материала удельная объемная теплоемкость каркаса кокса ТЗМ с органической матрицей может быть рассчитана по аддитивному соотношению [8,11].

Для зоны пиролиза связующего ($T_d - T_c$) предполагалось, что c_p является линейной функцией температуры, а плотность материала является квадратичной функцией от температуры [8,9].

Наибольшими значениями C_v исходного материала (из всех рассмотренных в данной работе ТЗМ) обладает асботекстолит АТ-1Ф [7]. Это в

первую очередь вызвано большим содержанием связующего в нем (табл. 1). Наибольшими значениями C_v кокса обладает углепластик УВФ-2, что связано с тем обстоятельством, что углеродное волокно имеет большие значения удельной теплоемкости по сравнению с кремнеземом и асбестом.

Для стеклопластика с эпоксидной матрицей C_v кокса значительно меньше этой характеристики фенольных материалов, в связи с меньшим содержанием углерода в коксовом остатке эпоксидного связующего по сравнению с фенольным. Необходимо также учесть, что плотность кокса эпоксидного стеклопластика значительно меньше, т.к. коэффициент газификации данного связующего составляет $\sim 80\%$ (при $\sim 50\%$ – для фенольного связующего). Этим же обстоятельством, а также большим значением удельной теплоты деструкции эпоксидного связующего по сравнению с фенольными, вызвано резкое увеличение C_v' (соотношение (2)) этого стеклопластика (рис. 2).

Влияние различных факторов на $\lambda(T)$ ТЗМ

На коэффициент теплопроводности ТЗМ с органической матрицей оказывает влияние большое количество факторов, в частности – скорость нагрева, природа и структура наполнителя, типа и содержания связующего и др.

Воспроизводимость результатов определения $\lambda(T)$.
 На рис. 3 на примере материалов СВФ-2 и УВФ-3 показано влияние этого фактора на их коэффициент теплопроводности. Обычно испытывали по два-три образца одного материала на установке при одинаковых условиях нагрева. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности материалов на рис. 3 определялась при постоянном значении удельной объемной теплоемкости и равенстве нулю стоков тепла. Для образцов стекловолокнита СВФ-2 имеет место практическое совпадение значений коэффициентов теплопроводности. Для углеволокнита УВФ-3 проведена аппроксимация значений $\lambda(T)$ для двух образцов с максимальной погрешностью $\lambda(T)$ 15 % при 600 °С от кривой 3. Вертикальными стрелками на рис. 3 обозначены температуры, при которых $\lambda(T)$ материалов имеет минимум. Отличие этих температур для стеклопластика и углепластика вызвано различными скоростями нагрева этих материалов. Для СВФ-2 – $b_{max} \approx 16$ К/с, а для УВФ-3 – $b_{max} \approx 270$ К/с.

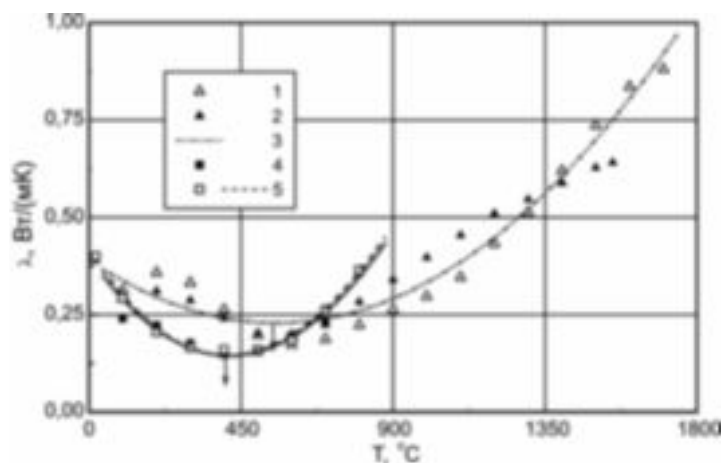


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности углепластика УВФ-3 и стеклопластика СВФ-2 от температуры:
 1, 2 – данные о $\lambda(T)$ образцов №№ 4, 6 УВФ-3 соответственно; 3 – аппроксимация данных 1 и 2;
 4, 5 – данные и аппроксимация $\lambda(T)$ образцов №№ 2, 3 СВФ-2 соответственно.

Математическая модель теплопереноса в ТЗМ. Она играет существенную роль при определении коэффициента теплопроводности материалов (рис. 4, 5). Учет в математической модели $C_v(T)$ и поглощения тепла за счет термической деструкции связующего и газообразными продуктами деструкции приводит к росту значений $\lambda(T)$, рассчитанных по данной модели.

Для $\lambda(T)$ исследованных ТЗМ, определенных при C_{v0} и $q_v = 0$, значения коэффициента теплопроводности при экстраполяции в область низких температур (до комнатной) стремятся к значению λ_0 при этой температуре для различных скоростей нагрева. Это обстоятельство может служить некоторым критерием качества, как экспериментальной информации, так и решения обратных задач теплопроводности при условии, что значение λ_0 известно с достаточной точностью. Учет в ММ теплопереноса температурной зависимости удельной объемной теплоемкости для фенольных пластиков приводит к существенному увеличению значений коэффициента теплопроводности (рис. 4).

Если в ММ учтены теплота разложения связующего и поглощение газообразными продуктами разложения, то это уже приводит к незначительному увеличению значений фенольных ТЗМ, начиная примерно с 800 °С.

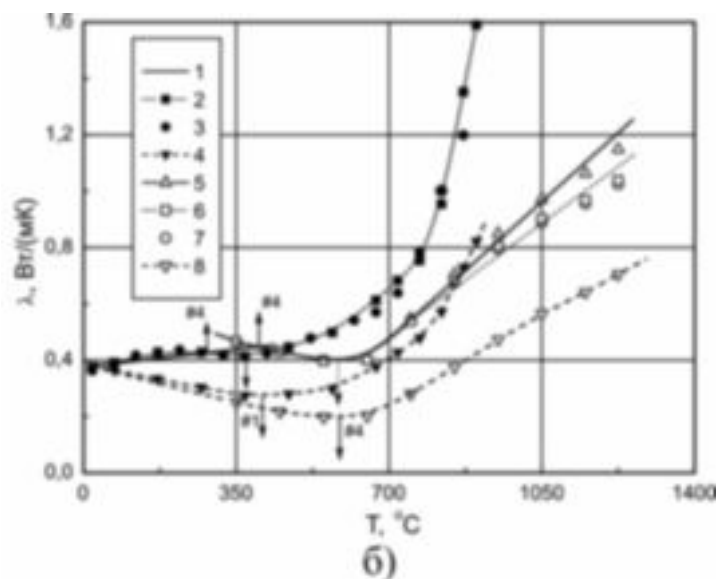
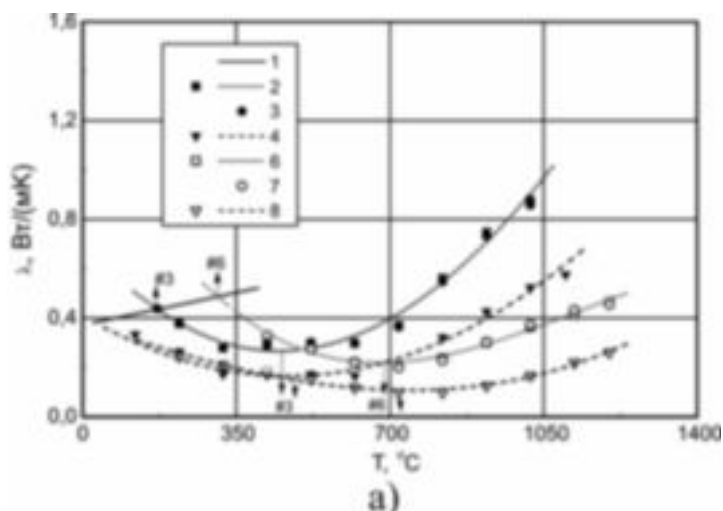


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры:
 а) УВФ-2 (образцы №№ 3с ($b_{max}=14$ К/с), 6о ($b_{max}=288$ К/с)) и
 б) СВФ-4 (образцы №№ 1с ($b_{max}=23$ К/с), 4о ($b_{max}=80$ К/с));
 1 – $\lambda(T)$ исходного материала; 2, 6 – $\lambda(T)$ определен при $C_v'(T)$; 3, 7 – $\lambda(T)$ определен при $C_v(T)$; 4, 8 – $\lambda(T)$ определен при C_{v0} ; 5 – $\lambda(T)$ определен при $C_v(T)$ и q_v

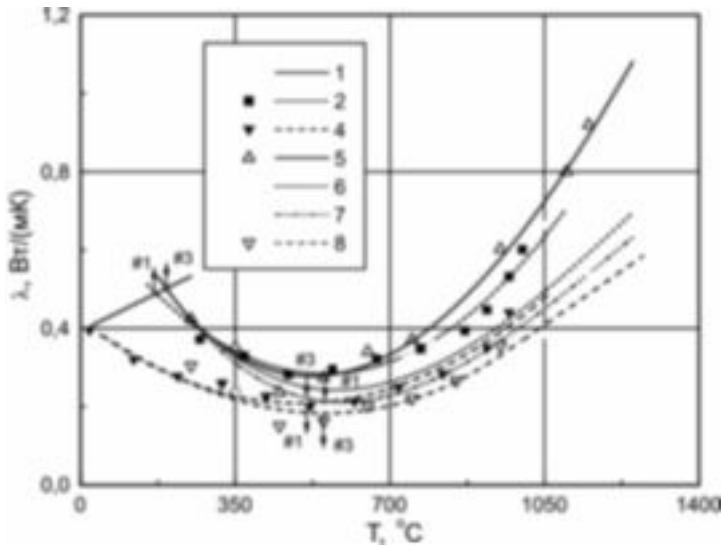


Рис. 5. Зависимости коэффициента теплопроводности стеклопластика СТЭ-1 от температуры:
 (образцы №№ 1s ($b_{max}=13$ К/с) СГУ-6,
 3o ($b_{max}=200$ К/с) ЖРД).
 Обозначения аналогичны рис. 4

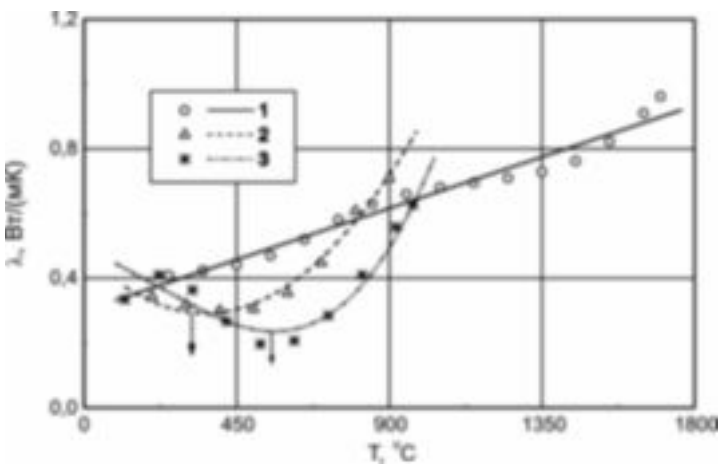


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопроводности стеклопластиков с кремнийорганической матрицей от температуры: 1 – СТК-5 (№ 2, ЖРД);
 2 – СТК-3 (№ 3 ($b_{max}=18$ К/с), СГУ-6);
 3 – СТК-1 (№ 4 ($b_{max}=145$ К/с), ЖРД).

Для стеклопластика СТЭ-1 на эпоксидном связующем имеет место обратная картина (рис. 5). Учет температурной зависимости удельной объемной теплоемкости (рис. 2) приводит к увеличению значений $\lambda(T)$ при низких температурах, а при вы-

соких температурах значения $\lambda(T)$, полученные при C_{v0} и $C_v(T)$, отличаются незначительно (рис. 5). Такое поведение коэффициента теплопроводности вызвано температурной зависимостью удельной объемной теплоемкости эпоксидного стеклопластика – C_{v0} делит $C_v(T)$ на две части (рис. 2). Для материалов с фенольной матрицей зависимости $C_v(T)$ расположены выше значения C_{v0} (рис. 1, а, б). Для материалов с фенольной и эпоксидной матрицами учет $C_v(T)$ и q_v в ММ приводит к незначительному (20...50 °С) уменьшению температуры, при которой их коэффициент теплопроводности минимален (рис. 4 и 5).

На рис. 4, 5 стрелки, направленные вверх, обозначают температуры начала деструкции связующего, а вниз – температуры, при которых $\lambda(T)$ имеет минимум. Температуры начала деструкции на рис. 4 и 5 получены пересечением $\lambda(T)$ исходного материала (паспортные данные) и $\lambda(T)$, полученного решением ОЗТ. На этих рисунках для СВФ-4 (образец № 4) и СТЭ-1 (образец № 3) $\lambda(T)$ получены с помощью программного пакета *KV*, а для других образцов (а также на рис. 6-8) – пакета *PR*.

Скорость нагрева (b_{max}). В диапазоне температур T_0-T_d $\lambda(T)$ ТЗМ с органической матрицей – линейная функция температуры [1,2] и не зависит от скорости нагрева. При достижении температуры T_d (своей для различных скоростей нагрева) значения $\lambda(T)$ начинают уменьшаться и в диапазоне $T_d - T_c$ зависимость $\lambda(T)$ имеет минимум (рис. 4-6). Этот минимум обусловлен максимальной скоростью процесса разложения органической связки, что приводит к образованию максимальной пористости в материале для конкретных условий нагрева. При этом в материале давление газообразных продуктов разложения связующего составляет несколько десятков бар [13].

При различных видах одностороннего нагрева структура пор в коксе формируется под воздействием внешних условий – давление торможения и скорость нагрева (величина теплового потока), а также внутренних – структура наполнителя, тип и содержание связующего.

Главное отличие $\lambda(T)$ ТЗМ при объемном и одностороннем [2,7] нагревах заключается в том, что в первом случае значения $\lambda(T)$ увеличиваются с ростом скорости нагрева [2], а во втором – умень-

шаются (рис. 4). Это связано с отличием структуры пор в коксе ТЗМ при этих нагревах.

Для стеклопластиков с кремнийорганической матрицей (рис. 6) также имеет место сдвиг минимума $\lambda(T)$ в область высоких температур с увеличением b_{max} . Для стеклопластика СТК-5 его $\lambda(T)$ не имеет минимума, что вызвано структурой его наполнителя.

Тип связующего. Здесь представлены образцы двух стеклопластиков СТК-1 и СТЭ-1 с одинаковой армировкой – многослойная кремнеземная ткань МКТ-5,25. Содержание связующего у них почти одинаково: СТК-1 – кремнийорганическое связующее ~ 37 %, СТЭ-1 – эпоксидное связующее ~ 38 % (табл. 1). Результаты определения $\lambda(T)$ этих материалов при постоянных значениях C_{v0} и $q_v = 0$ приведены на рис. 5 и 6. Это связано с тем, что для СТК-1 нет достоверной информации о температурах начала и окончания деструкции кремнийорганического связующего при высоких скоростях нагрева. Значения $\lambda(T)$ стеклопластика СТК-1 лежат выше значений этой характеристики образца СТЭ-1 (рис. 5). Это вызвано, во-первых, несколько большим содержанием связующего у СТЭ-1, а во-вторых, значительным отличием коэффициентов газификации этих связующих. Для кремнийорганического связующего $\Gamma = 13$ %, а для эпоксидного – 80 % от веса связующего. При деструкции связующего большая пористость образуется у стеклопластика СТЭ-1, поэтому зависимость $\lambda(T)$ находится ниже значений этой зависимости для СТК-1 при высоких температурах.

Природа и структура наполнителя. На рис. 7 представлены $\lambda(T)$ трех материалов – угле-, асбестолиты и стекловолокнит. Из рисунка следует, что наибольшими значениями $\lambda(T)$ до 800 °С обладает материал УТФ-1, в состав которого входит углеродная ткань. Интересно отметить, что при температуре 800 °С значения коэффициента теплопроводности этих трех материалов практически совпадают.

Несмотря на более высокое содержание связующего в АТФ-1 значения $\lambda(T)$ лежат выше этих значений для СВФ-1. Здесь видимо превалирующее влияние оказывает структура наполнителя – асбестовая ткань. В состав СВФ-1 входят куски нити КН-11 длиной ~ 20 мм, которые располагаются в

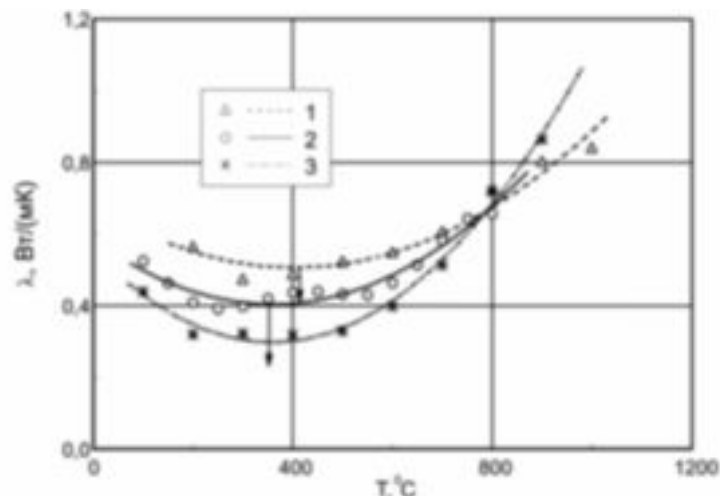


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплопроводности ТЗМ с фенольной матрицей от температуры:

- 1 – УТФ-1 (образец № 1 ($b_{max}=28$ К/с));
- 2 – АТФ-1 (образец № 19 ($b_{max}=8$ К/с));
- 3 – СВФ-1 (образец № 2 ($b_{max}=10$ К/с)).

материале хаотически. Резкое увеличение значений $\lambda(T)$ для СВФ-1 с ростом температуры объясняется увеличением коэффициента теплопроводности нити КН-11, которая состоит из кремнезема – полупрозрачного материала, теплопроводность которого резко возрастает после 400 °С [14]. Минимумы зависимостей $\lambda(T)$ асбо- и стеклопластика имеют место при близких температурах, а для углетекстолита этот минимум смещен в область высоких температур (рис. 7). Это связано с отличием скоростей нагрева образцов этих материалов. Для углепластика скорость нагрева больше, чем у асбо- и стеклопластика примерно в 3 раза.

Структуры наполнителя. Влияние структуры наполнителя рассмотрено на примере стеклопластиков с кремнийорганической матрицей (рис. 6) и углепластиков с фенольной матрицей [15]. Учитывая примерно одинаковое количество связующих в углепластиках (табл. 1), а также близкие значения их удельных теплоемкостей при комнатных температурах при оценке влияния структуры наполнителя на $\lambda(T)$ не учитывалась температурная зависимость удельной объемной теплоемкости углепластиков и стоки тепла. Для стеклопластиков с кремнийорганической матрицей при определении их $\lambda(T)$ (рис. 6) эти данные также не учитывались в математической модели теплопереноса.

Результаты определения $\lambda(T)$ углепластиков, представленные в [15], показывают, что коэффициент теплопроводности углепластиков при одностороннем радиационном нагреве (СГУ-6) имеет минимум при разных температурах. Наибольшими значениями теплопроводности (при температурах, больших 400 °С) из исследованных в [15] углепластиков обладает материал УТФ-1, в состав которого входит углеродная ткань. Сравнение теплопроводностей двух волокнитов (УВФ-4 и УВФ-2) показывает, что углепластик с высокомодульным углеродным волокном обладает большей теплопроводностью, чем углепластик с низкомоульным волокном, что связано с отличием теплопроводностей этих армирующих волокон.

Для стеклопластиков на кремнийорганическом связующем (рис. б) существенное влияние оказывает структура наполнителя. Для стеклопластика СТК-5, в состав которого входит трехмерный кварцевый блок, зависимость $\lambda(T)$ не имеет минимума. Необходимо также учесть, что связующего в этом материале примерно в два раза меньше, чем в других стеклопластиках с кремнийорганической матрицей (табл. 1).

Экстраполяция-интерполяция зависимостей $\lambda(T, b_{max})$

Для практического использования двухпараметрической функции $\lambda(T, b_{max})$ необходима информация об этой характеристике во всем диапазоне скоростей нагрева – от нулевой до предельной скорости нагрева (для конкретного связующего). Проведение экспериментальных исследований по определению температурных полей в образцах ТЗМ с необходимым по величине шагом по скорости нагрева для последующего определения $\lambda(T, b_{max})$ – довольно трудоемкая и дорогостоящая задача. Поэтому ниже для восстановления двухпараметрической функции $\lambda(T, b_{max})$ ТЗМ во всем диапазоне скоростей нагрева предлагаются линейная и квадратичная экстраполяции-интерполяции этой функции.

Линейная. Для ее реализации достаточно знать зависимость $\lambda(T)$ при двух скоростях нагрева b_1 и b_2 ($b_1 < b_2$) (индекс «max» опущен). Предельная скорость нагрева для данного типа связующего должна быть известна. Экстраполяционно-интерполяционная формула имеет вид:

$$\lambda(T, b) = \lambda(T, b_1) + \frac{\lambda(T, b_2) - \lambda(T, b_1)}{b_2 - b_1} (b - b_1).$$

Квадратичная. В этом случае должны быть известны зависимости $\lambda(T)$ при трех максимальных скоростях нагрева материала. Тогда $\lambda(T)$ можно восстановить при любой скорости нагрева с помощью полинома второй степени:

$$\lambda(T, b) = A(T) + B(T)b + C(T)b^2.$$

Соотношения для A , B и C можно найти в справочниках по математике. Так же, как и в предыдущем случае, необходима информация о предельной скорости нагрева связующего исследуемого материала. Естественно, чем больше количество зависимостей $\lambda(T, b_{max})$, тем точнее интерполяция для скоростей нагрева.

Выводы

Наибольшее влияние на удельную объемную теплоемкость ТЗМ оказывают: скорость нагрева, природа наполнителя, тип и содержание связующего. На теплопроводность этих материалов оказывают влияние те же вышеперечисленные факторы, а также структура наполнителя.

Для стеклопластика с эпоксидной матрицей его теплофизические характеристики очень слабо зависят от скорости нагрева, это связано с тем обстоятельством, что для этого типа связующего сдвиг процесса его пиролиза в область высоких температур имеет место в очень узком диапазоне, в отличие от фенольного и кремнийорганического связующих.

Полученные данные о теплофизических характеристиках для теплозащитных материалов с фенольной матрицей использовались в [11] для расчета температурного поля в ТЗП. Показано, что модельные и экспериментальные температурные поля при нагреве отличаются незначительно (максимальное отклонение температур – 10...12 %). Расчетные данные, полученные для двух вариантов ТФХ (с учетом $C_v'(T)$ и при C_{v0} , т.е. для двух математических моделей теплопереноса) ТЗМ с органической матрицей практически совпадают. Теплофизические характеристики материала, полученные на стадии нагрева теплозащитного покрытия можно

использовать для расчета температурного поля и на стадии охлаждения только при условии малой скорости охлаждения. При резком охлаждении образцов ТЗМ имеет место существенное завышение значений расчетных температур по сравнению с экспериментальными данными.

Для достоверного расчета температурного поля в ТЗП можно использовать математическую модель теплопереноса, в которой $C_v(T) = C_{v0} = \text{const}$, $q_v = 0$, а коэффициент теплопроводности является функцией температуры и определяется решением обратной задачи теплопроводности при максимальной скорости нагрева ТЗП, равной его эксплуатационной. При этом должно быть обязательное соответствие математических моделей прямой и обратной задач теплопроводности [16].

Приведенная в работе информация о ТФХ ТЗМ с органической матрицей может быть использована для выбора оптимального материала для конкретного изделия и конкретных условий его эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б.* Тепловая защита. Л.: Энергия, 1973. – 392 с.
2. *Шашков А.Г., Тюкаев В.И.* Теплофизические свойства разлагающихся материалов при высоких температурах. – Минск: Наука и техника, 1975. – 80 с.
3. *Страхов В.Л., Леонова С.Н., Гаращенко А.Н.* Некоторые результаты определения температурных зависимостей теплофизических характеристик композиционных полимерных материалов // Инж. физ. журнал. – 1977. – Т. 33, № 6. – С. 1047–1051.
4. *Goetzel C.G.* High-Temperature Properties of Reinforced Phenolic Composites // High Temp. – High Press. – 1980. – V. 12, No 2. – P. 131–146.
5. *Исаев К.Б.* Исследование теплофизических характеристик теплозащитных материалов с органической матрицей. Ч.1. Удельная теплоемкость и температура начала деструкции связующего ТЗМ при нулевой скорости нагрева // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 2. – С. 77–81.
6. *Исаев К.Б.* Исследование теплофизических характеристик теплозащитных материалов с органической матрицей. Ч.2. Экспериментальное определение температурных полей в образцах ТЗМ // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т.25, № 3. – С. 71–78.
7. *Исаев К.Б.* Определение коэффициента теплопроводности материалов // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 2. – С. 46–55.
8. *Исаев К.Б.* Теплофизические характеристики материалов в широких диапазонах температур и скоростей нагрева. – Киев: Куприянова, 2008. – 240 с.
9. *Исаев К.Б.* Теплоперенос в разрушающихся при интенсивных односторонних нагревах композиционных материалах // Инж.-физ. журнал. – 1993. – Т. 65, № 6. – С. 645–651.
10. *Круковский П.Г., Петрова Е.А.* Методика и программа решения обратных задач тепломассообмена, совместимая с программами решения прямых задач пользователя // Тр. II Минского международного форума: Тепломассообмен ММФ-92. – Минск: ИТМО НАНБ, 1992. – Т. IX, Ч. 1. – С. 120–123.
11. *Исаев К.Б.* Сравнение экспериментальных и расчетных температурных полей в образцах материалов с органической матрицей, испытанных в условиях одностороннего нагрева // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 3. – С. 119–123.
12. *Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К.* Взаимодействие материалов с газовыми потоками. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.
13. *Henderson J.B. and Wiecek T.E.* A mathematical model to predict the thermal response of decomposing, expanding polymer composites // J. Composite Materials. – 1987. – Vol. 21, No 4. – P. 373–393.
14. *Сергеев О.А., Мень А.А.* Теплофизические свойства полупрозрачных материалов. – М.: Из-во стандартов, 1977. – 288 с.
15. *Исаев К.Б.* Теплопроводность углепластиков при радиационном одностороннем нагреве // ТВТ. – 1994. – Т. 32, № 2. – С. 310–312.
16. *Исаев К.Б.* Полежаев Ю.В. Теплопроводность в квазистационарном режиме нагрева материалов // Инж.-физ. журнал. – 1989. – Т. 56, № 3. – С. 368–373.

Получено 12.06.2009 г.