АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Том 6 1968 № 5

УДК 536.522.3

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КРАСОК

Б. Г. Абрамович, Л. Н. Новиченок

Исследованы теплофизические характеристики набора из 30 термочувствительных красок методом нестационарного теплового режима. Определена плотность пленок каждой термокраски. Показано, что термочувствительные краски имеют более высокие коэффициенты тепло- и температуропроводности, чем обычные лакокрасочные покрытия и теплоизоляционные материалы. Термочувствительные краски могут с успехом применяться для технических и научных измерений температур.

Термочувствительные краски находят широкое применение при измерениях температуры [1—4]. Для того чтобы оценить тепловую инерционность и термическое сопротивление этих индикаторов температуры, авторами были определены теплофизические свойства набора термочувствительных красок.

Основными величинами, характеризующими теплофизические свойства материала, являются коэффициенты теплопроводности λ и температуропроводности a, а также удельная теплоемкость c.

Существующие методы определения теплофизических характеристик материалов, как правило, сложны и позволяют испытывать образцы сравнительно больших размеров и толщин.

Что касается пленочных материалов, то в настоящее время разработано еще очень мало методов, позволяющих комплексно исследовать их теплофизические свойства. Следует отметить, что толщина нанесенных на поверхность термокрасок составляет $(0{,}05—0{,}1)\cdot 10^{-3}$ *м*.

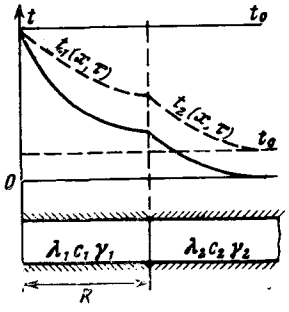

Рис. 1. Система двух тел — ограниченный и полуограниченный стержни

При исследовании теплофизических свойств набора термочувствительных красок был применен метод [5, 6], основанный на решении задачи теплопроводности для системы тел, состоящей из ограниченного и полуограниченного стержней с граничными условиями первого и четвертого рядов [7] (см. рис. 1).

В плоскости раздела этих стержней, т. е. при $x = R$, относительная температура выражается функциональной зависимостью

$$\theta = \frac{t(x,\tau)}{t_c} = \frac{2k_\varepsilon}{1+k_\varepsilon}\sum_{n=1}^{\infty} h^{n-1}\,\mathrm{erfc}\,\frac{(2n-1)R}{2\sqrt{a,\tau}}\left(k_\varepsilon = \frac{b_1}{b_2} \quad h = \frac{b_2-b_1}{b_1+b_2}\right) \tag{1}$$

Здесь $b = \lambda/\sqrt{a}$ — тепловая активность ограниченного (b_1) и полуограниченного (b_2) стержней.

Из выражения (1) видно, что относительная температура зависит от теплофизических характеристик материалов стержней, времени действия изотермического источника на свободную поверхность системы и толщины ограниченного стержня.

Анализ решения (1) показывает, что если толщина ограниченного стержня мала ($R < 1$ *мм*), а тепловые активности материалов системы близки по своим значениям, то для начальной стадии развития теплового процесса можно (с погрешностью менее 1%) производить расчет температуры θ по первому члену ряда (1).

Таким образом, если в качестве ограниченного стержня взять исследуемое покрытие, то его теплофизические характеристики

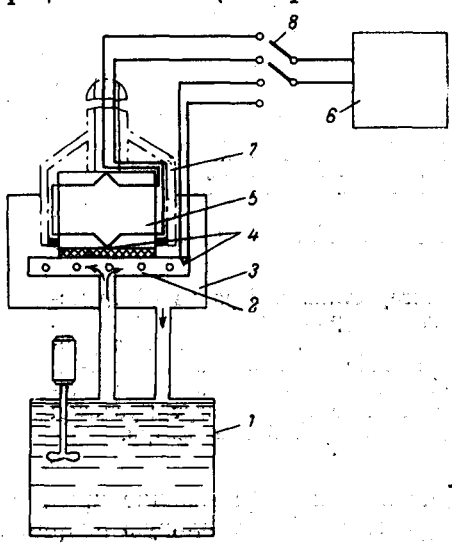

Рис. 2. Принципиальная схема установки:

1 — термостат, *2* — подставка, *3* — сосуд, *4* — термопары, *5* — образец, *6* — самопишущий потенциометр, *7* — держатель, *8* — переключатель термопар

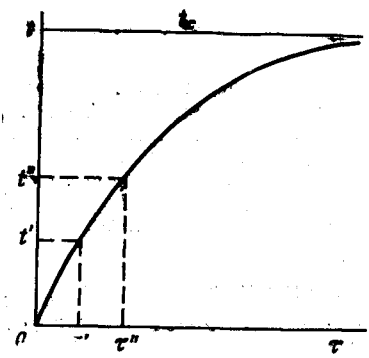

Рис. 3. К расчету относительной температуры из кривой разогрева образца

можно рассчитать по данным одного непродолжительного опыта по следующим формулам:

для коэффициента теплопроводности

$$\lambda = bR/2Ak\sqrt{\tau}; \qquad (2)$$

для коэффициента температуропроводности

$$a = R^2/4k^2\tau; \qquad (3)$$

для удельной теплоемкости

$$c = 2bk\sqrt{\tau}/AR\gamma. \qquad (4)$$

Здесь R — толщина слоя термокраски; τ — кратное время; b — тепловая активность материала подложки (равная в нашем случае 585 *вт·сек*$^{1/2}$*м*^{2}*град*); γ — плотность термокраски; $A = (2/\theta)\,\mathrm{erfck} - 1$; $k = f(\theta''/\theta')$ определяется из заранее составленных расчетных таблиц [7].

Реализация описанного метода очень проста.

Испытуемая термокраска равномерно наносилась на полированную торцевую поверхность цилиндра из полиметилметакрилата, тепловая активность которого известна. На этой поверхности предварительно была за-

чеканена дифференциальная термопара (второй горячий спай зачеканивался на противоположном торце), причем рабочие спаи помещались по оси образца. В исследованиях использовались медь-константановые термопары с диаметром электродов 50 *мк*.

Такой образец помещался в специальный держатель, через ручку которого были выведены термопарные провода. Последние присоединялись через переключатель к автоматическому потенциометру типа ЭПП-09 со шкалой 1 *мкв* (см. рис. 2).

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем.

На поверхность с нанесенной термокраской в какой-то начальный момент времени $\tau = 0$ начинает непрерывно действовать изотермический источник (термостатированный поток жидкого теплоносителя) с температурой t_c, которая на 8—10° С выше начальной температуры системы t_0. С этого момента на быстродействующем потенциометре (время пробега каретки 2,5 *сек*) записывается рост температуры во времени в центральной точке поверхности раздела покрытие — подложка. До и после нагревания образца на потенциометре регистрируется температура омывающей жидкости t_c и начальная температура системы t_0, равная 20° С, которая принимается за начало отсчета.

Длительность эксперимента зависит от толщины слоя R испытуемой термокраски и обычно составляет 30—60 *сек*.

Обработка экспериментальных данных выполняется следующим образом. Из начального участка кривой разогрева (рис. 3) определяется отношение температур в два кратных промежутка времени, т. е.

$$t''(R, \tau'')/t'(R, \tau') = \theta''/\theta' = \beta \quad (\tau'' = n\tau'; \ n = 2, 3, 4, \ldots).$$

Таким образом, зная отношение β, по расчетным таблицам находятся величина k и функция erfc k. Величина $\theta' = t'(R, \tau')/t_c$ определяется также из опыта. Точность определения остальных величин зависит от примененных средств их измерения. В наших измерениях толщина покрытия определялась при помощи микрометра с точностью до 0,005 *мм*, а время τ' — при помощи секундомера с точностью 0,1 *сек*.

Так как в опытах применялись термопары из одинаковых термоэлектродов, а в расчетные формулы входит относительная температура, то отпадает необходимость в градуировке термопар.

Удельный вес пленок термокрасок определяется методом титрования раствора йодистого калия ($\gamma_{KJ} = 1500$ *кг/м*^{3}), в который помещалась пленка термокраски, водой [8, 9]. Метод основан на установлении зависимости между величиной удельного веса пленки и соотношением объемов титруемой и титрующей жидкостей в момент падения пленки на дно сосуда.

Расчет проводился по формуле

$$\gamma = \frac{\gamma_в V_в + \gamma_{KJ} V_{KJ}}{V_в + V_{KJ}},$$

где γ — удельный вес пленки; $\gamma_в$ — удельный вес воды, равный 1000 *кг/м*^{3}; $V_в$ — объем воды, израсходованной на титрование; V_{KJ} — объем раствора KJ ($V_{KJ} = 10$ *мл*).

Все результаты исследования представлены в виде таблицы.

Теплофизические характеристики термокрасок были определены с погрешностью порядка 15—18%, погрешность в определении плотности около 5%.

Как видно из таблицы, значения коэффициента теплопроводности лежат в пределах 0,19—0,995 *вт/м·град*, температуропроводности — (1,1—29)·10^{-7} *м*^{2}*/сек*, удельной теплоемкости — (0,22—1,45)·10^3 *дж/кг·град*.

Для сравнения приведем теплофизические характеристики:

а) лакокрасочных покрытий и смол (кремнеорганический лак К-55, эпоксидная смола Э-41 и т. д.):

$$\lambda = 0{,}11 - 0{,}17 \ вт/м \cdot град, \quad a = (0{,}43 - 0{,}87) \cdot 10^{-7} \ м^2/сек,$$

$$c = (1{,}4 - 1{,}8) \cdot 10^3 \ дж/кг \cdot град;$$

б) теплоизоляционных материалов (асбобакелит, асбоцементные плиты, асбозурит, пластмасса полихлорвиниловая и т. д.):

$$\lambda = 0{,}032 - 0{,}11 \ вт/м \cdot град, \quad a = (0{,}2 - 0{,}4) \cdot 10^{-7} \ м^2/сек,$$

$$c = (32 - 1{,}85) \cdot 10^3 \ дж/кг \cdot град;$$

в) нержавеющей стали 1Х18Н9Т:

$$\lambda = 9{,}5 - 12 \ вт/м \cdot град, \quad a = 55 \cdot 10^{-7} \ м^2/сек,$$

$$c = (0{,}22 - 0{,}28) \cdot 10^3 \ дж/кг \cdot град.$$

Из сравнения этих данных видно, что термочувствительные краски имеют более высокие коэффициенты тепло- и температуропроводности, чем

Теплофизические характеристики набора термочувствительных красок

№ термокрасок	$t_{кр}$(°С) при $\tau_п$=120 *сек*, $\tau_в$=30 *сек*	γ, *кг/м*³	λ, *вт/м·град*	*с*, *дж/кг·град*	$10^{-7}a$, *м²сек*
1*а*	45	1445	0,223	1,118	1,38
17	55	1468	0,221	1,10	1,37
31	70	1340	0,187	1,30	1,07
4*б*	74	1435	0,238	1,035	1,60
32	90	1395	0,211	1,065	1,42
50	110	1428	0,229	1,132	1,415
4	130	1415	0,216	1,35	1,13
30	130	1460	0,228	1,234	1,264
19	145	1455	0,278	0,90	2,135
5	150	1395	0,379	0,587	4,62
29	175	1385	0,829	0,299	19,94
6	190	1200	0,274	1,07	2,13
18	205	1390	0,428	0,585	5,28
230	220	1460	0,515	0,455	7,77
240	225	1450	0,463	0,480	6,65
8	240	1468	0,359	0,635	3,86
320	250	1407	0,309	0,754	2,91
35	280	1220	0,260	1,04	2,05
33	320	1378	0,240	1,235	1,41
23	350	1420	0,239	0,891	1,89
12	360	1445	0,843	0,280	20,6
230*	400	1455	0,515	0,455	7,77
470	440	1420	0,388	0,524	5,22
480	480	1445	0,305	0,838	2,518
490	490	1430	0,340	0,70	3,39
14	550	1455	0,995	0,229	29,0
52*а*	555	1450	0,171	0,814	1,545
30*	570	1460	0,228	1,234	1,264
7	690	1428	0,526	0,523	7,02
100	830	1373	0,214	1,450	1,07

у обычных лакокрасочных покрытий и термоизоляционных материалов, но ниже, чем у сталей. Исходя из этого, можно сделать следующие выводы по применению указанных красок для измерения температур поверхности различных материалов. Наименьшие искажения термочувствительные краски вносят в температурное поле деталей и объектов из изоляцион-

ных материалов, теплофизические характеристики которых близки по своим значениям к термочувствительным краскам. На объектах из металлических материалов следует учитывать тепловое сопротивление термочувствительного покрытия. Однако при малых толщинах покрытия (порядка нескольких микрон) величиной его теплового сопротивления можно пренебречь.

В связи с этим термоиндикаторные краски можно считать малоинерционными датчиками температур.

Москва

Поступила в редакцию
13 IX 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. С. Рассудова, Б. Г. Абрамович, В. А. Петрашев, Н. Н. Хлестова. Измерение температуры поверхности при помощи термоиндикаторов. ГОСИНТИ № 2-65-1370/139.
2. Б. Г. Абрамович, В. А. Петрашев. Авиационная промышленность, № 4, 1966.
3. Б. Г. Абрамович, В. А. Петрашев, Н. С. Рассудова, Н. Н. Хлестова. О применении термоиндикаторов для измерения температур до 825° С. Докл. на научно-техн. конф. по вопросам измерения высоких температур. Харьков, 1965.
4. Б. Г. Абрамович. Теплофизика высоких температур, 5, 535, 1967.
5. Л. Н. Новиченок. Сб. Тепло- и массоперенос в капиллярно-пористых телах. «Наука и техника», Минск, 1965.
6. Л. Н. Новиченок. Инж.-физ. ж., № 9, 1963.
7. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. Машгиз, 1952.
8. В. Л. Шевельков. Теплофизические характеристики изоляционных материалов. Госэнергоиздат, 1958.
9. А. А. Загорская и др. Лакокрасочные материалы и их применение, № 5, 1965.