

## **Оценка точности измерения температуры термомпарами при различных способах их размещения в объекте испытания**

© Т.В. Боровкова, В.А. Товстоног, В.Н. Елисеев

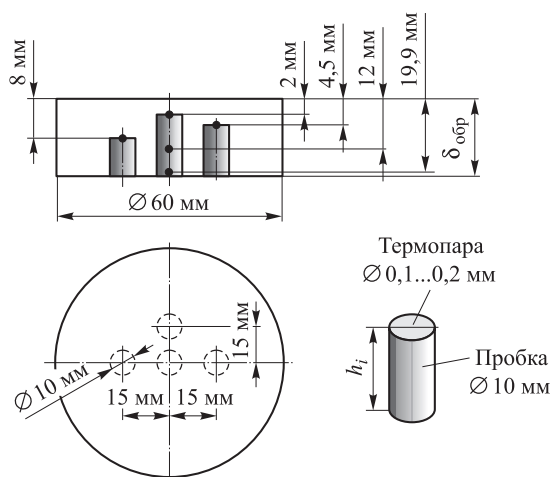
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Представлены результаты исследования погрешности измерения температуры термомпарами, размещаемыми в объекте испытания при различных способах их заделки в материал. Рассмотрены вопросы определения методической погрешности измерения температуры в материалах с низкой теплопроводностью. Проведен анализ погрешностей при размещении термомпар с помощью пробок, сделанных из основного материала путем разрезания образца с последующим склеиванием. Дана оценка влияния на погрешность воздушного зазора и клея. Приведенные в данной статье результаты исследования дополняют опубликованные ранее сведения о методической погрешности измерения температуры термомпарами, размещаемыми в образованный в объекте испытания и закрываемый специальным клеем паз. Для заделки термомпары в паз получены результаты влияния на погрешность измерения температуры анизотропных свойств материала, позволяющие ориентироваться в выборе способа установки термомпар и мерах повышения точности измерения температуры в процессе тепловых испытаний конструкции.*

**Ключевые слова:** температура, погрешности, термомпары, крепление, заделка термомпар, пробки, тепловые потоки.

В процессе тепловых испытаний материалов и конструкций летательных аппаратов для контроля за их температурным состоянием широко используют термомпарные датчики, размещаемые на поверхности или внутри исследуемого образца различными способами. Исследование возникающих при этом методических погрешностей до сих пор остается одной из актуальных проблем, определяющих надежность получаемых экспериментальных результатов. При этом, по мнению авторов настоящей статьи, наименее изученной является область исследования погрешностей измерения температуры в конструкциях, выполненных из материалов с низкой теплопроводностью.

**Установка термомпары с помощью пробок.** Монтаж термомпар с помощью пробок является одним из широко применяемых в практике тепловых испытаний способом их установки в объект испытания (ОИ). Его суть состоит в том, что в основном материале вырезают цилиндрическое отверстие нужной глубины и в него плотно вставляют пробку из того же материала с предварительно установленной в ней термомпарой. Термомпару размещают в канавках, сделанных на верхней торцевой и боковых поверхностях пробки (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема установки термопар в образце с помощью пробок ( $i$  — номер термопары)

Технологические операции, сопровождающие рассматриваемый способ установки датчика, не должны вызывать заметного изменения таких свойств материала в зоне контакта с пробкой, как структура, прочность, анизотропия свойств и ряд других. К сожалению, при установке пробки с вставленной в ее пазы слишком тонкой термопарой (это бывает необходимо для снижения погрешности измерений, связанной с теплооттоком по термоэлектродам) велика опасность ее разрыва.

По количеству и природе факторов, определяющих методическую погрешность измерения температуры, данный способ монтажа термопары близок к хорошо изученному варианту ее размещения внутри материала с идеальным тепловым контактом без вспомогательного фиксирующего вещества [1–3]. В связи с этим представляет интерес исследование влияния на методическую погрешность возможности образования воздушного зазора между верхним торцом пробки и материалом ОИ или наличия там слоя клея определенной толщины [4]. К сожалению, ограниченный объем настоящей статьи не позволяет привести все результаты.

Объектом исследования служил плоский диск диаметром 60 мм и толщиной 20 мм из изотропного теплоизоляционного материала с плотностью  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ , теплоемкостью  $c = 1100 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  и теплопроводностью  $\lambda = 0,2 \dots 0,33 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

В качестве термопар использовали пары вольфрам/рений, хромель/алюмель и хромель/копель с длиной плеча в пробке 0,015 м, сваренные встык (без королька). Термопары располагали в пропилах глубиной 0,2...0,4 мм, выполненных на торцевой и боковой поверхностях пробки. Глубину установки пробок в диск варьировали от 2 до 19,9 мм (см. рис. 1). Верхняя поверхность диска нагревалась конвективным потоком и охлаждалась путем собственного излучения и естественной конвекции.

В базовом варианте расчета анализировали влияние на температурное поле ОИ только самой термопары, центр спая которой располагался на расстоянии 2 мм от нагреваемой поверхности. Контакт между термопарой и основным материалом принимали идеальным.

На рис. 2 показана схема расположения контрольных точек, используемых для расчета методической погрешности.

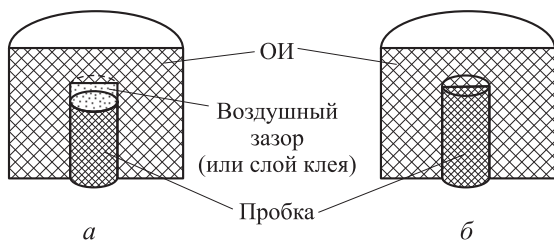
Наличие термопары внутри ОИ очень слабо влияет на его температурное поле. Значение относительной методической погрешности, связанной с влиянием на нее термопары,

$$\bar{\Delta}_{3,2} = \frac{T_3 - T_2}{T_2} \cdot 100\%$$

находится в интервале  $-0,13...+0,7\%$ , что существенно меньше погрешности метода расчета. Это дает основание при использовании в пробках термопар с достаточно тонкими электродами исключить их из модели расчета методической погрешности и оценивать температурное поле ОИ не по двум температурам  $T_2$  и  $T_3$ , а только по температуре  $T_3$ , т. е. когда отсутствует влияние датчика температуры. Важно отметить, что это допустимо только при наличии идеального контакта термопары с материалом ОИ и пробки.

Образование между торцом пробки и материалом ОИ воздушного зазора или слоя клея — еще одна из причин возникновения методической погрешности. При этом, если разрыв термоэлектрода в процессе установки пробки в ОИ сравнительно легко проконтролировать, обнаружить зазор между спаем термопары и основным материалом очень сложно, особенно при проведении испытаний с использованием большого числа термопар.

Геометрическая модель системы датчик—ОИ, использованная при оценке погрешности определения температуры при установке термопары с помощью пробки, показана на рис. 3.



**Рис. 3.** Модели, учитывающие наличие зазора в месте установки термопары:

- a* — с воздушным зазором или слоем клея;
- б* — идеальная установка термопары (без зазора)

По вычисленным значениям температур  $T_1, T_2, T_3$  в контрольных точках (температура  $T_1$  соответствует температуре на поверхности ОИ, где влияние любых особенностей области установки термопары уже не проявляется) найдены погрешности определения температуры  $T_3$  по показаниям термопары (температура  $T_2$ ):

$$\Delta_{3,2}(t) = T_3(t) - T_2(t),$$

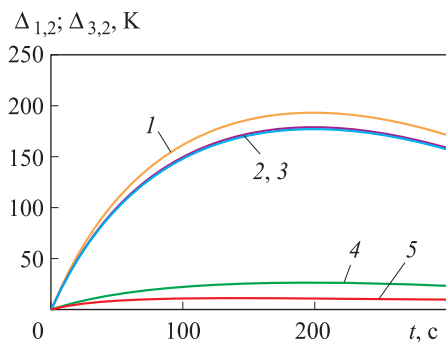
и температуры внешней поверхности ОИ по показаниям заглубленной термопары:

$$\Delta_{1,2}(t) = T_1(t) - T_2(t).$$

Свойства материалов и воздуха, использованные в расчетах, приведены ниже:

	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , Дж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Клей.....	5,00	1 000	2 440
Воздух.....	0,02	1 005	1,205
Основной материал.....	0,20...0,33	1 100	800

а результаты расчета — на рис. 4.

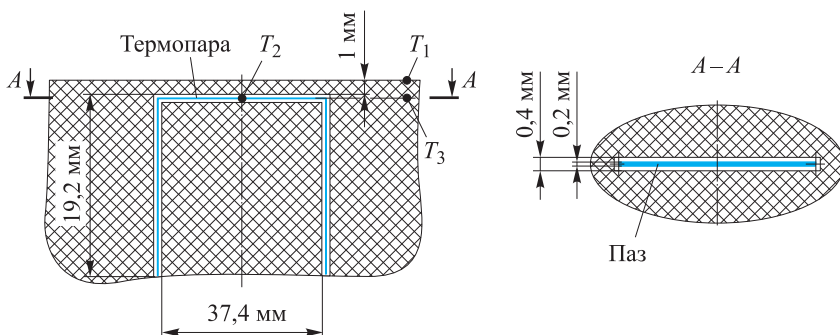


**Рис. 4.** Зависимость погрешности определения температуры от времени нагрева ОИ при установке термопары с помощью пробки:

$\Delta_{1,2}$  при наличии воздушного зазора (1), слоя клея (2) и без зазора (3);  $\Delta_{3,2}$  при наличии воздушного зазора (4) и слоя клея (5)

Установлено, что наличие воздушного зазора между пробкой с термопарой и основным материалом толщиной 0,1...0,4 мм при установке термопары на глубине 2 мм от нагреваемой поверхности снижает точность определения температуры поверхности ОИ 1...8 %.

**Установка термопары в разрезном ОИ.** В ряде случаев, например в экспериментах по исследованию теплофизических свойств материалов, термопару устанавливают следующим способом: образец материала (цилиндр диаметром 45 мм) разрезают вдоль по образующим, на одной из получившихся половинок выполняют П-образный паз, в который укладывают термопару; половинки образца материала с термопарой склеивают высокотемпературным клеем (рис. 5).



**Рис. 5.** Схема расположения термопары в основном материале с указанием контрольных точек

При построении модели принят ряд допущений:

клей полностью заполняет паз, где установлена термопара;

продольная ось термодатчика совпадает с продольной осью симметрии паза;

геометрическая модель представляет собой 1/4 часть реального ОИ (возможность такого упрощения обусловлена симметрией образца и тем, что отличия свойств материалов двух термоэлектродов незначительно влияют на методическую погрешность);

нагрев поверхности в течение 300 с осуществляется конвективным потоком ( $\alpha = 230 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $T_{\text{ср}} = 293 \dots 1\ 870 \text{ К}$ );

в расчете учитывается собственное излучение материала ОИ ( $\varepsilon = 0,8$ ).

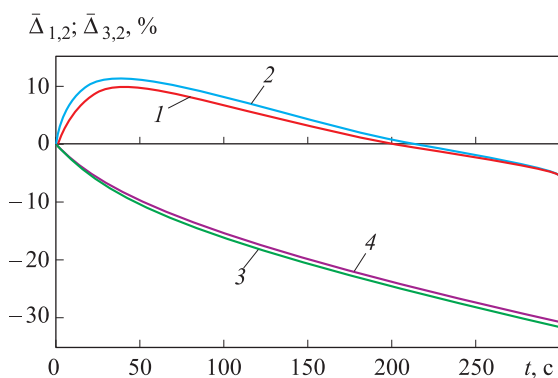
Зависимость  $T(t)$  с достаточной степенью точности описывается линейной функцией. За расчетное время температура в контрольных точках при наличии клея в пазу возрастает с 293 до 1 170 К.

Аналогично способу установки термопар с помощью пробки в рассматриваемом варианте заделки возможно возникновение воздушного зазора в пазу при монтаже. Для оценки вклада слоя воздуха в случае, когда клей не полностью заполняет паз, рассмотрена модель, аналогичная предыдущей, только в качестве материала, заполняющего паз, взят воздух. Теплопроводность воздуха значительно ниже, чем клея, поэтому и температура в стыке термоэлектродов оказывается заниженной. Следует отметить, что толщина воздушного зазора в данном случае принята равной 0,1 мм, при этом разница температур в стыке термоэлектродов при наличии клея и воздушного зазора через 300 с составила 7 К или 0,6 %.

Методическую погрешность, вызванную наличием инородных тел (термопары и клея или воздуха), определяли как разность температур  $T_2$  (в стыке термоэлектродов) и  $T_3$  (на той же глубине, на которой установлен термодатчик):  $\Delta_{32} = T_3 - T_2$ . Зависимость методической погрешности  $\Delta_{32}$  от времени для разных материалов, заполняющих паз

(клей или воздух), линейна с достаточной степенью точности и за 300 с снижается от 0 до  $-280$  К. Тот факт, что в интервале  $0 \dots 300$  с значение погрешности увеличилось по модулю, очень важен для проведения тепловых испытаний в целях определения теплофизических свойств материалов, так как для них характерны малые темпы нагрева и длительные интервалы проведения эксперимента.

На рис. 6 показан сводный график значений относительной погрешности  $\bar{\Delta}_{1,2} = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} \cdot 100\%$  и  $\bar{\Delta}_{3,2} = \frac{(T_3 - T_2)}{T_3} \cdot 100\%$  для случаев заполнения паза клеем и воздухом. Обращает на себя внимание факт смены знака погрешности, что может затруднить ее учет при проведении исследований. Сопоставление значений  $\Delta_{3,2}$  на рис. 6 и 4 позволяет сделать вывод, что способ, требующий распиливания материала для установки термопар в паз одной из половинок, дает большие погрешности влияния инородного тела по сравнению с заделкой посредством пробок. Можно утверждать, что именно благодаря такому соотношению значений методической погрешности  $\Delta_{3,2}$ , при проведении испытаний для определения теплофизических характеристик материала способ установки термопары с помощью пробок имеет преимущество перед способом заделки в П-образный паз.



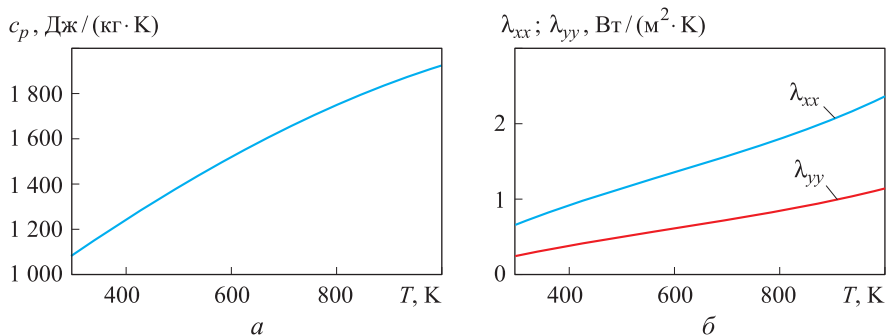
**Рис. 6.** Относительная погрешность  $\Delta_{1,2}$  для разных материалов, заполняющих паз (1 — клей, 2 — воздух), и  $\Delta_{3,2}$  для клея (3) и воздуха (4)

В случае использования пробок при толщине воздушного зазора, равной  $0,1$  мм, относительная погрешность  $\bar{\Delta}_{1,2}$  составила  $1\%$ , тогда как при использовании способа заделки в П-образный паз она достигала  $30\%$  (см. рис. 6). Этот результат необходимо учитывать при проведении испытаний элементов конструкций, когда температуру поверхности  $T_1$  определяют по показаниям заглубленной термопары.

**Установка термопары в паз.** Измерение температуры с помощью устанавливаемой в паз термопары — распространенный способ исследования температурного поля конструкций из композиционных материалов. Детальный анализ погрешностей, возникающих при

этом способе заделки термопар, представлен в работе [5]. Поэтому отметим лишь не опубликованные ранее сведения о влиянии на погрешность анизотропии свойств материала.

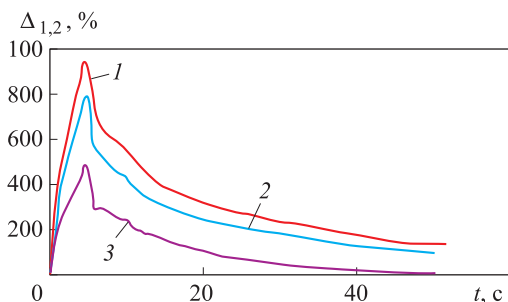
Ряд материалов, используемых в конструкциях летательных аппаратов, обладает анизотропными свойствами. В качестве примера на рис. 7 приведены зависимости теплоемкости и теплопроводности в ортогональных направлениях конструкционного углепластика с фенольным связующим от температуры.



**Рис. 7.** Зависимости теплоемкости (а) и теплопроводности (б) углепластика от температуры

Результаты исследования влияния анизотропии свойств материала на методическую погрешность измерения температуры изложены в работе [4]. Объектом исследования служил образец из указанного материала в форме параллелепипеда с пазом  $0,6 \times 0,6 \times 18$  мм для установки термопары. Внутри паза размещали хромель-алюмелевую термопару с диаметром электродов 0,2 мм и диаметром спая 0,6 мм. Паз заполняли шпаклевкой на основе высокотемпературного клея. Плотность материала ОИ принимали постоянной и равной  $1\,200$  кг/м<sup>3</sup>. Верхнюю поверхность ОИ нагревали излучением, остальные поверхности были теплоизолированы.

Влияние свойства анизотропии материала на методическую погрешность определения температуры  $T_1$  нагреваемой поверхности по показаниям  $T_2$  заглубленной термопары оценивали сопоставлением значения величины  $\Delta_{1,2}(t) = T_1(t) - T_2(t)$  в анизотропном материале с аналогичной разностью в двух изотропных материалах с постоянными теплофизическими свойствами, но различными значениями теплопроводности. У одного из этих материалов теплопроводность соответствовала нижнему значению теплопроводности анизотропного материала и составляла  $0,3$  Вт/(м·К), у другого — верхнему его значению  $1,2$  Вт/(м·К). Расчет температурных полей выполняли для системы датчик—ОИ, влияние на погрешность материала крепления термопары в пазу не учитывали. Результаты расчета приведены на рис. 8.



**Рис. 8.** Результаты расчета погрешности  $\Delta_{1,2}$  для изотропных материалов с  $\lambda = 0,3$  (1) и  $1,2$  Вт/(м·К) (3) и анизотропного углепластика (2)

Видно, что погрешность определения температуры поверхности ОИ из анизотропного материала по показаниям заглубленной термопары располагается внутри области, границы которой соответствуют значениям погрешностей, возникающих в ОИ из рассмотренных изотропных материалов. Выполненное исследование показало, что последовательное использование таких мер, как уменьшение глубины установки термопары, диаметра спая термоэлектродов и их диаметров, позволяет значительно снизить погрешность определения температуры поверхности по показаниям заглубленного датчика.

Рассмотренные особенности измерения температуры с помощью контактных датчиков охватывают лишь малую часть тех проблем, которые возникают в процессе подготовки и проведения теплофизического эксперимента, посвященного изучению свойств низкотеплопроводных материалов или теплового режима конструкций. Серьезные трудности связаны, в частности, с измерением температуры внутри материалов ячеистой структуры, у которых размеры ячейки сопоставимы или даже превышают размеры чувствительного элемента контактного датчика. Аналогичные проблемы имеют место при измерении температуры внутри многослойной гибкой тепловой защиты, в процессе нагревания которой промежутки между слоями с неидеальным тепловым контактом могут заполняться продуктами разрушения материала. В этих и ряде других случаев определение методической погрешности измерения температуры нуждается в детальном изучении сложных процессов тепло- и массопереноса в системе датчик—ОИ и разработке соответствующих физических и математических моделей ее расчета. Актуальной, имеющей большое практическое значение, является также задача получения достоверной информации о температурном состоянии ОИ в реальном времени эксперимента. Ее решение в значительной мере упрощает процесс управления нагревом.



## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Елисеев В.Н., Воротников В.И., Товстоног В.А., Соловов В.А. Оценка погрешности измерения поверхностной температуры полупрозрачного материала контактным датчиком. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1981, № 11, с. 77–81.
- [2] Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Mikhalev A.M., Kalinin D.Yu. Identification of Radiative and Conductive Heat Transfer Parameters at Presence of Errors in Initial Data. *Inverse Problems and Experimental Design in Thermal and Mechanical Engineering: Proc. Eurotherm Seminar 68*. Poitiers, 2001, pp. 293–300.
- [3] Михалев А.М., Резник С.В. Определение методической погрешности термомпарных измерений в частично прозрачных рассеивающих материалах при нестационарном нагреве. *Известия вузов. Сер. Машиностроение*, 1988, № 2, с. 63–67.
- [4] Боровкова Т.В. *Методика определения погрешности измерения температуры с помощью термомпар в элементах конструкций из неметаллических функционально неразрушаемых материалов*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2008, 178 с.
- [5] Боровкова Т.В., Елисеев В.Н., Лопухов И.И. Повышение точности измерения температуры при испытаниях на стенде радиационного нагрева элементов конструкций из низкотеплопроводных материалов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2006, № 3, с. 51–63.

Статья поступила в редакцию 06.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Боровкова Т.В., Товстоног В.А., Елисеев В.Н. Оценка точности измерения температуры термомпарами при различных способах их размещения в объекте испытаний. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/850.html>

**Боровкова Татьяна Владимировна** окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 11 научных работ в области теплообмена в конструкциях летательных аппаратов. e-mail: [tatjana@mail.ru](mailto:tatjana@mail.ru)

**Товстоног Валерий Алексеевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1971 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 140 научных работ в области исследования процессов теплопереноса в материалах специального назначения, тепловых и теплопрочностных испытаний материалов и конструкций при комплексных воздействиях. e-mail: [tovstonv@mail.ru](mailto:tovstonv@mail.ru)

**Елисеев Виктор Николаевич** окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1954 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области теплообмена в конструкциях летательных аппаратов. e-mail: [v.n.eliseev@gmail.com](mailto:v.n.eliseev@gmail.com)