

УДК 539.621:536.12

**ОСОБЕННОСТИ ИНТЕНСИВНОГО ФРИКЦИОННОГО НАГРЕВА
ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ
КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ТРЕНИЯ**

Балакин В. А.

Кратковременный (продолжительностью до нескольких секунд) интенсивный фрикционный нагрев трущихся пар характерен для работы ряда высокоскоростных установок и узлов трения, а также тормозных устройств [1, 2]. Основная трудность при анализе контактного взаимодействия поверхностей твердых тел в условиях быстропотекающих процессов трения — необходимость учета ряда теплофизических факторов: нестационарного распределения теплоты на фрикционном контакте, нестационарного распределения температуры в поверхностных слоях, резкого изменения теплофизических свойств с течением времени и т. п. В большинстве случаев распределение теплоты трения между телами неизвестно, наличие же тепломассопереноса (переноса нагретых поверхностных слоев с одного тела на другое) усложняет задачу. Эксперименты показывают, что в начальные моменты нагрева, когда основное количество теплоты аккумулировано в тонких поверхностных слоях, тела обладают повышенной способностью поглощения теплоты. Значения коэффициентов температуропроводности при этом существенно выше, чем при режимах, близких к стационарным.

Методика определения коэффициента температуропроводности предусматривает измерение температурного поля по всей длине цилиндрического образца, нагреваемого с торца, создание близких к одномерным условий распределения теплоты в образце. Тогда аккумулированная образцом теплота $Q_{ак}(t)$ в любой момент времени t равна

$$Q_{ак}(t) = c_{cp}(t) \rho_{cp}(t) S \int_0^b [\vartheta(x, t) - \vartheta_0] dx, \tag{1}$$

где b — длина образца; $c_{cp}(t)$, $\rho_{cp}(t)$ — средние значения теплоемкости и плотности образца за время нагрева t соответственно; S — площадь поперечного сечения образца; $\vartheta(x, t)$ — температура образца в точке с координатой x от нагреваемого торца; ϑ_0 — начальная температура образца (принятая постоянной). Обозначив площадь под кривой приращения температур

через $\Omega(t) = \int_0^b [\vartheta(x, t) - \vartheta_0] dx$, поделив левую и правую части уравнения (1) на St и учитывая, что $c_{cp}(t) \rho_{cp}(t) = \lambda_{cp}(t) / a_{cp}(t)$, где $\lambda_{cp}(t)$, $a_{cp}(t)$ — средние значения коэффициентов соответственно теплопроводности и температуропроводности образца за время t , получаем выражение для среднего удельного теплового потока в образце $q_{cp}(t)$ за время t в виде

$$q_{cp}(t) = \frac{\lambda_{cp}(t)}{a_{cp}(t)} \frac{\Omega(t)}{t}. \tag{2}$$

В уравнении (2) три неизвестных: $q_{cp}(t)$, $\lambda_{cp}(t)$ и $a_{cp}(t)$. С целью решения задачи воспользуемся уравнением Фурье для удельного теплового потока в виде

$$q_{cp}(t) = \lambda_{cp}(t) |\text{grad } \vartheta|_{cp}^t, \quad (3)$$

где $|\text{grad } \vartheta|_{cp}^t$ — среднее значение температурного градиента в образце за время t , который определяется следующим образом. Если известны экспериментальные распределения температур $\vartheta(x, t)$, то, продифференцировав их по x , получим зависимости $\partial\vartheta(x, t)/\partial x$ для фиксированных моментов времени t . Площадь под этими кривыми равна

$$\varphi(t) = \int_0^b \frac{\partial\vartheta(x, t)}{\partial x} dx.$$

Среднее значение температурного градиента в образце в фиксированный момент времени t определяется отношением

$$\left(\frac{\partial\vartheta}{\partial x}\right)_{cp}^t = \frac{\varphi(t)}{b}.$$

Тогда искомое среднее значение температурного градиента в образце за время t находится из выражения

$$|\text{grad } \vartheta|_{cp}^t = \frac{\int_0^t (\partial\vartheta/\partial x)_{cp}^t dt}{t} = \frac{\psi(t)}{t}, \quad (4)$$

где $\psi(t)$ — площадь под соответствующей экспериментальной кривой $(\partial\vartheta/\partial x)_{cp}$ в момент времени t .

С учетом условия (4) выражение (3) приобретает вид

$$q_{cp}(t) = \lambda_{cp}(t) \frac{\psi(t)}{t}. \quad (5)$$

Приравнивая правые части уравнений (2) и (5), получаем

$$a_{cp}(t) = \frac{\Omega(t)}{\psi(t)}. \quad (6)$$

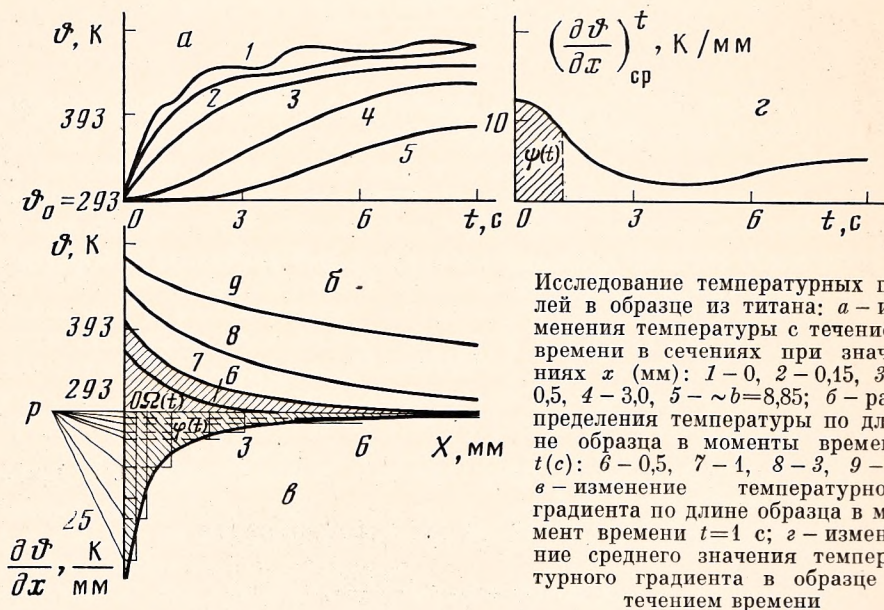
Формула (6) содержит лишь экспериментальные данные ($\Omega(t)$ и $\psi(t)$). Раскроем ее физический смысл. С этой целью, умножая и деля числитель и знаменатель правой части выражения (6) на произведение bt , перепишем его в виде

$$a_{cp}(t) = \frac{b}{t} \frac{[\vartheta(x, t) - \vartheta_0]_{cp}}{|\text{grad } \vartheta|_{cp}^t}, \quad (7)$$

где $[\vartheta(x, t) - \vartheta_0]_{cp} = \Omega(t)/b$ — среднее объемное приращение температуры образца к моменту времени t . Следовательно, коэффициент температуропроводности материалов в начальные моменты интенсивного фрикционного нагрева образца с характерным размером b является функцией среднего объемного приращения температуры, среднего температурного градиента и времени.

На рисунке представлены измерения температуры (a) по длине образца из титана марки ВТ-1, трущегося торцом по боковой поверхности вращающегося с постоянной угловой скоростью диска диаметром 300 мм из стали 1Х18Н10Т. Скорость скольжения $v=25$ м/с, удельная нагрузка на номинальную площадь контакта $p_a=0,3$ МПа, $b=9$ мм, длительность

процесса трения 9 с. Измерения проводили медноконстантановыми термоэлектрическими преобразователями (диаметр термоэлектродов 0,1 мм) в сечениях: $x=0$; $x=\Delta_1=0,15$ мм; $x=\Delta_2=0,5$ мм; $x=\Delta_3=3$ мм; $x\approx b=8,85$ мм. Изменение температуры на поверхности трения фиксировали «истирающимися» термопреобразователем. В остальных сечениях температуру измеряли термопреобразователями, сваренными встык, с диаметром горячего спая $\sim 0,12$ мм. Горячие спаи устанавливали в пазы шириной 0,15 мм и глубиной 0,5 мм, прорезанные на боковой поверхности образца, и закрепляли с помощью специальной смеси из эпоксидной смолы и медных опилок дисперсностью $\sim 0,1$ мм. Рассмотренная технология монтажа



термоэлектрических преобразователей в образец позволяет свести к минимуму искажения температуры в местах установки горячих спаев. Наружную поверхность образца теплоизолировали стеклонитью, которую в дальнейшем пропитывали эпоксидным клеем. Одновременно с помощью стеклонити фиксировали термоэлектроды вдоль боковой поверхности образца. Теплопроводность теплоизоляции на порядок ниже теплопроводности титана, в результате чего образец можно рассматривать как цилиндрический стержень, теплоизолированный с боковой поверхности. Принимается, что в каждом сечении фиксируется средняя температура, а температурное поле одномерное.

На рисунке *b* представлены температурные поля по длине образца в фиксированные моменты времени 0,5, 1, 3 и 9 с. На рисунке *c* показано изменение температурного градиента по длине образца в момент времени $t=1$ с. Кривая получена методом графического дифференцирования соответствующего распределения температуры, представленного на рисунке *b*.

На рисунке *z* изображено изменение среднего температурного градиента в образце с течением времени. Заштрихованная область соответствует времени $t=1$ с. Наличие экстремума указывает на то, что в заданных условиях фрикционного нагрева титанового образца длиной 9 мм в промежутке времени от 0 до 4 с происходит увеличение среднего температурного градиента. При этом возрастает температура поверхности трения и площадь $\varphi(t)$. В дальнейшем (от 4 до 9 с) скорость изменения температуры поверхности трения снижается, происходит выравнивание температуры по длине образца и средний температурный градиент, уменьшаясь, стре-

Таблица 1

Расчетные данные для образца из титана

t, c	$\Omega(t), K \cdot m$	$\varphi(t), K$	$\psi(t) \cdot 10^{-3}, K \cdot c/m$	$[\vartheta(x, t) - \vartheta_0]_{cp}, K$	$ \text{grad } \vartheta _{cp}^t \cdot 10^{-2}, K/m$	$a_{cp}(t) \cdot 10^6, m^2/c$
0,3	0,066	74	2,4	7	8	27,5
0,6	0,134	78	5,1	15	85	26,3
1,0	0,155	104	9,0	17	90	17,2
2,0	0,397	152	23,5	44	117	16,8
4,0	0,671	154	57,3	75	143	11,7
6,0	0,815	141	90,1	91	150	9,0
9,0	1,012	128	134,8	112	150	7,5

Таблица 2

Расчетные данные для образца из меди

t, c	$\Omega(t), K \cdot m$	$\varphi(t), K$	$\psi(t), K \cdot c/m$	$[\vartheta(x, t) - \vartheta_0]_{cp}, K$	$ \text{grad } \vartheta _{cp}^t \cdot 10^{-2}, K/m$	$a_{cp}(t) \cdot 10^6, m^2/c$
0,03	0,046	23	62	5	20,7	715
0,05	0,072	25	129	7	25,8	557
0,10	0,107	32	282	11	28,2	380
0,40	0,280	42	1563	28	39,1	179
0,70	0,400	47	2838	40	40,1	141
1,00	0,570	52	4522	57	45,2	126
2,00	0,961	46	9417	96	47,1	102

Таблица 3

Расчетные данные для образца из эпоксидной смолы

t, c	$\Omega(t), K \cdot m$	$\varphi(t), K$	$\psi(t) \cdot 10^{-3}, K \cdot c/m$	$[\vartheta(x, t) - \vartheta_0]_{cp}, K$	$ \text{grad } \vartheta _{cp}^t \cdot 10^{-2}, K/m$	$a_{cp}(t) \cdot 10^6, m^2/c$
0,5	0,090	152	6,8	9	136	13,1
1,0	0,133	207	23,2	13	232	5,7
2,0	0,209	240	52,6	21	263	4,0
4,0	0,299	253	114,2	30	296	2,6
8,0	0,434	259	242,4	43	303	1,8
16,0	0,630	260	498,2	63	310	1,2

мится к некоторому постоянному значению. Результаты обработки экспериментальных данных сведены в табл. 1.

Анализ показывает, что в промежутке времени от 0,3 до 9 с температуропроводность титана уменьшилась в 4 раза, приблизившись к табличному значению при температуре 405 К ($\vartheta(x, t) - \vartheta_0 = 112$ К, $\vartheta_0 = 293$ К). В табл. 2 и 3 приведены результаты испытаний для образцов из меди и эпоксидной смолы. Размеры медного и эпоксидного образцов, как у титана, а условия нагрева торцевых поверхностей во всех трех случаях приблизительно одинаковые. В медном образце пазы с установленными в них горячими спаями термопреобразователей зачеканивали отожженной медной проволочкой. В образце из эпоксидной смолы — заливали этой же смолой. Предварительные метрологические исследования показали, что время переходного процесса термопреобразователя со шлейфом осциллографа в измеряемом температурном интервале составляет $\sim 0,03$ с. Из анализа экспериментальных данных (табл. 2) следует, что в промежутке времени от 0,03 до 2 с температуропроводность меди уменьшилась в 7 раз, у эпоксидной же смолы (табл. 3) во временном интервале от 0,5 до 16 с — в 11 раз. Из-за существенного различия коэффициента темпера-

туропроводности и соответствующего хода температурных кривых обработки результатов испытаний целесообразно было проводить, начиная с моментов времени для меди — 0,03 с, для титана — 0,3 с, для эпоксидной смолы — 0,5 с. Стремление избежать существенной методической погрешности из-за нагрева (теплоотдачи) противоположного торца образца ограничивало временной интервал обработки данных для меди — 2 с, для титана — 9 с, для эпоксидной смолы — 16 с.

Таким образом, во всех трех рассмотренных случаях при неизвестных удельных тепловых потоках, направленных в образцы, было известно температурное распределение по длине образцов. В начальные моменты интенсивного нагрева медного, титанового и эпоксидного образцов их коэффициенты температуропроводности существенно выше табличных, но приближаются к последним с течением времени. Это обстоятельство можно объяснить на основе анализа уравнения (7). Изменение внутренней энергии образца длиной b прямо пропорционально отношению $[\theta(x, t) - \theta_0]_{ср} / |\text{grad } \theta|_{ср}'$. Для достижения заданного изменения внутренней энергии за малый промежуток времени t тело должно аккумулировать существенно большую энергию по сравнению с квазистационарными (длительными) условиями нагрева [3].

Ценность информации относительно $a_{ср}(t)$ заключается в том, что она позволяет анализировать способность образца из известного материала поглощать теплоту трения в конкретных, заранее не прогнозируемых условиях кратковременного фрикционного нагрева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В. А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. М.: Машиностроение, 1980.
2. Дроздов Ю. Н., Арчегов В. Г., Смирнов В. И. Противозадирная стойкость трущихся тел. М.: Наука, 1981.
3. Балакин В. А. В кн.: Тез. докл. Всесоюз. научно-технической конф. по проектированию, изготовлению и диагностике узлов трения в машиностроении. М.: ВСНТО, 1983, ч. 2, с. 80.

Гомельский государственный
университет

Поступила в редакцию
10.X.1983

Окончательный вариант получен
22.XII.1983

PECULIARITIES OF INTENSIVE FRICTIONAL HEAT OF SOLID SURFACE LAYERS UNDER SHORT-TIME FRICTION CONDITIONS

Balakin V. A.

The abilities of frictional solids to absorb the friction heat in the initial moments of intensive frictional heating of the bodies have been analysed. The experimental results show that the solids possess an increased ability of heat absorption in the initial moments of intensive heating.