Тепловые свойства полимерных композитов с анизотропным графитовым наполнителем

Л. Л. Вовченко, А. А. Куличенко, Л. Ю. Мацуй

Исследованы температурные зависимости теплопроводности и теплоемкости композитов терморасширенный графит (ТРГ) – полимер (эпоксидная смола ЭД20, поливинилпирролидон) в интервале температур 150 – 423 К. Содержание графита варьировали от 0,05 до 0,75 вес.долей. Было показано, что величина теплопроводности композитов увеличивается пропорционально содержанию терморасширенного графита. Предложена модель для описания температурных зависимостей теплопроводности композитов ТРГ – полимер, которая базируется на модели смесей с учетом анизотропии темплопроводности частиц ТРГ и их угловой ориентации в композите, причем при описании температурных зависимостей теплопроводности композитов с низким содержанием ТРГ (< 0,1 вес. долей) необходимо также учитывать тепловое контактное сопротивление между частицами ТРГ и наличие полимерных прослоек в местах контакта.

Введение

В последнее время большое внимание уделяется разработке полимерных композитных материалов разного функционального назначения с использованием разнообразных электропроводящих наполнителей. Композитные материалы (КМ) — это смесь двух или более типов материалов (полимеры, металлы, керамики и др.) со свойствами, которые являются комбинацией свойств составляющих компонентов. Теплопроводные композиты часто формируются путем добавления теплопроводного наполнителя в полимерную матрицу. Преимуществом этих материалов в сравнении с традиционными материалами (металлами и др.) является низкий удельный вес, широкий спектр электрических и тепловых характеристик и технологичность, которая обеспечивается именно полимерной матрицей. Использование графитовых материалов в качестве наполнителей представляется весьма перспективным, поскольку сам графит химически инертен к агрессивным средам, коррозионно устойчивый материал. А использование ТРГ дает возможность получать КМ с широким спектром электрических и тепловых характеристик. Получение ТРГ — один из альтернативных путей разделения графитовых слоев [1], однако отсутствие функциональных групп на поверхности графитовых пластинок способствует перегруппировке материала в кластеры микронного размера. Композитные материалы, где в качестве наполнителя используется ТРГ, могут иметь достаточно высокую анизотропию тепловых и электрических свойств. Вдоль графитовых плоскостей теплопроводность высокоплотного компактированного ТРГ может достигать значений теплопроводности меди (~400 Вт/(м·К)), а в перпендикулярном направлении может быть на два порядка ниже [2]. Такие материалы удобно использовать как теплоизоляторы, которые будут в то же время электропроводящими. Привлекательной перспективой является возможность прогнозирования свойств этих композитов. Известно совсем немного работ [1 – 4], в которых исследуются свойства композитных материалов именно с ТРГ в качестве наполнителя.

Цель данной работы — получение композитных материалов с использованием ТРГ и различных типов полимеров (эпоксидная смола ЭД20, поливинилпирролидон ПВП), исследование тепловых свойств и определение механизмов теплопроводности в этих композитах с учетом анизотропии тепловых свойств графита. С целью определения влияния модификации частиц ТРГ путем закрепления на их поверхности наночастиц металла на тепловые характеристики КМ ТРГ-ЭД проведено исследование теплопроводности КМ ТРГ-Ni+ЭД.

Методика эксперимента

Объектами исследований тепловых характеристик были следующие композиты:

— ТРГ – эпоксидная смола — ТРГ-ЭД20. Приготовление композитов ТРГ – эпоксидная смола осуществляли по методу, представленному в работе [5], концентрация ТРГ в композитах ТРГ-ЭД20 составляла 0,05 – 0,75 вес. долей.

— модифицированный никелем ТРГ – эпоксидная смола — ТРГ-Ni+ЭД20. Модификация ТРГ никелем, а именно, закрепление наночастиц металла на поверхности частиц ТРГ осуществляли методом химического осаждения по методике, описанной в работе [6], приготовление композитов выполняли так же, как и в случае ТРГ-ЭД20.

— ТРГ – поливинилпирролидон — ТРГ-ПВП. Приготовление этих образцов производили по следующей схеме:

1) приготовление раствора ПВП в воде H_2O;

2) введение в этот раствор порошка графитового материала (ТРГ) и сушка этой смеси при комнатной температуре.

Были получены порошки ТРГ – ПВП с содержанием ТРГ от 0,05 до 0,4 вес.дол.

Для измерений теплопроводности и теплоемкости образцы изготовлены в виде таблеток диаметром 15 мм методом холодного прессования порошков ТРГ – полимер (при содержании ТРГ > 0,05 вес.дол.) и выливания жидких смесей ТРГ – полимер в соответствующие формы (при содержании ТРГ ≤ 0,05 вес.дол.).

Методом динамического λ-калориметра в интервале температур 150 – 423 К была исследована теплопроводность вдоль оси прессования (*C*-ось) λ_c композитов ТРГ-ЭД20, ТРГ-Ni+ЭД20 и ТРГ-ПВП. Измерение теплоемкости образцов в интервале температур 200 – 450 К проводили с использованием сравнительного метода динамического *c*-калориметра с тепломером и адиабатической оболочкой. Подробно эти методики измерения теплопроводности и теплоемкости описаны в работе [5]. Выбранный интервал температур (150 – 423 К) связан как с возможностью использования композитов ТРГ-ЭД20 при этих температурах, так и с термической стабильностью полимерной матрицы.

Экспериментальные результаты

В табл. 1 представлены характеристики исследуемых композитов ТРГ-ЭД20. Как видно из таблицы, компактированные образцы ТРГ-ЭД20 характеризуются довольно большой пористостью *P* — 0,3 – 0,6, которую можно определить, используя следующие соотношения:

Таблица 1

Электросопротивление ТРГ и КМ на его основе

C ТРГ, вес. дол.	*d*, г/см^3	ϕ, об.дол.	*P*	ρ_c, Ом·м	ρ_a, Ом·м	ρ_c/ρ_a
ТРГ-чистый						
1	0,51	0,2	0,80	$7{,}46\cdot10^{-5}$	$4{,}04\cdot10^{-5}$	1,9
	0,64	0,29	0,71	$3{,}52\cdot10^{-4}$	$2{,}75\cdot10^{-5}$	13
	0,71	0,32	0,68	$4{,}04\cdot10^{-4}$	$2{,}21\cdot10^{-5}$	18
	1,33	0,60	0,40	$5{,}76\cdot10^{-4}$	$1{,}52\cdot10^{-5}$	38
	1,74	0,78	0,22	$7{,}53\cdot10^{-4}$	$1{,}08\cdot10^{-5}$	70
	1,91	0,86	0,14	$7{,}66\cdot10^{-4}$	$8{,}60\cdot10^{-6}$	96
	2,01	0,90	0,10	$5{,}6\cdot10^{-4}$	$7{,}10\cdot10^{-6}$	80
ТРГ-ЭД20						
0,05	0,9	0,03	0,30	$2{,}0\cdot10^{-2}$	$7{,}9\cdot10^{-2}$	0,4
0,1	0,91	0,06	0,30	$3{,}8\cdot10^{-3}$	$9{,}3\cdot10^{-3}$	0,4
0,3	1,00	0,19	0,31	$5{,}2\cdot10^{-4}$	$4{,}4\cdot10^{-5}$	9,8
0,4	1,12	0,27	0,26	$3{,}0\cdot10^{-4}$	$3{,}4\cdot10^{-5}$	8,9
0,5	1,15	0,36	0,28	$2{,}6\cdot10^{-4}$	$2{,}6\cdot10^{-5}$	10
0,75	1,20	0,63	0,36	$2{,}8\cdot10^{-4}$	$3{,}2\cdot10^{-5}$	8,8
1	2,00	1,0	0,10	$3{,}6\cdot10^{-4}$	$8{,}0\cdot10^{-6}$	45

$$P = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{КМ}}} = 1 - \frac{d_{\text{КМ}}}{d_{\text{КМ(ид)}}}, \qquad (1)$$

где $V_{\text{пор}}$ и $V_{\text{КМ}}$ — объем пор и объем образца, $d_{\text{КМ}}$ — реальная плотность компактированного образца, а $d_{\text{КМ(ид)}}$ — плотность идеального беспористого образца.

В случае композитов, которые содержат два компонента (например, ТРГ – эпоксидная смола), плотность идеального беспористого образца $d_{\text{КМ}}$ определяется по формуле:

$$d_{\text{КМ(ид)}} = \frac{d_{\text{Гр}} d_{\text{П}}}{C_{\text{Гр}} d_{\text{П}} + (1 - C_{\text{Гр}}) d_{\text{Гр}}}, \qquad (2)$$

где $C_{\text{Гр}}$ — весовая доля графита в КМ, $d_{\text{П}}$, $d_{\text{Гр}}$, $d_{\text{КМ}}$ — плотности полимера, идеального графита и композита (определенная при измерении массы и объема образца), соответственно. При рассмотрении композитов очень часто используют значения объемного содержания наполнителя $\phi_{\text{нап}}$, в нашем случае $\phi_{\text{Гр}}$. Связь между весовым *C* и объемным $\phi_{\text{Гр}}$ содержанием для двухкомпонентного композита следующая:

$$\phi_{\text{Гр}} = \frac{1}{\left(1 + \dfrac{(1 - C_{\text{Гр}}) d_{\text{Гр}}}{C_{\text{Гр}} d_{\text{П}}}\right)}. \qquad (3)$$

Величина $\phi_{\text{Гр}}$ характеризует соотношение объемов графита и полимера, если принять их суммарный объем равным 1, то есть $\phi_{\text{Гр}}$ соответствует объемному

содержанию графита в беспористом композите. На практике образцы ТРГ-ЭД20 достаточно пористые, и реальное объемное содержание графита $\phi^*_{Гр}$ в КМ будет ниже, величину $\phi^*_{Гр}$ можно определить, используя соотношение $\phi^*_{Гр} = \phi_{Гр}(1-P)$, где P — пористость материала. В случае КМ ТРГ-Ni+ЭД20 для определения плотности идеального беспористого образца используется та же формула (2), только вместо $d_{Гр}$ используется значения $d_{Гр+Ni}$, рассчитанное для двухкомпонентных систем. С использованием соотношений (1) и (2) определена пористость компактированных образцов чистого ТРГ и КМ ТРГ-ЭД20. Результаты приведены в табл. 1, 2, значения плотности графита и эпоксидной смолы брали следующими: $d_{Гр} = 2230$ кг/м^3, $d_{ЭД20} = 1250$ кг/м^3.

Таблица 2

Тепловые характеристики композитов ТРГ-ЭД20

C ТРГ, вес. дол	d, г/см^3	P	l_c(293К), Вт/(м·К)	$l_{ств}$(293К), Вт/(м·К)	C_p, кДж/(кг·К)	a_c, м^2/с
0,05	0,49	0,6	1,6	5,3		
0,1	0,7	0,44	2,5	5,4	0,945	$3{,}49\cdot10^{-6}$
0,4	0,79	0,46	3,2	7,4	1,006	$3{,}87\cdot10^{-6}$
0,5	0,94	0,34	4,3	8,5	0,938	$4{,}92\cdot10^{-6}$
0,6	0,68	0,59	2,8	8,8	0,947	$3{,}86\cdot10^{-6}$
0,75	0,88	0,52	2,6	5,9	0,841	$3{,}60\cdot10^{-6}$

Как видно из табл. 2, даже при содержании ТРГ 0,75 вес.дол. величина пористости такого КМ может составлять 0,52. Это связано с тем, что при изготовлении образцов ТРГ сначала проводили пропитку порошка ТРГ раствором эпоксидной смолы, сушку этого порошка, а потом изготовление компактированных образцов путем прессования. Пропитанные эпоксидной смолой частицы ТРГ более жесткие и упругие по сравнению с частицами чистого ТРГ, поэтому при прессовании порошков ТРГ-ЭД20 не происходит такого расслоения графита и ориентирования макропластинок графита перпендикулярно оси прессования, как это было в случае компактирования чистого ТРГ. В результате этого получаем довольно пористые структуры ТРГ-ЭД20, которые менее анизотропны, чем чистый ТРГ с тем же самым объемным содержанием графитовой фазы $\phi_{Гр}$. Ориентирование макропластинок ТРГ при прессовании подтверждается результатами рентгеноструктурных исследований компактированных образцов ТРГ, которые указывают на ярковыраженную текстуру образцов — при снятии 00l-дифрактограмм на них наблюдались лишь 002 и 004 отражения графита. Выравнивание макропластинок графита при прессовании подтверждается также результатами наших исследований электросопротивления компактированных образцов ТРГ различной плотности. В табл. 1 приведены данные по анизотропии электросопротивления компактированных ТРГ и КМ ТРГ-ЭД20. Из таблицы видно, что анизотропия электросопротивления ρ_c/ρ_a увеличивается с ростом плотности для образцов чистого ТРГ и достигает значения 96 при d = 1,91 г/см^3, а для КМ ТРГ-ЭД20 с содержанием ТРГ $C \geq 0{,}3$ вес.дол. почти не изменяется и в сравнении с анизотропией чистого ТРГ меньше, а для концентраций ТРГ 0,05 и 0,1 вес. дол. отношение ρ_c/ρ_a меньше единицы. Что касается теплопроводности компактированных образцов ТРГ, то в работе [2] были представлены результаты исследований температуропроводности и теплоемкости компактированного ТРГ, которые указывают на возрастание анизотропии тепловых характеристик образцов по мере увеличения их плотности.

На рис.1*а*, *б* приведены концентрационные зависимости теплопроводности композитов ТРГ-ЭД20, ТРГ-Ni+ЭД20 и ТРГ-ПВП. Как видно из приведенных результатов, происходит увеличение теплопроводности с ростом содержания ТРГ в КМ, хотя

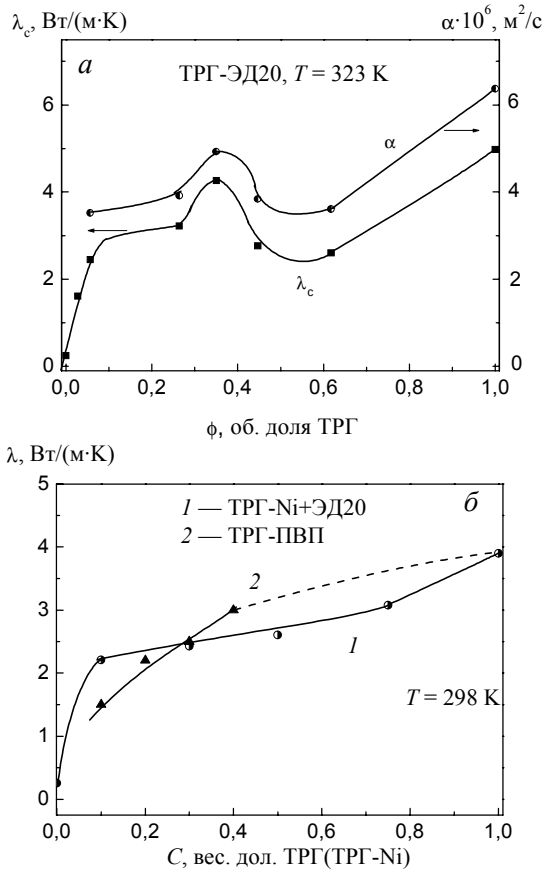

Рис. 1. Зависимости теплопроводности и температуропроводности композитов на основе ТРГ от содержания наполнителя: *а* — ТРГ-ЭД20; *б* — ТРГ-Ni+ЭД20 и ТРГ-ПВП.

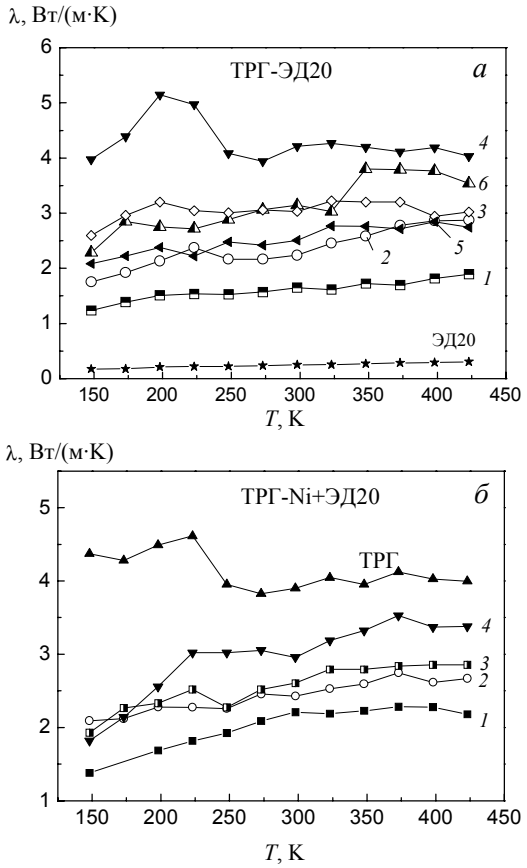

Рис. 2. Температурные зависимости теплопроводности компактированных образцов композитов ТРГ-ЭД20 (*а*) и ТРГ-Ni+ЭД20 (*б*) с различным содержанием наполнителя, вес. долей: *а*: *1* — 0,05, *2* — 0,1, *3* — 0,4, *4* — 0,5, *5* — 0,6, *6* — 0,75; *б*: *1* — 0,1, *2* — 0,3, *3* — 0,5, *4* — 0,75.

значения теплопроводности для ТРГ-ПВП несколько меньше в сравнении с величиной теплопроводности для композитов ТРГ-ЭД20. Для КМ ТРГ-ЭД20, так и для ТРГ-Ni+ЭД20 характерно резкое (почти в 10 раз) возрастание теплопроводности даже при добавлении всего 0,05 – 0,1 вес.дол. наполнителя в эпоксидную матрицу. Концентрационная зависимость теплопроводности для ТРГ-ЭД20 не является монотонной, а имеет максимум при концентрации ТРГ 0,5 вес. дол.

На рис. 2 приведены температурные зависимости теплопроводности КМ ТРГ-ЭД20, ТРГ-Ni+ЭД20. Было обнаружено, что величина и характер температурной зависимости $\lambda_c(T)$ для КМ ТРГ-полимер отличаются от λ_c чистого ТРГ [5]. Почти для всех композиций они являются возрастающими за исключением образцов с содержанием ТРГ 0,5 вес.дол. Для композиций ТРГ-ПВП вид температурных зависимостей теплопроводности аналогичен зависимостям для КМ ТРГ-ЭД20, ТРГ-Ni+ЭД20. Следует отметить,

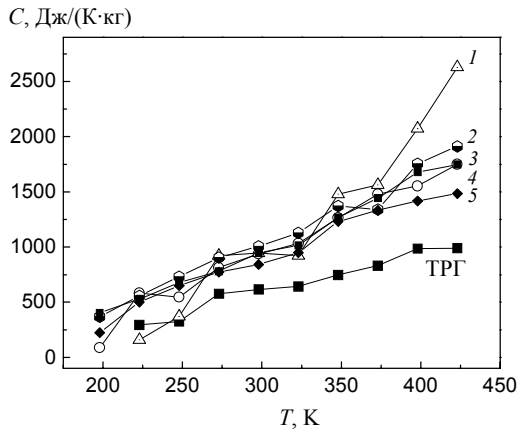

Рис. 3. Температурные зависимости теплоемкости компактированных образцов ТРГ-ЭД20 с различным содержанием ТРГ, вес. долей: *1* — 0,1; *2* — 0,4; *3* — 0,5; *4* — 0,6; *5* — 0,75.

что модификация частиц ТРГ никелем приводит к более монотонному характеру концентрационной и температурных зависимостей теплопроводности КМ ТРГ-Ni+ЭД20.

С целью определения температуропроводности композитов ТРГ-ЭД20 были проведены измерения теплоемкости, результаты приведены на рис.3. Как видно из рисунка, добавление эпоксидной смолы приводит к возрастанию величины теплоемкости в сравнении с чистым ТРГ. С ростом температуры теплоемкость возрастает приблизительно в 4 раза. На рис. 1*а* приведена концентрационная зависимость температуропроводности КМ ТРГ-ЭД20. Уменьшение температуропроводности КМ ТРГ-ЭД20 в сравнении с чистым компактированным ТРГ связано как с меньшей теплопроводностью КМ ТРГ-ЭД20, так и с большими значениями теплоемкости этих материалов.

Обсуждение результатов

Как отмечалось выше, величина теплопроводности КМ ТРГ-полимер в общем случае прямо пропорциональна содержанию ТРГ в КМ. Рассмотрим более детально, какие факторы влияют на величину теплопроводности исследуемых КМ.

1. Во-первых, как мы уже отметили, теплопроводность полимерного КМ должна возрастать при увеличении содержания теплопроводящей графитовой компоненты.

2. Необходимо также учитывать, что графит имеет очень высокую анизотропию теплопроводности, и при увеличении содержания ТРГ в КМ происходит ориентация макропластинок графита перпенди-

кулярно оси прессования, и теплопроводность вдоль оси С уменьшается. Для описания этой зависимости используется весовая функция $f(\theta)$, которая и учитывает угловую ориентацию макрочастиц графита.

3. Кроме того, важным параметром, который может влиять на величину эффективной теплопроводности КМ, является контактное тепловое сопротивление между частицами ТРГ, которое в свою очередь зависит от того, есть ли это непосредственный контакт между частицами ТРГ, или контактирование осуществляется через полимерную прослойку. Очевидным является тот факт, что при увеличении содержания ТРГ в КМ, а также при повышении температуры тепловое контактное сопротивление уменьшается и эффективная теплопроводность возрастает.

4. Пористость материала также влияет на величину эффективной теплопроводности КМ. При уменьшении пористости КМ теплопроводность возрастает по абсолютной величине.

Проанализируем концентрационные и температурные зависимости теплопроводности КМ ТРГ-ЭД20 исходя из представленных позиций.

Как видно из рис.1*а*, зависимость λ_c от концентрации ТРГ не монотонная, и имеет максимум при ТРГ 0,5 вес.дол. (0,35 об.дол). Температурные зависимости $\lambda_c(T)$ для композитов с разным содержанием ТРГ также нетривиальные: наблюдается слабое увеличение λ_c с ростом температуры, за исключением образца с содержанием ТРГ 0,35 об.дол., где $\lambda_c(T)$ имеет сложный характер с максимумом. Мы считаем, что немонотонный характер зависимости λ_c от содержания ТРГ связан с анизотропией теплопроводности частиц ТРГ и их разной угловой ориентацией в композите в зависимости от содержания ТРГ: чем больше ТРГ в КМ, тем более анизотропные образцы ($f(\theta) \to 1$). Пользуясь правилом смесей для теплопроводности беспористого КМ (твердой фазы), состоящего из двух компонент, можно записать:

$$\lambda_{\text{твКМ(с)}} = \left(1-\phi_{\text{Гр}}\right)\lambda_{\text{ЭД}} + \phi_{\text{Гр}}\lambda_{\text{твГр(с)}}, \qquad (4)$$

где $\lambda_{\text{твКМ(с)}}$, $\lambda_{\text{твГр(с)}}$ и $\lambda_{\text{ЭД}}$ — теплопроводности КМ, твердой фазы графита и эпоксидной смолы, соответственно, $\phi_{\text{Гр}}$ — объемная концентрация ТРГ в КМ.

В свою очередь, теплопроводность твердой фазы графита зависит от ориентации графитовых макропластинок в КМ и может быть представлена в виде [2]:

$$\lambda_{\text{тв(с)}} = \left[\lambda_{Mc} f(\theta) + \lambda_{Ma}\left(1-f(\theta)\right)\right]\frac{d}{d_M}, \qquad (5)$$

где λ_{Ma}, λ_{Mc} — предельные значения теплопроводности вдоль оси *a* и *C* для идеального графита, соответственно; $f(\theta)$ — весовая функция (характеризует ориентацию макропластинок графита в полимерной матрице) со следующими свойствами: $f(\theta) = 0{,}5$ для полностью изотропных образцов, и $f(\theta)$ увеличивается от 0,5 до 1 при возрастании анизотропии образцов (θ — это средний угол между графитовыми плоскостями в макропластинке графита и осью пресования).

Теплопроводность твердой фазы графита имеет фононный характер (электронная составляющая теплопроводности в графите пренебрежимо мала ввиду низкой концентрации свободных носителей тока по сравнению с металлами) и может быть описана в рамках теории Дебая соотношением:

$$\lambda = AC_p uL, \qquad (6)$$

где A — геометрический множитель, C_p — теплоемкость решетки, L — средняя длина свободного пробега фононов, u — скорость распространения упругих волн.

Исследуемые образцы, как видно из табл. 2, имели достаточно большую пористость P, и реально их теплопроводность λ_c будет значительно меньше, чем даст соотношение (6), то есть при всех оценках теплопроводности пористых образцов необходимо учитывать следующее соотношение [2]:

$$\lambda_c = \lambda_{\text{тв}}\left(1-3\frac{P}{2+P}\right), \qquad (7)$$

где $\lambda_{\text{тв}}$ – теплопроводность твердой фазы.

В нашей предыдущей работе [4] при использовании правила смесей (4) и учете различной ориентации анизотропных макропластинок графита в КМ были рассчитаны значения $\lambda_{\text{твКМ(с)}}$ для беспористых образцов, и соответственно используя (7) — реальные значения $\lambda_{\text{КМ(с)}}$ для КМ заданной пористости. Было обнаружено небольшое расхождение экспериментальной и расчетной кривой, что может быть связано с различной угловой ориентацией макропластинок графита в чистом компактированном ТРГ и в КМ ТРГ-ЭД20 при одинаковом объемном содержании ТРГ, то есть функция $f(\theta)$ в КМ ТРГ-ЭД20 может быть другой в сравнении с чистым ТРГ. Небольшое изменение в ориентации частиц графита в эпоксидной матрице и достаточно высокая пористость образцов ТРГ-ЭД20 могут приводить к достаточно сложному характеру зависимости теплопроводности от содержания ТРГ в композите.

В данной работе, используя правило смесей (5) и учтя ориентационную модель (6), а также температурные коэффициенты теплопроводности

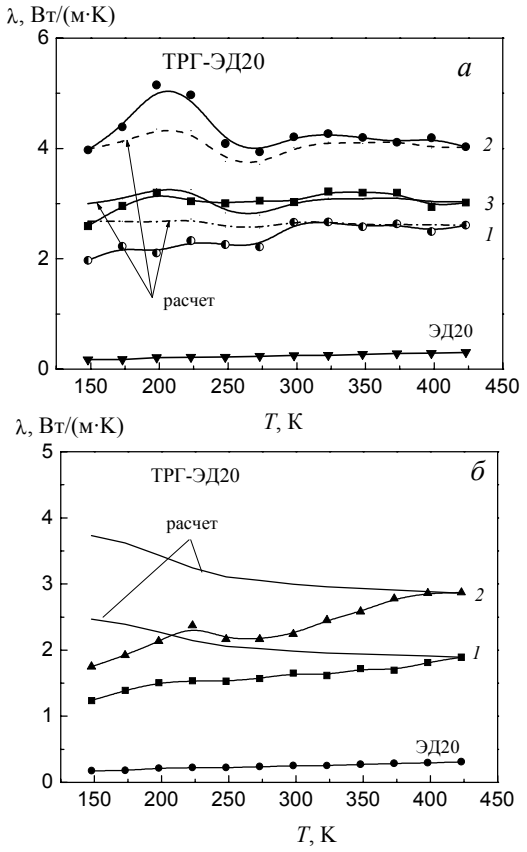

Рис. 4. Рассчитанные и экспериментальные температурные зависимости теплопроводности для образцов с содержанием ТРГ 0,4 – 0,75 вес.долей (*а*) и для образцов с содержанием ТРГ 0,05 и 0,1 вес.долей (*б*).

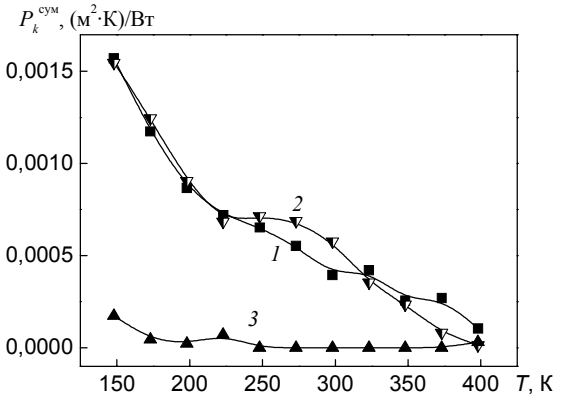

Рис. 5. Температурная зависимость суммарного контактного теплового сопротивления для образцов КМ ТРГ-ЭД20 с разным содержанием ТРГ, вес. долей: *1* — 0,05; *2* — 0,1; *3* — 0,4.

$\lambda_c(T)/\lambda_c$(293 К) чистого ТРГ при различной ориентации графитовых частиц, мы рассчитали температурные зависимости теплопроводности для КМ ТРГ-ЭД20 — $\lambda_{расч}(T)$. Как видно из рис.4*а*, *б*, наблюдается неплохое совпадение экспериментальных результатов с расчетными для образцов с большим содержанием ТРГ, и несовпадение для образцов с низкой концентрацией ТРГ. Это, с нашей точки зрения, связано с тем, что контактное тепловое сопротивление для образцов с большим содержанием ТРГ не такое большое, как для образцов с небольшими концентрациями ТРГ. Используя полученные данные, мы рассчитали суммарное контактное тепловое сопротивление для образцов с низким содержанием ТРГ.

Расчет суммарного контактного теплового сопротивления $P_k^{сум}$ проводился с использованием полученной нами формулы (8):

$$P_k^{сум} = P_k n = \frac{1}{\lambda_{гр}}\left(\frac{\lambda_{гр} h}{\lambda_{эф}} - h\right) n =$$

$$= \frac{H}{\lambda_{гр}^{расч}} \cdot \left(\frac{\lambda_{гр}^{расч}}{\lambda_{эф}^{эксп}} - 1\right), \qquad (8)$$

где $\lambda_{гр}^{расч}$ — рассчитанная и $\lambda_{эф}^{эксп}$ — измеренная теплопроводности КМ, n — число контактов (макропластинок графита) в единичном столбце КМ вдоль оси C, h — толщина макропластинки графита, H — высота образца (толщина таблетки).

Как видно из рис.5, суммарное контактное тепловое сопротивление между частицами ТРГ в КМ уменьшается при возрастании температуры, что связано с увеличением площади теплового контакта и давления на контакт.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что величина теплопроводности композитов ТРГ-полимер увеличивается пропорционально содержанию ТРГ в интервале температур 150 – 423 К. Определено влияние модификации ТРГ никелем (Ni) на тепловые свойства композитов ТРГ-полимер.

2. Предложена модель для описания температурных зависимостей теплопроводности композитов ТРГ-полимер, которая базируется на модели смесей с учетом анизотропии теплопроводности частиц ТРГ и их угловой ориентации в композите, причем при описании температурных зависимостей теплопроводности композитов с низким содержанием ТРГ (< 0,1 вес.дол.) необходимо также учитывать тепловое контактное сопротивление между частицами ТРГ и наличие полимерных прослоек в местах контакта.

Литература

1. Aiping Yu., Palanisamy Ramesh, Itkis M. E., Bekyarova E., Haddon R.C.. Graphite Nanoplatelet-Epoxy Composite Thermal Interface Materials. Journ. Of Phys. Chemistry, 2007, v. 111, p. 7565 – 7569.
2. Bonnissel M., Luo L., Tondeur D. Compacted exfoliated natural graphite as heat conduction medium. Carbon. 2001, v. 39, p. 2151 – 2161.
3. Vovchenko L., Matzui L., Tzaregradska T., Stelmakh O. Influence of graphite type on electrical and thermal properties of composite materials graphite-organic compound. Composites Sci. and Techn. 2003, v. 63, no. 6, p. 807 – 812.
4. Celzard A., Mareche J.F., Furdin G. Modelling of exfoliated graphite Progress in Materials Science, 2005, v. 50, no. 1, p. 93 – 179.
5. Vovchenko L.L., Matzui L.Yu., Kulichenko A.A. Thermal Characterization of Expanded Graphite and Its Composites. Inorg. Mater. 2007, v. 43, no. 6, p. 597 – 600.
6. Matzui L, Vovchenko L, Kapitanchuk L, Zakharenko M, Babich M. C-Co Nanocomposite Materials. Inorg. Mat. 2003; v. 39, no. 11, p. 1147 – 1153.

Вовченко Людмила Леонтьевна — Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. Специалист в области физики твердого тела.

Куличенко Александра Андреевна — Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, стажер-исследователь. Специалист в области физики твердого тела.

Мацуй Людмила Юрьевна — Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией. Специалист в области физики твердого тела.