

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С МАКРОГЕТЕРОГЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Канд. техн. наук, доц. КАЛИНИЧЕНКО А. С., канд. техн. наук АБРАМЕНКО А. Н.,
инженеры ВОРОНИН Е. А., КОЖЕМЯКИНА А. С.

Белорусская государственная политехническая академия

Инженеры КОБЗАРЬ Ю. В., ВЫХОТА С. О.

ОАО «Белэнергоремналадка»

Поиск и разработка новых материалов для трущихся пар связаны с тем, что существующие не в полной мере соответствуют требованиям по стойкости и стоимости. Наибольший успех в повышении стойкости узлов трения получен в парах, в которых одна из деталей изготовлена из материала с композиционной структурой [1].

Перспективными материалами для теплонагруженных узлов теплоэнергетического оборудования являются макрогетерогенные литые композиционные сплавы. Они представляют собой матрицу (чаще всего сплав на медной основе), упрочненную сферическими гранулами на основе железоуглеродистых сплавов. Несущая способность таких композиционных материалов определяется при прочих равных условиях долей армирующей фазы.

При испытании без смазки композиты показывали меньший износ и более низкий коэффициент трения по сравнению с такими антифрикционными материалами, как свинцово-оловянно-сурьмянистые баббиты. Условия работы пар скольжения в узлах теплоэнергетического оборудования характеризуются высокими знакопеременными нагрузками и повышенной температурой. Поэтому для определения несущей способности деталей из композиционных материалов необходимо знать реальные значения их коэффициента теплопроводности, что позволяет определить внутренние напряжения, вызванные температурой. С этой целью был проведен анализ существующих методик расчета коэффициента теплопроводности в зависимости от массовой доли армирующей фазы и выполнено экспериментальное определение значений в интервале температур 20—100 °С, что имеет место при использовании композиционных материалов в качестве поверхностей скольжения для опор корпусов подшипников.

Исследовались композиционные материалы, состоящие из бронзовой матрицы и упрочняющей фазы, представляющие собой чугунные гранулы диаметром около 1 мм, равномерно распределенные в матрице. Образцы были получены методом жидкофазного спекания.

Для определения эффективного коэффициента теплопроводности композиционного материала необходимо выбрать структурную модель композита, которая должна отражать основные геометрические свойства реальной системы и учитывать все существенные параметры, определяющие процесс переноса теплоты [2]. В этом случае такую модель можно считать адекватной реальной системе. Для системы «сферические гранулы

—матрица» в качестве модели допустимо взять укладку материала упрочняющей фазы в состоянии свободной засылки. К числу достоинств такой структуры следует отнести ее изотропность, устойчивость и сохранение формы частиц. Предусматривается, что модель определяет упорядоченная кладка идеально гладких шаров. В этом случае можно выделить элементарную ячейку-элемент объема, повторяя который определенным образом можно получить весь объем исходной структуры. Поэтому расчет коэффициента теплопроводности будем вести на основе анализа переноса теплоты в элементарной ячейке.

В качестве параметра, характеризующего свойства композиционного материала, выберем объемную долю упрочняющей фазы (гранул)

$$A = \frac{V_c}{V_M + V_c} \quad (1)$$

Принимается, что компоненты модели композита (гранулы и матрица) взаимно непроницаемы и отсутствует химическое взаимодействие составляющих материала. Коэффициент теплопроводности гранул (серый чугун) составляет 34 Вт/(м·К), а матрицы из бронзы — 80 Вт/(м·К).

Первое исследование по теории обобщенной проводимости проделал Максвелл [3]. Он рассчитал эффективное тепловое поле системы, состоящей из сплошной изотропной массы, в которую вкраплены частицы сферической формы. Согласно Максвеллу эффективная теплопроводность рассчитывается по следующей формуле:

$$\lambda_{эф} = \lambda_M \left[\frac{\lambda_c + 2\lambda_M - 2(1-A)(\lambda_M - \lambda_c)}{\lambda_c + 2\lambda_M + (1-A)(\lambda_M - \lambda_c)} \right] \quad (2)$$

Это выражение было уточнено А. Эйкеном для системы, состоящей из непрерывной среды, в которой диспергированы частицы другой, меньшей по объему, фазой [4],

$$\lambda_{эф} = \lambda_M \left[\frac{1 - 2(1-A) \frac{(1 - \frac{\lambda_M}{\lambda_c})}{(2\frac{\lambda_M}{\lambda_c} + 1)}}{1 - (1-A) \frac{(1 - \frac{\lambda_M}{\lambda_c})}{(2\frac{\lambda_M}{\lambda_c} + 1)}} \right] \quad (3)$$

В. И. Одолевский [5], используя результаты работы А. Эйкена, предложил применять для расчета эффективного коэффициента теплопроводности смесей с замкнутыми включениями кубической формы следующее соотношение:

$$\lambda_{эф} = \lambda_m \left[1 - \frac{A}{\frac{1}{1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_m}} - \frac{1 - A}{3}} \right]. \quad (4)$$

Г. Карслоу и Д. Егер для определения коэффициента теплопроводности материала с включениями получили следующую зависимость [6]:

$$\lambda_{эф} = \lambda_m \left[\frac{1 - (1 - \frac{\lambda_c}{\lambda_m})(1 - A)}{1 + (K - 1)(1 - A)} \right], \quad (5)$$

где для сферических частиц

$$K = \frac{3\lambda_m}{2\lambda_m + \lambda_c}.$$

Следует отметить работу Л. И. Тучинского [7]. Для расчета коэффициента теплопроводности предлагается использовать соотношение

$$\frac{\lambda_k}{\lambda_A} = (1 - c)^2 + \frac{\lambda_B}{\lambda_A} c^2 + \frac{2 \frac{\lambda_B}{\lambda_A} c(1 - c)}{c + \frac{\lambda_B}{\lambda_A} (1 - c)}, \quad (6)$$

где объемная доля гранул A связана с параметром c уравнением

$$A = (3 - 2c) c^2.$$

Параметр c зависит от соотношения геометрических размеров частиц упрочняющей фазы и матрицы.

Вследствие значительной микроструктурной неоднородности компози- та и разнообразных материалов, применяемых для матриц и упрочняю- щих фаз, а также большого количества моделей и методов расчета тепло- физических характеристик, основным источником информации о реаль- ной величине коэффициента теплопроводности является эксперимент. Для экспериментального определения теплопроводности композицион- ных материалов* был выбран метод монотонного разогрева образцов внешним односторонним проходящим тепловым потоком [8].

* Работы по экспериментальным исследованиям проведены совместно с канд. техн. наук С. А. Танасвой и инж. И. П. Василенко (ИТМО НАНБ).

Тепловая схема метода показана на рис. 1. Испытуемый образец 4, пластина контактная 3 и стержень 5 монотонно разогреваются тепловым потоком $Q(\tau)$, поступающим из основания 1. Боковые поверхности стержня, образца, пластин 2, 3 адиабатически изолированы. Стержень и контактная пластина изготовлены из меди, обладающей высокой теплопроводностью, поэтому перепады температур на них незначительны. Тепловой поток $Q_T(\tau)$, проходящий через среднее сечение пластины тепломера 2, частично поглощается ею, а тепловой поток $Q_0(\tau)$ разогревает пластины 3, образец и стержень. Размеры системы выбраны таким образом, что рабочий слой тепломера имеет пренебрежительно малую по сравнению со стержнем теплоемкость, и обладает малым тепловым сопротивлением. В этом случае потоки, аккумулируемые образцом и пластиной, были по крайней мере в 5—10 раз меньше поглощаемых стержнем. При этих условиях характер температурного поля образца и пластины 2 оказывается близким к линейному, все детали системы разогреваются с близкими скоростями.

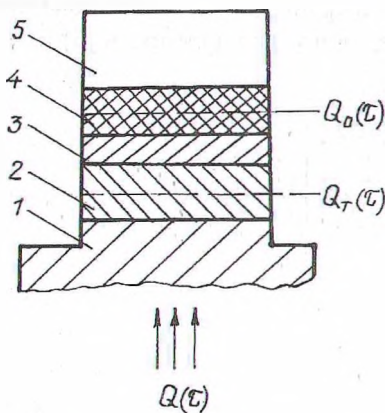


Рис. 1. Тепловая схема измерений

Конструктивно измеритель теплопроводности состоит из двух блоков. Блок питания и регулирования обеспечивает нагрев ядра измерительной ячейки со средней скоростью около 0,1 К/с и автоматическое регулирование температуры. Скорость разогрева определяется величиной начального напряжения на нагревателе и скоростью его изменения. В измерительном блоке расположены: нагревательная ячейка, тепломер, испытуемый образец, стержень, термопары, охранный колпак. Для температурных измерений использовались хромель-алюмелевые термопары. Рабочим слоем тепломера является пластина из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. Для поддержания адиабатических условий на боковой поверхности образца и стержня предусматривается адиабатическая оболочка и автоматический регулятор температуры. Для определения теплопроводности в процессе непрерывного нагрева на фиксированных уровнях температуры стержня T_c (через 25 °С) с помощью прибора Ф136 измеряется перепад температур на образце и пластине тепломера. Измерения проводились в интервале температур 25—75 °С.

Результаты экспериментов и расчетов приведены на рис. 2 и в табл. 1. Как характер кривых, так и численные значения теплопроводности хорошо согласуются. При уменьшении доли бронзовой матрицы в композите его теплопроводность снижается. При значении параметра A порядка 0,5 наблюдается перегиб зависимости $\lambda = f(A)$. Это можно объяснить тем, что при такой объемной доле гранул в композите устанавливается кубическая укладка, где каждая гранула касается с восемью соседними, что соответствует объемной доле гранул в укладке 52,36 %, а матрицы — 47,64 %. Образование упорядоченной структуры приводит к скачкообразному росту коэффициента теплопроводности.

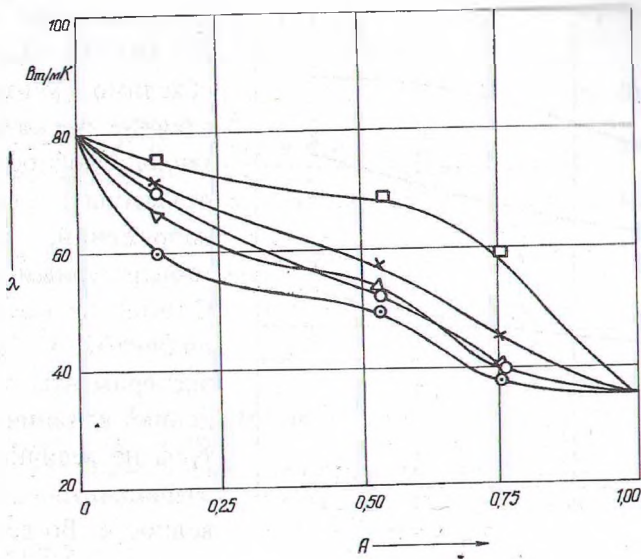


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности (λ) композита от соотношения гранул и матрицы в образце: \odot — эксперимент; Δ — расчет [3]; \square — расчет [4]; $+$ — расчет [5]; \diamond — расчет [6]

Следующий скачок коэффициента теплопроводности наблюдается при содержании бронзовой матрицы 80—85 %. При таком процентном содержании в композите образуются столбики бронзы, которые обеспечивают основную долю теплопроводности композита.

Таблица 1

№ образца	1	2	3	4	5
Объемная доля гранул А	0	0,15	0,53	0,75	1
Теплопроводность λ , Вт/мК (эксперимент)	80	60	50	38	34
Расчет λ , согласно [2]	80	66,5	53,2	39	34
Погрешность Δ , %	0	11	6	3	0
Расчет, согласно [3]	80	75,4	68	59	34
Погрешность Δ , %	0	25	36	55	0
Расчет, согласно [4]	80	71,7	57,6	43,7	34
Погрешность Δ , %	0	19	15	15	0
Расчет, согласно [5]	80	70,5	52,5	38,5	34
Погрешность Δ , %	0	17	5	1	0

Сопоставление расчета и эксперимента показывает, что для нашего случая наиболее близки между собой значения, полученные по формуле Максвелла (2). Суммарное отклонение результатов составило 7,7, а максимальное — 11 %. При использовании выражений (3) — (5) суммарное отклонение составляет 38,6; 16,3 и 7,6 % соответственно.

Как упоминалось, детали из композиционных материалов работают в сочетании с другими, имеющими отличные коэффициенты температурного расширения. В процессе работы температура узлов скольжения мо-

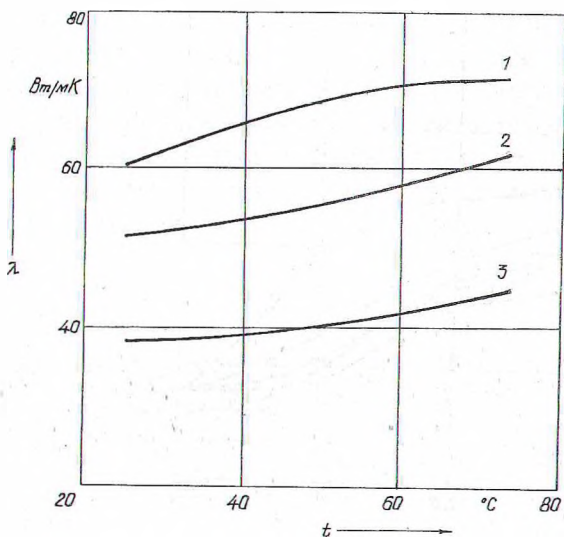


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры: 1 — $A = 0,15$; 2 — $0,53$; 3 — $0,75$

Анализ экспериментальных данных показал, что в диапазоне температур 20 ... 100 °С эта зависимость выражается соотношением

$$\lambda_{\text{эф}} = (\lambda_{25} - 5\delta) + \delta(t + 20). \quad (7)$$

Из рис. 3 видно, что при увеличении температуры от 25 до 75 °С эффективный коэффициент теплопроводности возрастает на 14—20 %, что представляет заметное изменение и требует учета при расчете прочностных свойств и напряжений, возникающих из-за температурного фактора. Соотношение структурных составляющих композита влияет на наклон температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Это объясняется тем, что материалы гранул и матрицы по-разному зависят от температуры. Определено, что значение коэффициента пропорциональности δ в зависимости от объемной доли упрочняющей фазы составляет $\delta = 0,22$ (для $A = 0,15 \dots 0,53$) и $\delta = 0,1$ для $A = 0,75$.

Обозначения: A — объемная доля компонента; K — коэффициент; Q — тепловой поток, Вт; t — температура, °С; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); в индексах: м — матрица; с — гранулы; эф — эффективная; о — образец; т — тепломер.

ВЫВОД

На основании результатов работы можно сказать, что коэффициент теплопроводности композиционного материала с макронеоднородной структурой, в зависимости от соотношения в нем гранул и матрицы, достаточно точно описывается выражением (2). Температурная зависимость коэффициента теплопроводности, необходимая для расчета внутренних напряжений, определяется по формуле (7).

жет достигать величины 75—100 °С. Поэтому необходимо учитывать ее влияние на коэффициент теплопроводности для определения внутренних напряжений, вызванных температурным фактором. С этой целью были дополнительно проведены эксперименты по определению влияния температуры на величину его коэффициента теплопроводности. Во всех случаях с увеличением температуры наблюдался рост теплопроводности (рис. 3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Затуловский С. С., Кезик В. Я., Иванова Р. К. Литые композиционные материалы. — К.: Техника, 1990. — 240 с.
2. Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
3. Махвелл С. A treatise on electricity and magnetism. 3d ed. Oxford Univ. — Press, 1891.
4. Еускен А. Materials Ist calculation based on the thermal conductivity of components. — Zeisch. VDI, Forschungsheft, 1932. — 353р.
5. Одолевский В. И. Расчет обобщенной проводимости гетерогенных систем // ЖТФ. — 1951. — № 6. — Т. 21. — С. 667—685.
6. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964. — 588с.
7. Тучинский Л. И. Композиционные материалы, получаемые методом пропитки. — М.: Металлургия, 1986. — 208 с.
8. Теплотехнические измерения и приборы / Е. С. Платунов, С. Е. Буровский, В. В. Куренин и др. — Л., 1986. — 256с.

Представлена кафедрой
ПТЭ и Т

Поступила 16.12.1998