

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ОБРАЗЦАХ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Исаев К. Б.¹, Биленко Л. Д.², Ерошкин С. В.²

¹*Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев*

²*Углекомпозит, Запорожье*

Введение

Температурные поля в различных объектах ракетно-космической техники несут в себе огромное количество информации об их состоянии. Экспериментальное определение этих полей позволяет оценить работоспособность отдельных узлов этих объектов (например, теплозащитных покрытий, сопел ракетных двигателей) непосредственно в условиях эксплуатации, провести сравнение с расчетными температурными полями, т.е. оценить адекватность математической модели теплопереноса в исследуемых объектах, определить теплофизические характеристики материалов с помощью решения обратных задач теплопроводности и т. д.

Для определения температурных полей в образцах материалов необходимо разработать конструкцию и изготовить теплоприемник (НР от “heat-receiver”) — образец исследуемого материала с термодатчиками (в основном это термопары). Основная сложность при разработке и изготовлении теплоприемников заключается в способе заделки термодатчиков в НР для достоверного определения температурных полей при стендовых и натурных испытаниях теплозащитных материалов (ТЗМ). Есть различные варианты заделки термопар, которые обладают теми или иными достоинствами и недостатками. Так, в образце из двух половинок [1], в одной из которых сделаны пропилы и установлены термопары, по месту стыковки половинок образца происходит более интенсивное разрушение материала при конвективном нагреве (особенно при наличии избыточного давления). Это приводит к нарушению одномерности температурного поля, искажению процесса разрушения материала. Такой способ заделки термопар может быть применен при радиационном нагреве. Для этого плоскости контакта двух половинок образца должны быть хорошо подогнаны друг к другу. После заделки термопар и стыковки половинок цилиндра на него одевается защитная втулка из того же материала по плотной посадке.

Использование “пробок” (цилиндрических или прямоугольных) из исследуемого материала, в которые вмонтированы термопары [1, 2], существенно усложняет изготовление теплоприемника. Этот вариант заделки термопар нельзя использовать для образцов малого диаметра, для хрупких, пористых и порошковых материалов. Он также обладает тем недостатком, что при нагреве по месту стыковки пробки с образцом возможно накопление газообразных продуктов деструкции материала. Это ухудшает тепловой контакт. Особенно это существенно при высоких скоростях нагрева образца. Этот же недостаток присущ и еще одному варианту заделки термопар, когда в скошен-

ный под определенным углом торец цилиндрического образца установлено необходимое количество термопар. Стыковка с крышкой осуществляется под углом, обеспечивающим измерение температур на различном расстоянии от поверхности нагрева [1,3]. Для этих двух способов заделки термопар существенным недостатком также является необходимость использования склеивания с помощью связующего по технологии изготовления ТЗМ. Это приводит к лишнему нагреву исследуемого материала и может отразиться на его свойствах.

Заделка термопар в образец в процессе изготовления материала [4,5] возможна только для ограниченного класса материалов (например, слоистых композиционных материалов). Этот способ заделки термопар весьма сложен, так как технология изготовления ТЗМ требует приложения давления от единиц до нескольких сотен МПа. Он также требует привлечение рентгеновской техники для измерения положения термопар в образце, что весьма усложняет и удорожает изготовление теплоприемника. Этот недостаток также присущ и способу стыковки образца с крышкой под некоторым углом.

Конструкции теплоприемника для ТЗМ

Представленные на рис. 1 конструкции НР для исследования материалов тепловой защиты космических аппаратов обладают универсальностью [6], в них устранены недостатки вышерассмотренных конструкций теплоприемников. Первая конструкция НР предназначена для испытания ТЗМ с органической матрицей [7] — материалов с низким коэффициентом теплопроводности, а вторая — для материалов с углеродной матрицей [8], коэффициент теплопроводности которых при комнатной температуре на два порядка выше первых. В обеих конструкциях образец исследуемого материала (рис. 1) представляет собой ступенчатый цилиндр (1), в котором параллельно нагреваемому торцу сделаны четыре прорези алмазным диском толщиной 0.1 мм на глубину радиуса цилиндра меньшего диаметра (1). В эти прорези укладываются термопары (4) с электроизоляционным покрытием из двуокиси иттрия. Толщина покрытия несколько мкм. Для уменьшения термического сопротивления прорези заполняются порошком из материала с высокой теплопроводностью (например, порошок кварца или графита). Боковая поверхность цилиндра меньшего диаметра (1) покрывается кварцевой нитью, сверху которой укладываются провода термопар, которые в свою очередь покрываются вторым слоем кварцевой нити. Затем вся конструкция помещается во втулку (3) из теплоизоляционного материала.

Первая конструкция НР позволяет определять температурные поля в образцах ТЗМ в условиях абляции материалов с органической матрицей (рис. 2) как при нестационарном режиме нагрева (длительном или кратковременном), так и при квазистационарном. Последний режим характеризуется постоянством температуры поверхности испытываемого образца и ее линейной скорости движения.

Вторая конструкция разрабатывалась в основном для нестационарного режима нагрева (рис. 3), когда изменение высоты образца в процессе испытаний незначительно. Эти конструкции отличаются только наличием или отсутствием кольца (8). Это кольцо

из плотного графита позволяет провести выравнивание температур на нагреваемой поверхности образца УУКМ, что препятствует растрескиванию этого материала при испытании в воздушной плазме. Отсутствие этого кольца, т.е. испытание теплоприемника из этого материала в виде первой конструкции приводит к его растрескиванию в центре нагреваемого торца.

Для ТЗМ, исследованных в данной работе, диаметр меньшего цилиндра образца (1) составлял 18 мм, наружный диаметр втулки (3) — 25 мм, а высота образца (1) — 30–40 мм.

Погрешности измерения температур в НР

Погрешность измерения температур контактным методом складывается из многих составляющих. Систематические погрешности для измерения температур в ТЗМ с органической матрицей проанализированы в [9]. Для углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) погрешностей, связанных с процессом пиролиза связующего, нет. Предложенные выше конструкции теплоприемников позволяют значительно уменьшить или полностью устранить систематические погрешности измерения температур в образцах композиционных материалов. Ниже подробно проанализированы две систематические погрешности, которые могут иметь место при измерении температур в образцах материалов как с полимерной, так и с углеродной матрицами.

ТЗМ “работают” в условиях больших скоростей нагрева, поэтому их испытания на стендах проводятся при больших тепловых потоках. Оценка инерционности термопар проведена в предположении, что она является звеном запаздывания первого порядка, т.е. истинная температура термопары определяется следующим соотношением:

$$T_{\text{ист}} = T_0 + \varepsilon (dT/dt).$$

Здесь $T_{\text{ист}}$ — истинная температура материала, T_0 — показание термопары, ε — постоянная тепловой инерции термопар, τ — время. Постоянная тепловой инерции термопар 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-рениевых термопар ВР5/20 (диаметр электродов 0.1 мм) составил 0.07 с. Это приближенная оценка постоянной тепловой инерции этого типа термопар, так как в нее входят переходные времена при нагреве и охлаждении горячего спая термопары. При максимальной скорости изменения показаний первой термопары образца № 6 материала СВФ-4, равной 384 К/с, поправка на тепловую инерцию составит 27 °С или 4 % при температуре 670 °С. При этой температуре скорость изменения показаний первой термопары образца № 6 максимальна (рис. 2).

Для определения коэффициента теплопроводности различных материалов с помощью решения обратных задач теплопроводности используется в основном одномерное температурное поле в образце исследуемого материала. Поэтому в данной работе

была проведена экспериментальная оценка одномерности температурного поля в образцах УУКМ при их испытании в воздушной плазме. Для этого в первой и четвертой от поверхности нагрева прорезях (для разных образцов) были установлены по три термомпары на разном расстоянии от оси цилиндра меньшего диаметра примерно через два мм. В результате испытаний получено, что уменьшение температуры от центра к поверхности цилиндра составляет примерно 5 %, причем оно уменьшается с ростом температуры. Эта погрешность лежит в пределах суммарной погрешности измерения температур в образцах ТЗМ.

Для ТЗМ с органической матрицей оценка одномерности температурного поля проводилась визуально. После испытаний образцы этих материалов разрезались по диаметральной плоскости и об одномерности судили по параллельности коксового слоя не нагреваемому торцу образца. Одномерность температурного поля в образцах ТЗМ обеспечивается равномерным нагревом рабочей поверхности теплоприемника и его конструкцией.

По нашим оценкам суммарная погрешность измерения температур в образцах ТЗМ с учетом данных [3, 10] составляет 7–10 %.

Температурные поля в образцах ТЗМ

В качестве примера применения разработанных конструкций НР ниже приведены результаты определения одномерных температурных полей в образцах стеклопластика СВФ-4 (фенолоформальдегидное связующее 30 % + кремнеземная нить КН-11) и в образцах УУКМ (карбонизованная фенольная матрица с углеродными волокнами, пропитанная пироуглеродом).

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 различных 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 является следствием целого ряда факторов: теплофизические характеристики материала, вид и условия нагрева образца и т. д. Ниже проведен краткий анализ результатов определения температурных полей в образцах испытанных ТЗМ (рис. 2, 3). Условия испытаний и глубины установки термомпар в образцах этих материалов представлены в таблице.

Для образцов стеклопластика № 3 и № 4, испытанных на стенде ЖРД, имел место квазистационарный режим нагрева, о чем свидетельствует эквидистантность показаний

первой и второй термопар (рис. 2, кривые 2, 3). При этом линейная скорость движения поверхности нагрева для образца № 3 составила 0.17 мм/с, а для № 4 — 0.15 мм/с. Стационарная температура поверхности для этих образцов в процессе испытаний составляла 2100 °С. При испытании образца этого стеклопластика в струе воздушной плазмы унос материала был незначительным за время нагрева, а максимальная яркостная температура поверхности составила 2200 °С.

Все испытания образцов СВФ-4 и УУКМ проводились при постоянных параметрах энергетического воздействия. В таких условиях нагрева зависимость температуры от времени (в основном для первой термопары) для стеклопластика имеет перегиб до момента снятия теплового воздействия (рис. 2), т. е. скорость нагрева материала имеет максимум. Температура, при которой скорость нагрева для данного образца максимальна, с увеличением скорости нагрева смещается в область высоких температур. Так, для образца № 1 (СГУ-6) максимальная скорость нагрева по показаниям первой от поверхности нагрева термопары составляет — 23 К/с при 490 °С, а для образца № 6 — 384 К/с при 670 °С (рис. 2). Эти параметры нагрева для образцов № 3 и № 4 этого стеклопластика занимают промежуточное положение.

Для образцов УУКМ имеет место резкое увеличение скорости нагрева при низких температурах (до 100 °С) и ее медленное уменьшение до момента вывода образца из высокотемпературной струи. Интересно отметить, что температура поверхности этого материала имеет небольшую "полочку" при температуре примерно 1350 °С, а затем монотонное увеличение (рис. 3). Возможно, такое поведение этой температуры связано с образованием цианидов, которое протекает с поглощением теплоты [11]. Аналогичное поведение температуры поверхности имеет место и для образцов графита, испытанных в тех же условиях. Показания первой и второй термопар образца № 5 с 15-й секунды начинают уменьшаться, несмотря на то, что температура поверхности увеличивается. По-видимому, для этих термопар произошло частичное нарушение электроизоляции их проводов.

Выводы

Разработаны две конструкции теплоприемника, предназначенные для определения одномерных температурных полей в теплозащитных материалах с органической и углеродной матрицами. Эти конструкции разработаны для стендовых испытаний ТЗМ, и температурные поля в них в основном используются для определения коэффициента теплопроводности этих материалов решением обратных задач теплопроводности. По-видимому, при некоторой доработке эти теплоприемники могут быть использованы также и для натуральных испытаний теплозащиты различных изделий ракетно-космической техники.

1. Гусева Л. И., Захаров Б. П., Шведов Б. А. Комплексные исследования эффективных теплофизических характеристик ТЗМ // Тр. Моск. лесотехн. ин-та. 1978. Вып. 112. С. 24-38.
2. Legender P. J. and Chase G. T. The operational performance of reentry vehicle heatshield thermodynamic instrumentation. Instrumentation in the Aerospace Industry. 1973. V.19. P.85-96.
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. Griffis C. A., Masumura R. A. and Chang C. I. Thermal response of graphite epoxy composite subjected to rapid heating // J. Composite Materials. 1981. V. 15, Sept. P. 427-442.
5. Лакоза В. М., Миков В. Л. Измерение температурных полей в слоистых композиционных материалах // VI Всесоюз. конф. "Электротермия-88". Луцк, 1988. Тезисы. Ч.2. С. 248-249.
6. Исаев К. Б. Конструкции теплоприемника для определения одномерных температурных полей в компактных и порошковых материалах // Тепломассообмен ММФ-2000. Тр. IV Минского Межд. форума. 2000. Минск: ИТМО НАНБ. 2000. Т.3. С. 394-397.
7. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. 392 с.
8. Волков Д. П., Заричняк Ю. П. Теплофизические свойства углерод-углеродных материалов // ТВТ. 1995. Т. 33, № 6. С. 942-947.
9. Исаев К. Б. Теплоприемник для определения температурных полей в деструктурирующих материалах // Тепломассообмен-ММФ-92. Тр. II Минского Межд. форума. 1992. Минск: ИТМО НАНБ. 1992. Т.3. С. 180-183.
10. 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.
11. Термические константы веществ / Под ред. В. П. Глушкова. – М.: ВИНТИ ИВТАН СССР. 1970. Вып.IV. Ч.1. – 510 с.

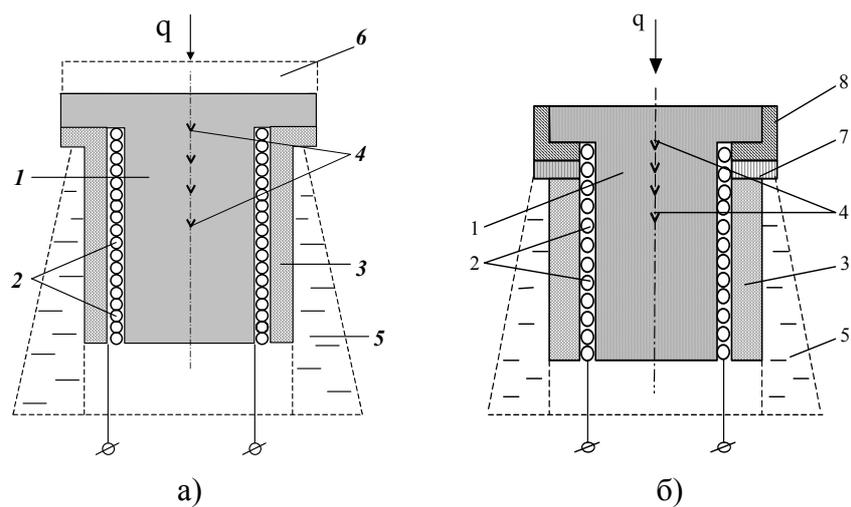


Рис. 1. Конструкция теплоприемника для теплозащитных материалов с полимерной (а) и углеродной матрицами (б). 1 — исследуемый материал; 2 — два слоя кремнеземной нити; 3 — втулка из теплоизоляционного материала; 4 — термопары; 5 — водоохлаждаемая державка; 6 — унесенная часть образца; 7 — кольцо из углепластика; 8 — кольцо из плотного графита

Условия испытаний образцов ТЗМ и глубины установки термопар

№ п/п	Материал	Условия испытаний	Тепловой поток, МВт/м ²	№ образца	Расстояния термопар от поверхности нагрева, мм			
					h ₁	h ₂	h ₃	h ₄
1	СВФ-4	СГУ-6	0.57	1	2.20	3.60	4.70	5.80
2	"	ЖРД	6.93	3	15.25	15.95	16.95	17.90
3	"	"	6.93	4	15.25	16.15	16.95	17.95
4	"	ВПС	2.72	6	2.70	3.60	4.60	5.60
5	УУКМ	ВПС	4.02	5	3.30	4.90	7.80	10.00
6	"	"	3.85	7	3.40	5.30	7.00	9.00

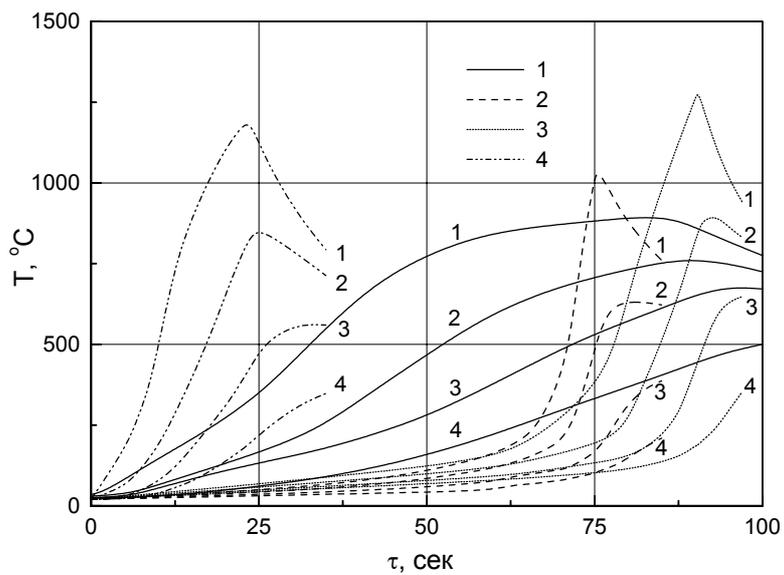


Рис. 2. Температурные поля в образцах материала СВФ-4, испытанных при конвективном и радиационном нагревах. 1 — образец № 1 (СГУ-6); 2 — образец № 3 (ЖРД); 3 — образец № 4 (ЖРД); 4 — образец № 6 (ВПС). 1–4 показания первой-четвертой термопар

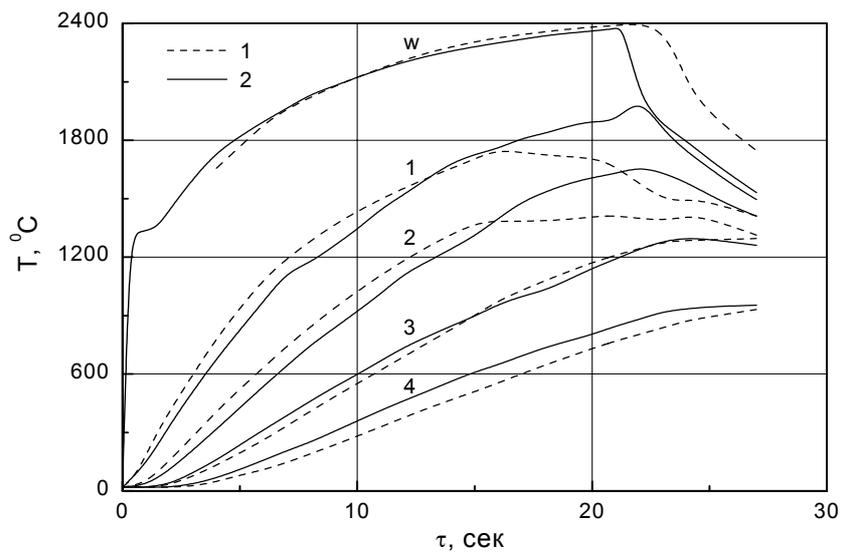


Рис. 3. Температурные поля в образцах материала УУКМ, испытанных при конвективном нагреве (ВПС). 1 — образец № 5; 2 — образец № 7. w — температура поверхности