

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-2-43-45

УДК (UDC) 620.1.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С 3D АРМИРОВАНИЕМ

© Владимир Алексеевич Воронцов, Герман Григорьевич Зайцев,
Лев Владимирович Ким

НИИГрафит, Москва, Россия; e-mail: gerzajcev@yandex.ru

Статья поступила 6 июня 2017 г.

Представлены результаты исследований эмпирических зависимостей между некоторыми характеристиками (удельным электрическим сопротивлением, коэффициентом теплопроводности, динамическим модулем упругости, коэффициентом термического линейного расширения, плотностью) углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) с ортогональным армированием (3D). Характеристики определяли в соответствии с действующими нормативами (ГОСТ и ASTM). На основе результатов испытаний и проведенных расчетов получены формулы, описывающие эмпирические зависимости между характеристиками УУКМ. Формулы позволяют рассчитывать искомые параметры материала по известным характеристикам. Необходимо учитывать, что приведенные эмпирические зависимости справедливы только для УУКМ с ортогональным армированием.

Ключевые слова: углерод-углеродные композиционные материалы; удельное электросопротивление; коэффициент теплопроводности; модуль упругости; коэффициент термического линейного расширения; плотность; расчетные формулы.

CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS WITH 3D REINFORCEMENT FUNCTIONAL PROPERTIES DEPENDENCES RESEARCH

© Vladimir A. Vorontsov, German G. Zaitsev, Lev V. Kim

NIIGrafit, Moscow, Russia; e-mail: gerzajcev@yandex.ru

Submitted June 6, 2017.

The article presents the research results on the empirical dependencies of a carbon-carbon composite material (CCCM) with orthogonal reinforcement (3D) characteristics (specific electrical resistance, thermal conductivity coefficient, dynamic elastic modulus, coefficient of thermal linear expansion, density). The definition of these characteristics was made in accordance with the regulatory documents (GOST and ASTM). Based on the tests and calculations results, a number of formulas were obtained that describe the empirical relationships between the characteristics of the material. According to these formulas it is possible to calculate the value of the sought-for material characteristic from known values of one or several characteristics through the calculated constant for a given relationship. It should be noted that the formulas and graphical dependencies given in the article are valid only for this particular material.

Keywords: carbon-carbon composite materials; resistivity; thermal conductivity coefficient; elastic modulus; coefficient of thermal linear expansion; density; design formulas.

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) с 3D армированием широко используются в современной технике в качестве конструкционных материалов благодаря их достаточно высокой механической прочности и низкого удельного веса, что особенно важно в аэрокосмической отрасли, на автомобильном и водном транспорте. При этом важно развитие методов диагностики механических, термомеханических

и электрических свойств УУКМ и установление взаимосвязи между параметрами материала.

На сегодняшний день разработаны модели [1–2], позволяющие описать с определенной точностью взаимосвязи некоторых параметров (например, удельного электросопротивления и коэффициента теплопроводности, динамического модуля упругости и удельного электросопротивления) УУКМ, однако для различных типов

углеродных материалов подобные аналитические и численные модели сильно отличаются.

В большинстве случаев точность для прогнозирования свойств УУКМ по результатам косвенных (не прямых) измерений недостаточна, а модели взаимосвязи характеристик материала отсутствуют. В таких случаях часто используют эмпирические зависимости одних параметров от других, определенных на основании статисти-

Таблица 1. Результаты определения характеристик УУКМ 3Д

Образец	ρ , мкОм · м	λ , Вт/(м · град)	E , ГПа	$\alpha \cdot 10^6$, град	γ , г/см ³
1	23,1	52,8	43,9	3,41	1,924
2	19,1	56,6	52,2	3,11	1,928
3	19	59,6	49	3,09	1,93
4	19,1	56,6	52,2	3,4	1,956
5	18,8	64,5	50,4	3,35	1,944
6	18,7	58,9	52,8	3,47	1,956
7	18	67,6	53,1	3,13	1,937
8	17,9	68,2	58,9	3,24	1,953
9	17,3	67,6	54	3,35	1,961
10	17,1	69,1	58,9	3,28	1,96
11	16,8	64,2	53,6	3,38	1,957
12	25,7	48,5	47,2	3,2	1,942
13	25,8	48	47,3	3,38	1,931
14	24,1	46,9	50,5	3,4	1,933
15	25,3	46,6	50,4	3,39	1,932
16	26,1	46,3	46,3	3,37	1,92
17	28	44,8	46,7	3,09	1,93
18	24,8	47,5	47,8	3,05	1,93
19	24,7	46,4	49,4	2,84	1,91
20	26,3	47,6	48,5	3,31	1,91
21	27,2	43,3	47,6	3,21	1,92
22	25,8	47,7	47,8	3,81	1,96
Среднее значение	22,2	54,5	50,4	3,28	1,937
Стандартное отклонение	3,93	8,97	3,83	0,19	0,016
Доверительный интервал при вероятности 0,95	$\pm 8,17$	$\pm 18,65$	$\pm 7,96$	$\pm 0,41$	$\pm 0,034$

ческого анализа массива экспериментальных данных.

Особенно полезны для практики оказываются случаи простейших линейных или обратно пропорциональных зависимостей, которые могут существенно облегчить и ускорить диагностику материалов по косвенным измерениям.

Цель работы — определение эмпирических зависимостей между различными характеристиками УУКМ типа 3Д.

Теплофизические и механические параметры УУКМ определяли с использованием стандартных методов и установок. Коэффициент теплопроводности λ и модуль упругости E — двухзондовым [3] и динамическим (по частоте продольных колебаний образцов) методами [4]. Коэффициент термического линейного расширения (КТЛР) измеряли в интервале температур 20 – 1000 °С. Испытывали цилиндрические ($\varnothing 15 \times 20, 20 \times 20$ мм) и призматические (14×14 мм) образцы длиной 150 и 100 мм соответственно. Результаты приведены в табл. 1, 2.

Видно, что произведение удельного электросопротивления ρ на коэффициент теплопроводности λ — постоянная величина [1]:

$$C_1 = \rho\lambda = 1179. \quad (1)$$

Результат определения других эмпирических зависимостей следующий:

$$C_2 = \alpha/\gamma = 1,696, \quad (2)$$

$$C_3 = \sqrt{\rho E} = 33,3, \quad (3)$$

$$C_4 = \alpha\gamma\sqrt{\frac{\rho + \lambda}{E}} = 7,86, \quad (4)$$

где C_i ($i = 1, \dots, 4$) — среднее значение по соответствующим функциям; ρ — удельное электросопротивление, мкОм · м; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · град); α — коэффициент термического линейного расширения, град⁻¹; E — динамический модуль упругости, ГПа; γ — удельная плотность, г/см³.

На рисунке приведены графики зависимостей $\lambda = C_1/\rho$, $E = C_3^2/\rho$ и $\alpha = C_2\gamma$.

Таблица 2. Статистические параметры эмпирических зависимостей (1) – (5)

Статистический параметр	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
Среднее значение	1178,9	1,696	33,3	7,86	96,5
Относительная погрешность (определяли как отношение доверительного интервала к среднему значению), %	2,16	2,46	2,80	3,12	2,06
Стандартное отклонение	12,27	0,02	0,45	0,12	0,96
Доверительный интервал при вероятности 0,95	$\pm 25,52$	$\pm 0,042$	$\pm 0,93$	$\pm 0,25$	$\pm 1,98$
Коэффициент вариации, %	1,04	1,18	1,35	1,50	0,99

Для универсальной эмпирической зависимости можно записать

$$C_5 = \sqrt{\frac{\rho \lambda E}{\alpha \gamma}} = 96,6. \quad (5)$$

Несмотря на лучшие показатели по относительной погрешности и коэффициенту вариации ее нельзя использовать в формулах (1) – (4). Вместе с тем как самостоятельная эмпирическая зависимость формула (5) может быть полезна при анализе физических характеристик материала.

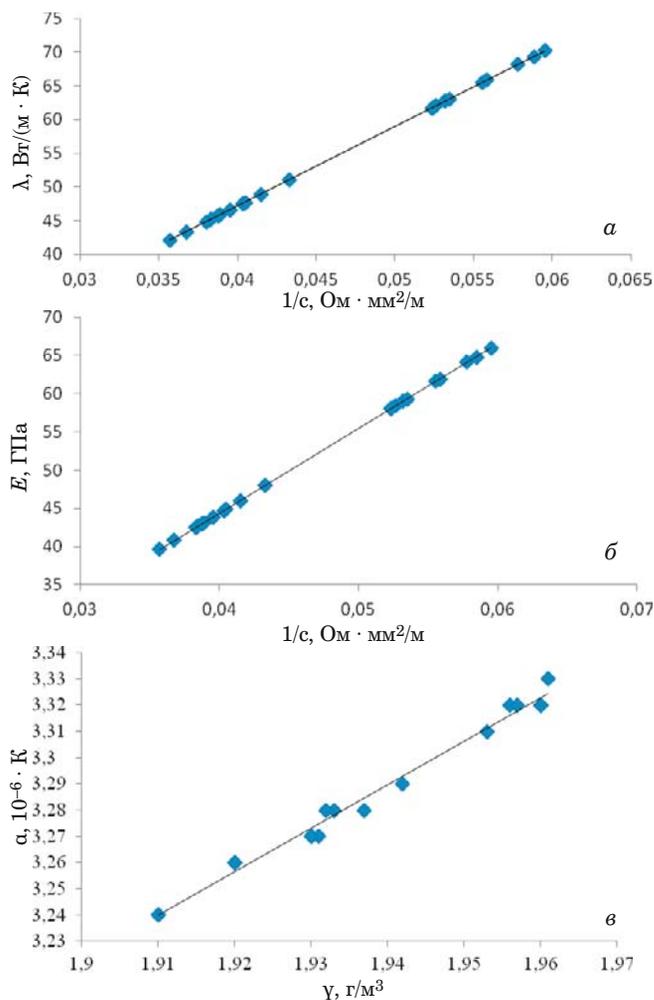
Таким образом, в результате проведенных исследований определены такие характеристики УУКМ типа 3D, как коэффициент теплопроводности, удельное электросопротивление, динамический модуль упругости, коэффициент термического линейного расширения и удельная плотность. На основании полученных данных предложены эмпирические зависимости, позволяющие расчетным путем находить неизвестные параметры материала по его известным характеристикам. Полученные результаты могут быть использованы при диагностике УУКМ с 3D армированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лутков А. И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов. — М.: Металлургия, 1990. — 85 с.
2. Вергильев Ю. С., Деев А. Н., Козлов Н. И. и др. Конструкционные материалы на основе графита: сб. тр. / НИИграфит. — М.: Металлургия, 1970. С. 94 – 98.
3. ГОСТ 23776–79. Изделия углеродные. Методы измерения удельного электрического сопротивления. — М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1979.
4. ASTM E 1875–13. Standard test method for dynamic young modulus, shear modulus and poisson ratio by sonic resonance. On line: www.astm.org.

REFERENCES

1. Lutkov A. I. Thermal and electrical properties of carbon materials. — Moscow: Metallurgiya, 1990. — 85 p. [in Russian].



Графики зависимостей $\lambda = C_1/\rho$ (а), $E = C_3^2/\rho$ (б) и $\alpha = C_2\gamma$ (в)

2. Vergil'ev Yu. S., Deev A. N., Kozlov N. I., et al. Structural materials based on graphite: Collections of works / NIIgrafit. — Moscow: Metallurgiya, 1970. P. 94 – 98 [in Russian].
3. RF State Standard GOST 23776–79. Methods for measuring the electrical resistivity. — Moscow: Gosudarstvennyi komitet SSSR po standartam, 1979.
4. ASTM E 1875–13. Standard test method for dynamic young modulus, shear modulus and poisson ratio by sonic resonance. On line: www.astm.org.