

УДК 536.2

К.Б. ИСАЕВ

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОБРАЗЦАХ МАТЕРИАЛОВ С ОРГАНИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ

Представлена конструкция теплоприемника для материалов с органической матрицей, в которой погрешности определения одномерного температурного поля сведены к минимуму. Работоспособность предложенной конструкции теплоприемника продемонстрирована на образцах некоторых материалов, которые были испытаны при конвективном и радиационном нагревах. Показано влияние некоторых факторов на экспериментальное температурное поле в материалах с органической матрицей.

теплоприемник, температура, композиционный теплозащитный материал, органическая матрица, температурное поле, эксперимент, образец

Введение

Наибольшее применение композиционные материалы с полимерной матрицей находят в объектах ракетно-космической и авиационной техники, в которых они эксплуатируются в различных условиях нагрева. Наиболее емкую информацию об их работоспособности несут экспериментальные температурные поля – изменение температуры во времени в ограниченном количестве точек исследуемого объекта, полученные с помощью датчиков температуры (в основном термопар) либо при стендовых испытаниях, либо в натурных условиях эксплуатации этих объектов.

Для определения экспериментальных температурных полей в образцах этих материалов используются различные конструкции теплоприемников (НР от “heat-receiver”) – образцов исследуемых материалов с термопарами. Основная сложность при разработке и изготовлении конструкции теплоприемников заключается в создании такой конструкции, которая позволяла бы устанавливать термопары в НР и достоверно определять изменение температуры в нескольких точках образца при стендовых или натурных испытаниях материалов с органической матрицей. Существуют различные варианты конструкций НР, которые обладают теми или иными недостатками [1].

Конструкция теплоприемника

Предлагаемая в данной работе конструкция теплоприемника обладает универсальностью и в ней устранены недостатки предшествующих конструкций теплоприемников. В этой конструкции НР образец исследуемого материала (рис. 1) представляет собой ступенчатый цилиндр (1), в котором параллельно нагреваемому торцу, сделаны четыре прорези алмазным диском, толщиной 0,1 мм (рис. 1) на глубину радиуса цилиндра меньшего диаметра (1).

В эти прорези укладываются термопары ВР 5/20 (4) с электроизоляционным покрытием из двуокиси иттрия. Толщина покрытия несколько мкм. Для уменьшения термического сопротивления прорези заполняются порошком из материала с высокой теплопроводностью (например, кварц, графит и т.п.). Альтернативой этому способу может служить установка термопар в отверстия, просверленные по радиусу цилиндра меньшего диаметра взамен прорезей. Эти отверстия после укладки термопар также заполняются высокотеплопроводным порошком. Боковая поверхность цилиндра меньшего диаметра (1) (рис. 1) покрывается кварцевой нитью, сверху которой укладываются провода термопар, которые в свою очередь покрываются вторым слоем кварцевой нити.

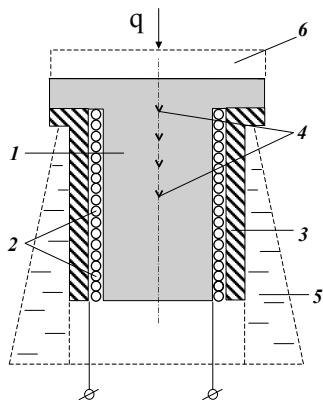


Рис. 1. Конструкция теплоприемника для теплозащитных материалов (ТЗМ):

- 1 – исследуемый материал;
- 2 – два слоя кремнеземной нити;
- 3 – втулка из теплоизоляционного материала;
- 4 – термопары; 5 – водоохлаждаемая державка;
- 6 – унесенная часть образца за счет абляции

Затем вся конструкция помещается во втулку (3) из теплоизоляционного материала (рис. 1). Для исследованных в работе материалов диаметр меньшего цилиндра образца (1) составлял 18 мм, наружный диаметр втулки (3) – 25 мм, а высота образца (1) – 30-40 мм. Однородность температурного поля в образце ТЗМ обеспечивается равномерным нагревом рабочей поверхности теплоприемника и его конструкцией.

1. Оценка погрешностей измерения температур в НР

Погрешность измерения температур контактным методом складывается из многих составляющих [2]. Оценка некоторых из них проведена в [3, 4] и для случая измерения нестационарных температур в образцах ТЗМ с помощью шлейфового осциллографа по данным этих авторов составляет 7-10%.

ТЗМ с органической матрицей "работают" в условиях высоких скоростей нагрева, поэтому их испытания на стендах проводятся при больших тепловых потоках. В связи с этим была проведена оценка инерционности термопары ВР 5/20 в предположении, что она является звеном запаздывания первого порядка, т.е. истинная температура термопары определяется следующим соотношением:

$$T_{ист} = T_s + \varepsilon (dT/d\tau),$$

где T – температура; τ – время.

Постоянная тепловой инерции термопар ε в этом соотношении оценивалась экспериментально. Для этого термопара резко погружалась в расплавленное олово и ее показания фиксировались с помощью шлейфового осциллографа НО71.3. Этот параметр для вольфрам-ренийевых термопар ВР5/20 (диаметр электродов 0,1 мм) составил $\sim 0,07$ сек. Это приближенная оценка постоянной тепловой инерции этого типа термопар, так как в нее входят переходные времена при нагреве и охлаждении горячей термопары. При максимальной скорости нагрева 500 К/с для образца углеволокнита поправка на тепловую инерцию составляет 36,4 °С или 7% при температуре 520 °С. Остальные систематические погрешности оценены в [1]. В этой работе оценены систематические погрешности измерения температур, которые имеют место при одностороннем нагреве НР из материала с органической матрицей, а также предложены меры по их устранению или уменьшению. Разработанная конструкция теплоприемника для ТЗМ позволила свести многие систематические погрешности к минимуму.

2. Температурные поля в образцах ТЗМ

В этом разделе статьи продемонстрирована работоспособность вышеописанного теплоприемника (рис. 1), а также показано влияние некоторых факторов на температурное поле в материалах с органической матрицей. На рис. 2, 3 приведены экспериментальные температурные поля в образцах ТЗМ, которые испытывались при различных видах внешнего нагрева – конвективный и радиационный. Испытания образцов ТЗМ проводились на установках, созданных в ИПМ НАН Украины: СГУ-6 – концентратор солнечной энергии; ЖРД – генератор высокотемпературной струи – продукты сгорания керосина в кислороде; ВПС – генератор высокотемпературной плазмы (в данной работе – воздушной). При

испытании на разных установках одностороннего нагрева теплоприемник, изготовленный по вышеописанной технологии, устанавливался в водоохлаждаемую державку (5), рис. 1, которая защищает его от бокового нагрева. Эта державка вместе с НР вводится в высокотемпературную газовую струю (ВПС, ЖРД) на заданном расстоянии от среза сопла или в фокальный объем концентратора солнечной энергии (СГУ-6). Движение державки осуществляется до совмещения оси НР с осью струи или оптической осью концентратора.

Температурное поле в образце ТЗМ является следствием целого ряда факторов. Это и теплофизические характеристики материала, вид и условия нагрева образца и т.д. Ниже, в качестве иллюстрации, представлены результаты определения температурных полей в образцах фенольных угле- и стеклопластиков, которые были испытаны в различных условиях и при различных скоростях нагрева (рис. 2, 3). В таблице приведены условия испытаний этих материалов и расстояния термопар от поверхности нагрева.

Таблица

Условия испытаний образцов ТЗМ с фенольной матрицей и глубины установки термопар

Материал	№ образца	Установка	Тепловой поток, МВт/м^2	Расстояния термопар от поверхности, мм			
				h_1	h_2	h_3	h_4
УВФ-1	1	ЖРД	12.60	2.9	4.0	5.1	6.1
"	3	"	6.93	3.0	4.0	5.0	6.0
"	5	СГУ-6	0.56	2.9	4.3	5.7	7.1
СВФ-1	2	СГУ-6	0.47	4.5	5.6	6.6	7.8
"	5	ВПС	3.20	2.9	3.9	4.9	5.8
"	6	"	"	2.9	3.9	4.9	5.8

Характер показаний термопар для образцов фенольных материалов: углепластика УВФ-1 (рис. 2) и стеклопластика СВФ-1 (рис. 3) одинаков.

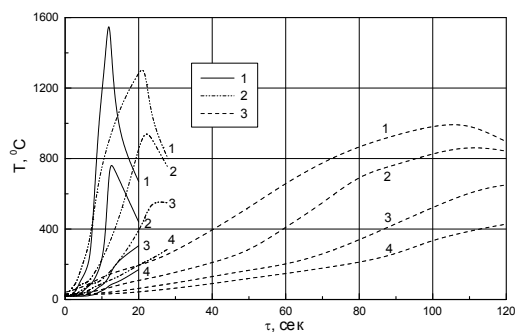


Рис. 2. Температурные поля в образцах углепластика УВФ-1:

1, 2 – образцы № 1, 3 (ЖРД) соответственно;
3 – образец № 5 (СГУ-6);
1-4 – показания четырех термопар

Т.к., образцы УВФ-1 испытывались при более высоких тепловых потоках, поэтому у образцов этого материала выше скорость нагревания, т.е. показания термопар резко изменяются со временем. Для образца №1 УВФ-1 в процессе испытаний в струе ЖРД имел место квазистационарный режим нагрева, о наличии которого свидетельствует эквидистантность показаний первой и второй термопар (рис. 2, кривые 1). Этот режим нагрева наступил с 5.5 сек. Образцы № 3 и № 5 испытывались при нестационарном режиме нагревания.

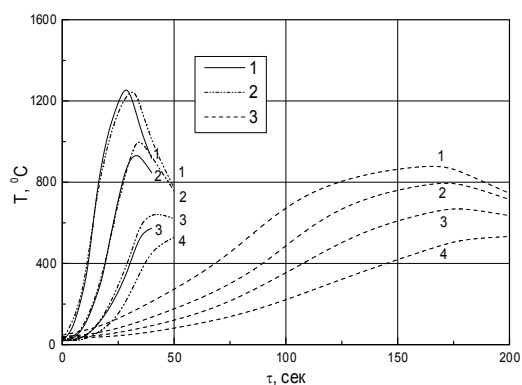


Рис. 3. Температурные поля в образцах стеклопластика СВФ-1:

1, 2 – образцы №6,5 (ВПС) соответственно;
3 – образец №2 (СГУ-6)

Образцы стеклопластика СВФ-1 также испытывались при нестационарном режиме нагревания (рис. 3). Все испытания образцов ТЗМ в работе проводились при постоянных параметрах энергетического воздействия. Для таких условий нагрева зависимость температуры от времени (в основном для

первой от поверхности нагрева термопары) имеет перегиб (рис. 2, 3) до момента снятия теплового воздействия, т.е. скорость нагрева материала имеет максимум при определенной температуре (диапазоне температур). Такой характер $T_i(\tau)$ в первую очередь вызван поведением температурной зависимости коэффициента теплопроводности этих материалов, который в диапазоне температур деструкции связующего материалов с органической матрицей имеет минимум. Это обстоятельство наглядно иллюстрируется решением прямой задачи теплопроводности для квазистационарного режима нагревания материалов [5].

Скорость нагрева для этого режима имеет вид:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{V_w}{k(T)} \int_{T_0}^T \left[V_w C_v(T) + \sum_i f_i(T) \right] dT, \quad (1)$$

где V_w – линейная скорость уноса материала;

k – коэффициент теплопроводности материала;

C_v – удельная объемная теплоемкость;

T_0 – комнатная температура.

В этом соотношении функции $f_i(T)$ учитывают поглощение тепла в материале при термическом разложении его связующего и газами, образующимися при этом процессе, которые фильтруются через кокс материала с органической матрицей [5]. Если предположить, что удельная объемная теплоемкость материала постоянна, а деструкция связующего отсутствует, то соотношение (1) примет следующий вид:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{V_w^2}{k(T)} C_{v0} (T - T_0). \quad (2)$$

Из соотношения (2) видно, что характер скорости нагрева определяется только температурной зависимостью коэффициента теплопроводности этих материалов и максимум скорости нагревания материала определяется минимумом $k(T)$. Интеграл в соотношении (1) оказывает незначительное влияние на характер температурной зависимости $dT/d\tau$ по сравнению с коэффициентом теплопроводности. Видимо, предыдущие выводы будут также справед-

ливы и для нестационарного режима нагревания образцов этих материалов.

Заключение

Показана работоспособность представленной в работе конструкции теплоприемника для материалов с органической матрицей. Приведены примеры определения температурных полей в некоторых ТЗМ с фенольной матрицей в условиях одностороннего конвективного и радиационного нагревов.

Литература

1. Исаев К.Б. Исследование теплофизических характеристик теплозащитных материалов с органической матрицей. – Ч. 2. Экспериментальное определение температурных полей в образцах ТЗМ // Пром. теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 3. – С. 71-78.
2. Температурные измерения. Справочник / О.А. Геращенко, А.Н. Гордов, В.И. Лах, Б.И. Стадник, Н.А. Ярышев. – К.: Наук. думка, 1984. – 494 с.
3. Артюхин Е.А., Киллих В.Е., Охапкин А.С. Восстановление эффективного коэффициента теплопроводности асботекстолита из решения обратной задачи теплопроводности // ИФЖ. – 1983. – Т. 45, № 5. – С. 788-793.
4. Елисеев В.Н., Соловов В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование погрешности измерения температур термопарами в теплоизоляционных материалах // ИФЖ. – 1983. – Т. 45, № 5. – С. 737-742.
5. Исаев К.Б. Влияние различных факторов на температурное поле при стационарном разрушении материалов // Пром. теплотехника. – 1987. – Т. 9, № 3. – С. 39-43.

Поступила в редакцию 15.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук Г.Н. Фролов, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев.