

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ*

В.А. Вертоградский

Российский государственный геологоразведочный университет, г. Москва

Представлена членом редколлегии профессором С.В. Пономаревым

Ключевые слова и фразы: конструкционные материалы; температуропроводность; теплоемкость; теплоизоляционные материалы; теплопроводность.

Аннотация: Представлено описание методов, предназначенных для исследований тепловых свойств конструкционных и теплоизоляционных материалов. Методы были реализованы и использованы, главным образом, при разработке новых авиационных материалов. Большая часть методов реализована не только в единичном авторском исполнении, но и использована другими исследователями для измерений теплофизических характеристик более широкого круга материалов.

Требования к методам исследований тепловых свойств материалов

При выборе или разработке метода исследования тепловых свойств материалов необходимо учитывать не только возможность его технической реализации и возможность реализации максимального соответствия теоретическим предпосылкам метода. Необходимо принимать во внимание также соображения материало-ведческого плана.

Материаловедение как наука о свойствах материалов базируется на знаменитой триаде академика Н.С. Курнакова: «состав – структура – свойство». Зависимость тепловых свойств материала от состава для большинства теплофизиков представляется очевидной; однако, роль структурного фактора зачастую недооценивается. Фактически необходимо учитывать, что свойства материала конкретного состава зависят от технологии его получения. Так, свойства металла или сплава, полученного методом литья, отличаются от свойств того же материала, полученного методом порошковой металлургии; свойства сплава в гомогенизированном состоянии отличаются от его свойств после закалок с различных температур и т.д.

Термическая нестабильность, то есть изменение свойств материала в результате температурного воздействия, по существу – общее свойство всех материалов. Так, даже чистые металлы при длительных выдержках при разных температурах достигают различных уровней рекристаллизации, и это отражается на значениях теплофизических характеристик.

* Избранные доклады Международной теплофизической школы МТФШ–6, Тамбов, ТГТУ, 2007 г.

Таким образом, методы исследований должны использовать образцы материалов в их стандартных, технологически определенных состояниях. Например, не оптимально требование измельчать монолитный материал для его исследований методом дифференциального термического анализа, что зачастую является непременным условием использования метода, или требование изготавливать для исследований пластину из материала, который используется в промышленности в виде проволоки, и наоборот.

Нетермостабильность материалов диктует ограничение на применение теплофизических методов, которые требуют двукратного нагрева образца в интервале температур измерений.

Указанные ограничения методов исследований приняты во внимание при разработке автором методов измерений тепловых свойств материалов.

Метод измерения теплопроводности проволочных образцов

Метод предназначен для измерений теплопроводности электропроводных материалов (в основном, металлов и их сплавов) с монотонной зависимостью удельного электрического сопротивления от температуры; сама эта зависимость в расчетной формуле не используется [1–3].

Образец разогревается в вакууме прямым пропусканием электрического тока. Соотношение длины образца и площади его поперечного сечения выбирается так, чтобы получить в центральной части образца изотермическую зону. За счет локального температурного возмущения образца вдоль него формируется экспоненциальное распределение температур. Несколько последовательных уровней этого возмущения эквивалентно перемещению неизменного экспоненциального распределения вдоль образца. Параметры экспоненциального распределения регистрируются через изменение электрических сопротивлений участков образца, включенных в две частично совмещенные мостовые схемы. Таким образом, непосредственная регистрация распределения температур вдоль образца исключается.

Формула для вычисления теплопроводности имеет вид

$$\lambda(T_m) = 4A^2 (U_0 / \ln \eta) (1 + \delta) / [T_m \rho_{293} (R_T / R_{293})],$$

где λ – теплопроводность; T_m – температура изотермического участка образца – температура отнесения; A – отношение длин участков образцов, $A = \Delta L / L_0$, ΔL – разность длин участков образца, которые частично охвачены экспоненциальным распределением температур, L_0 – длина центрального изотермического участка, это отношение измеряется экспериментально в изотермических условиях как отношение электрических сопротивлений соответствующих участков образца; U_0 – падение напряжения на изотермическом участке длиной L_0 ; ρ_{293} – удельное электрическое сопротивление образца при температуре 293 К; R_T / R_{293} – отношение удельных сопротивлений образца произвольной длины при температурах T_m и 293 К соответственно; η – величина, вычисляемая на основании измерений нескольких пар сопротивлений уравновешенных мостовых схем r_1 и r_2 , где каждая пара соответствует конкретному значению температуры репитера и, следовательно, конкретному положению экспоненциального распределения температур вдоль образца; значения сопротивлений r_{1i} и r_{2i} прямо пропорциональны значениям сопротивлений участков образца, охваченных экспоненциальным распределением температур, значение η рассчитывается как

$$\eta = dr_{1i} / dr_{2i};$$

δ – корректирующее слагаемое, учитывающее температурные зависимости удельного электрического сопротивления образца и интегральной полусферической

излучательной способности поверхности образца – в диапазоне температур, в котором находятся рабочие участки образца,

$$\delta = 0,5 \left[d \ln(I/T_m^2) / d \ln T_m \right],$$

где I – сила тока, протекающего через образец, которой соответствует температура T_m .

Метод использован во Всероссийском институте авиационных материалов (ВИАМ) и в Грузинском политехническом институте (г. Тбилиси). Температурный интервал реализации составляет 1200...3000 К.

Метод измерения тепло- и электропроводности на стержневых образцах

Метод предназначен для исследований характеристик на образцах круглого или прямоугольного сечения с соотношением длины к диаметру 8...10; например, это могут быть цилиндры длиной 40 мм и диаметром 5 мм [4–7].

Используется сборка из двух состыкованных торцами образцов. Между торцами зажимается тонкий диск с высоким электрическим сопротивлением; при пропускании тока вдоль сборки этот диск является источником тепловыделения. Таким образом, принципиально исключаются тепловые потери по подводящим проводам к центральному нагревателю. Для расчета теплопроводности используются результаты измерений перепадов температур между образцом и его термостатирующей оболочкой в трех точках по длине образца.

Расчетная формула имеет вид

$$\lambda = qL [1 - (\varphi - 1)/3] / (t_1\varphi - t_2),$$

где q – удельный тепловой поток в торец образца; 1, 2, 3 – индексы трех термопар, последовательно расположенных вдоль образца в направлении от его «горячего» торца к «холодному»; L – расстояния между 1-й и 2-й и между 2-й и 3-й термопарами;

$$\varphi = (t_1 + t_3) / 2t_2,$$

где t_1, t_2, t_3 – температуры трех точек образца, избыточные по отношению к температуре изотермической оболочки вокруг образцов;

$$q = 0,5IU/S,$$

где I – ток, пропускаемый вдоль сборки образцов; U – падение напряжения на дисковом нагревателе; S – площадь поперечного сечения образца.

Метод реализован в ВИАМе, в Азербайджанском политехническом институте (г. Баку) и в Китайском институте авиационных материалов (г. Пекин). Температурный интервал реализации составляет 295...1000 К.

Комплексные методы измерения теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности листовых металлических материалов

Это методы плоского бикалориметра при регулярном режиме 2-го рода. Предложено три варианта комбинации металлической пластины, зажатой в центре пакета из исследуемых образцов [8–12]. В эксперименте поддерживается равенство температур внешних поверхностей образцов и нарастание этих температур с постоянной скоростью.

Достоинство методов бикалориметра – исключение необходимости задавать и регистрировать симметричные тепловые потоки, подводимые к образцам.

В методе *двухслойного бикалориметра* (1-й метод) металлическое ядро зажато с двух сторон двумя образцами исследуемого материала равной толщины. Регистрируются температуры внешних поверхностей образцов, температуры между образцами, температура ядра, точнее, перепады этих температур в зависимости от времени.

В методе *двух бикалориметров* (2-й метод) два металлических ядра разной толщины зажаты между парами образцов одной толщины. В динамическом режиме обеспечивается равенство температур четырех внешних поверхностейборок.

В методе *однослойного бикалориметра* (3-й метод) используется одна сборка предыдущего метода; на применение метода накладывается ограничение: суммарной теплоемкостью образцов можно пренебречь по сравнению с теплоемкостью металлического ядра.

Расчетные формулы методов:

– двухслойного бикалориметра:

$$\lambda = 0,5A_1h / (4\Delta_2 - \Delta_1),$$

$$c = 2A_1(\Delta_1 - 2\Delta_2) / (4\Delta_2 - \Delta_1),$$

$$a = 0,25h^2 / (\Delta_1 - 2\Delta_2);$$

– двух калориметров:

$$\lambda = 0,5(A_2 - A_3)h / (4\Delta_3 - \Delta_4),$$

$$c = 0,5A_2(2\Delta_4 - \Delta_3) / h(\Delta_3 - \Delta_4),$$

$$a = 0,5h^2 / 2(\Delta_4 - \Delta_3);$$

– однослойного калориметра:

$$\lambda = 0,5A_4 / \Delta_5,$$

где λ – теплопроводность исследуемого материала; c – объемная теплоемкость исследуемого материала, Дж/(м³·К); a – температуропроводность исследуемого материала; A_1, A_2, A_3, A_4 – константы измерительных устройств – произведения объемных теплоемкостей материалов калориметров на их толщины ($A_2 > A_3, A_2/A_3 > 1$); $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ – времена «запаздывания» достижения фиксированной температуры в двух точках на поверхностях образцов: Δ_1 – между поверхностями двухслойного пакета образцов, Δ_2 – между поверхностями образца, прилегающего к калориметру, Δ_3 – между поверхностями образцов в первом пакете, Δ_4 – то же во втором пакете, Δ_5 – между поверхностями образцов в 3-м методе.

Метод использовался в ВИАМе при паспортизации новых материалов и в Уфимском авиационном институте. Температурный интервал реализации составляет 295...600 К.

Релаксационный, релаксационно-динамический и несимметричный релаксационно-динамический методы измерения удельной теплоемкости

Методы предназначены для массовых измерений теплоемкости, в основном, металлических материалов.

В релаксационном методе регистрируется переходная температурная кривая образца между двумя его стационарными состояниями. Переходный процесс возникает вследствие скачка вводимой в образец мощности.

Релаксационно-динамический метод является относительным. Используются исследуемый образец и образец сравнения, идентичные по форме, с одинаковыми излучательными характеристиками поверхностей. Температура общего для образцов источника косвенного нагрева (например, системы инфракрасных ламп галоидного цикла) меняется ступенчато с последующей изотермической выдержкой. Направление и величина этих ступеней выбирается так, чтобы последовательно достигались состояния равенства температур образцов. В эти моменты тепловые потоки, подводимые к образцам, равны, и отношение теплоемкостей образцов определяется только отношением скоростей изменения температуры.

В случае несимметричного релаксационно-динамического метода источник косвенного нагрева обеспечивает монотонное повышение температур исследуемого образца и образца сравнения. На образец с большей теплоемкостью задаются периодические дополнительные тепловые воздействия, обеспечивающие достижение им большей температуры по сравнению со вторым образцом. После прекращения дополнительных тепловых воздействий температурный ход этого образца является результатом суперпозиции линейного нагревания и релаксационных режимов охлаждения. Так обеспечивается появление состояний равенства температур образцов, при которых отношение их теплоемкостей определяется отношением скоростей изменений температур.

Методы реализованы в ВИАМе при температурах 293...1400 К.

Список литературы

1. Вертоградский, В.А. Метод измерения теплопроводности металлов при высоких температурах / В.А. Вертоградский // Теплофизические свойства твердых веществ / под ред. И.И. Новикова. – М., 1971. – С. 38–41.

2. Вертоградский, В.А. Измерение теплопроводности вольфрама при высоких температурах методом «двух мостов» / В.А. Вертоградский, В.Я. Чеховской // Теплофизика высоких температур. – 1970. – Т. 8, № 4. – С. 784–787.

3. Вертоградский, В.А. Тепло- и электропроводность тантала при высоких температурах / В.А. Вертоградский // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Т. 10, № 1. – С. 77–81.

4. А. с. 673901 СССР, МКИ² G 01 N 25/18. Способ измерения коэффициента теплопроводности / В.А. Вертоградский (СССР). – № 2370526/18–25 ; заявл. 10.06.79 ; опубл. 15.07.79, Бюл. № 26. – 1 с. : ил.

5. Вертоградский, В.А. Продольная теплопроводность стержня при наличии боковых потерь тепла / В.А. Вертоградский, Р.А. Мустафаев, К.И. Абдуллаев // Пром. теплотехника. – 1980. – Т. 2, № 5. – С. 94–97.

6. А. с. 847167 СССР, МКИ³ G 01 N 25/18. Переменное тепловое сопротивление / К.И. Адуллаев, Р.А. Мустафаев, В.А. Вертоградский (СССР). – № 2826901/18–10 ; заявл. 11.10.79 ; опубл. 15.07.81, Бюл. № 26. – 1 с. : ил.

7. Абдуллаев, К.И. Экспериментальная установка для комплексного исследования тепло- и электропроводности металлов и сплавов / К.И. Абдуллаев, Р.А. Мустафаев, В.А. Вертоградский // Завод. лаб. – 1980. – Т. 46, № 9. – С. 893–840.

8. А. с. 275468 СССР, МКИ³ G 01n 25/20. Способ определения теплофизических характеристик листовых неметаллических материалов / В.А.Вертоградский, В.А. Кириллов, В.А. Ефимов // № 1194298/18–10 ; заявл. 25.10.67 ; опубл. 03.07.70, Бюл. № 22. – 1 с. : ил.

9. Вертоградский, В.А. Метод и установка для комплексного определения теплофизических свойств листовых неметаллических материалов / В.А. Вертоградский, В.Н. Кириллов, В.А. Ефимов // Инженер.-физ. журн. – 1969. – Т. 16, № 3. – С. 516–520.

10. Вертоградский, В.А. Определение теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционных материалов / В.А. Вертоградский // Теплофизические свойства твердых тел при высоких температурах / под ред. И.И. Новикова, А.Н. Гордова. – М., 1969. – Т. 1. – С. 243–254.

11. Вертоградский, В.А. Прибор для определения теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности теплоизоляционных материалов / В.А. Вертоградский, В.А. Ефимов, В.Н. Кириллов // Авиац. пром-сть. – 1969. – № 9. – С. 66–68.

12. Сендерович, Р.Б. Выбор и опробывание математической модели тепловых испытаний листовых теплоизоляционных материалов / Р.Б. Сендерович, В.А. Вертоградский // Конструкции и получение изделий из неметаллических материалов : тез. докл. IX Всесоюз. конф. – Обнинск, 1984. – Ч. 3. – С. 94–95.

Effective Methods of Research into Thermo-Physical Properties of Materials

V.A. Vertogradsky

Russian State Geology-Prospecting University, Moscow

Key words and phrases: construction materials; heat capacity; heat conductivity; heat insulating materials; thermal diffusivity.

Abstract: The paper presents the description of the methods intended for the research into thermal properties of construction and heat-insulating materials. The methods are applied mainly for the development of new aviation materials. The majority of the methods is implemented not only by their creators but other researchers for measuring thermo-physical characteristics of a wider range of materials.

Wirksamen Methoden der Forschungen der wärme-physikalischen Eigenschaften der Stoffe

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung der Methoden, die für die Forschungen der thermischen Eigenschaften der Konstruktions- und Wärmeisolationstoffe vorbestimmt sind, dargestellt. Die Methoden waren hauptsächlich bei der Erarbeitung der neuen Flugstoffe verwendet. Der grosse Teil der Methoden wurde nicht nur in der einzelnen Autorenerfüllung verwirklicht, sondern wurde auch von anderen Forschern für die Messungen der wärme-physikalischen Charakteristiken des breiteren Kreises der Stoffe verwendet.

Méthodes efficaces de l'étude des propriétés thermophysiques des matériaux

Résumé: Est présentée la description des méthodes destinées aux études des propriétés thermophysiques des matériaux de construction et de thermoisolement. Les méthodes ont été réalisées et utilisées principalement lors de l'élaboration de nouveaux matériaux d'aviation. La plupart des méthodes est réalisée non seulement dans l'exécution unitaire d'auteur, mais elle est aussi employée par d'autres chercheurs pour la mesure des caractéristiques thermophysiques d'une série plus large des matériaux.