

Е. И. Жмуриков<sup>1</sup>, И. В. Савченко<sup>2</sup>, С. В. Станкус<sup>2</sup>, L. Tecchio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

<sup>3</sup> Laboratori Nazionali di Legnaro – Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Legnaro, Italy

E-mail: evg.zhmurikov@gmail.com

## ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАФИТОВЫХ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ КОНВЕРТОРА НЕЙТРОННОЙ МИШЕНИ\*

Проведены измерения теплофизических характеристик промышленных графитов, традиционно используемых в ядерной технике, таких как МПГ или SGL Carbon Group, а также впервые синтезированного графитового композита на основе изотопа углерода  $^{13}\text{C}$ . Измерения проводились в диапазоне температур от комнатной до 1 400 °С методом лазерной вспышки на установке LFA-427 фирмы «Netzsch» (Германия). Эти результаты сопоставлены с полученными ранее данными рентгеноструктурного анализа и высокоразрешающей электронной микроскопии и могут быть использованы в тепловых расчетах конструкции графитовой мишени нейтронного конвертора с использованием программы ANSYS.

*Ключевые слова:* теплопроводность, теплоемкость, графит, изотоп графита  $^{13}\text{C}$ .

### Введение

Продолжение работ по получению высокоинтенсивных радиоактивных пучков (РИП) включает в себя реализацию в ближайшее время установок второго поколения: SPIRAL-II (GANIL, Франция) и SPES (LNL, Италия). Обе установки обещают получение широкого диапазона интенсивных и стабильных радиоактивных пучков. В них используется двухступенчатая схема получения РИП. Первичный пучок (протоны в SPES и дейтроны в SPIRAL-II) с энергией до 50–100 МэВ и средней мощностью до 200 кВт направляется в конвертор нейтронной мишени [1; 2], где производит интен-

сивный (до  $3 \cdot 10^{14} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ) поток быстрых нейтронов. Поток нейтронов попадает на горячую толстую мишень деления, изготовленную из соединений  $^{238}\text{U}$ . Продукты деления диффундируют из мишени при высокой температуре, ионизируются и после разделения по массам направляются в экспериментальную зону.

Наиболее привлекательным вариантом нейтронной мишени представляется мишень с рабочей зоной из графита с повышенным содержанием изотопа углерода  $^{13}\text{C}$ . Такая мишень может охлаждаться собственным тепловым излучением и при энергии протонов исходного пучка до 50 МэВ дает в 3–10 раз больший выход нейтронов, чем мишень

---

\* Работа была поддержана и проводилась в рамках проекта МНТЦ 3682.

Авторы благодарят Сергея Васильевича Цыбулю, Владимира Романовича Белослудова, Леонида Александровича Боярского, а также Павла Владимировича Логачёва за неизменное внимание к работе и полезные консультации.

на основе природного изотопа  $^{12}\text{C}$ . Последнее обстоятельство обусловило необходимость исследования электронной структуры и физических свойств впервые синтезированного композита на основе  $^{13}\text{C}$ .

С этой целью были проведены также теплофизические измерения графитовых композитов, традиционно используемых в ядерной технике, таких как мелкозернистый плотный графит марки МПГ-6 Новочеркасского электродного завода или тонкозернистый графит от SGL Group (The Carbon Company).

### Экспериментальная часть

*Методика эксперимента.* Измерение теплопроводности  $\lambda$  в области высоких температур является сложной задачей, поскольку трудно корректно учесть теплообмен образца с окружающей средой. В этой ситуации коэффициент теплопроводности можно найти по результатам измерения температуропроводности  $a$  материала (для чего не требуется измерения тепловых потоков), а также данных по теплоемкости  $C_p$  и плотности  $\rho$ , используя соотношение:

$$\lambda = a \rho C_p \quad (1)$$

Как правило, данные по  $C_p$  и  $\rho$  имеют гораздо более высокую точность, чем данные по температуропроводности, поэтому погрешность определения  $\lambda$  практически совпадает с погрешностью определения температуропроводности  $a$ .

Экспериментальные исследования температуропроводности графитов проводились методом лазерной вспышки на автоматизированном экспериментальном стенде LFA-427 фирмы «Netzsch»<sup>1</sup>. К основным достоинствам стенда относятся: широкий интервал температур, доступный для измерений (25...2000 °C); возможность исследовать различные классы твердых материалов; малые размеры образца (толщина – 0,1...6 мм, диаметр – 6...12 мм); возможность работать в вакууме (до  $10^{-5}$  Торр), окислительной и защитной (Ar, He) атмосферах; широкий диапазон измерений величины температуропроводности (0,01...10 см<sup>2</sup>/с); высокая (2...5 %) точность и производительность измерений; наличие автоматизиро-

ванной системы управления и обработки данных.

Образец, установленный на игольчатых подставках, помещался в высокотемпературную электропечь с инертной атмосферой (аргон 99,992 об.%). Нижняя поверхность образца нагревалась импульсом длительностью 0,8 мс от Nd: YAG лазера с длиной волны 1,064 мкм. Изменение температуры верхней поверхности образца регистрировалось ИК-детектором (InSb), который охлаждался жидким азотом.

Перед нагревом рабочий объем и объем нагревателя вакуумировались ( $10^{-2}$  Торр) и несколько раз промывались аргоном, чистота которого составляла 99,998 об.%, а основными примесями являлись: O<sub>2</sub> – 0,0001 %; N<sub>2</sub> – 0,0005 %; H<sub>2</sub>O – 0,0004 %; CO<sub>2</sub> – 0,00002 %; CH<sub>4</sub> – 0,0001 %; H<sub>2</sub> – 0,0001 %.

*Образцы.* Исследовались образцы графитов марок МПГ-6 и SGL, а также впервые синтезированного углеродного композита на основе изотопа  $^{13}\text{C}$ . Свойства графитов марки SGL и МПГ-6 можно найти в проспектах производителей<sup>2</sup>, свойства композита на основе  $^{13}\text{C}$  приведены в работе [3].

Образцы имели форму цилиндров диаметром 12,6 мм и толщиной около 2,5 мм с плоскопараллельными шлифованными торцами. Дополнительное покрытие для увеличения поглощения лазерного излучения не наносилось. Масса образцов измерялась на аналитических весах AND GH 300 с погрешностью менее 0,3 мг, диаметр – электронным штангенциркулем Kraftool с погрешностью 0,03 мм, толщина – электронным длинномером Tesa Digico 10, который проверялся по образцовым мерам непосредственно перед измерениями, с погрешностью порядка 1 мкм. Плотность образцов при комнатной температуре определялась путем прямых измерений геометрических размеров и массы и составила в среднем величину 1,78, 1,82 и 1,24 г/см<sup>3</sup> для образцов МПГ-6, SGL и композита на основе изотопа  $^{13}\text{C}$  соответственно.

<sup>2</sup> SGL Group. The Carbon Company. Проспект и каталог продукции. URL: [http://www.sglgroup.com/cms/international/products/product-groups/gs/index.html?\\_locale=en](http://www.sglgroup.com/cms/international/products/product-groups/gs/index.html?_locale=en); МЭЗ. Проспект и каталог продукции. Графит МПГ-6, свойства. URL: <http://www.graphitel.ru/index.php?id=363&PHPSESSID=cbc14cf17b69258ebd940eb6d8a57fe6>

<sup>1</sup> NETZSCH-Geratebau GmbH. Метод лазерной вспышки в широком интервале температур (LFA427). URL: <http://www.ngb-ta.ru/ru/products/detail/pid,24.html>

Перед началом экспериментов образцы МПГ-6 и SGL были дегазированы в вакууме ( $10^{-5}$  Торр) при температуре  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение часа. Образцы композита  $^{13}\text{C}$  (2 шт.) не дегазировались.

Апробация установки проводилась на стандартных образцах РОСО графита, инконеля и пирокерама. Они показали, что отличие от табулированных данных лежит в пределах  $0,5\text{...}2,0\%$ . Вариации длительности и амплитуды лазерного импульса также приводят к  $1\text{...}2\%$  изменению результатов. Это связано с тем, что при комнатной температуре резко падает чувствительность детектора, и для уменьшения погрешности измерений необходимо увеличивать энергию, закачиваемую в образец. Комплекс проведенных метрологических исследований позволил сделать вывод о том, что инструментальная погрешность LFA-427 при определении температуропроводности твердых образцов не превышает  $2,0\text{...}5\%$ .

Технические характеристики и программное обеспечение установки LFA-427 позволяет также определять удельную теплоемкость веществ. Измерения теплоемкости в этом случае являются относительными и требуют наличия эталонов. При этом погрешность измерений в существенной степени зависит от точности данных для этало-

на. В качестве эталонных материалов для расчета теплоемкости графитов использовались образцы графита марки РОСО, а также молибдена. На эталонные образцы молибдена напылялся слой графита для обеспечения близости степени черноты поверхностей эталонов и исследуемых образцов. Оцениваемая погрешность измерений составляет  $3\text{--}6\%$ .

## Результаты теплофизических измерений

Измерения температуропроводности образцов проводились с использованием держателей из спеченного оксида алюминия и графитовой крышки. На рис. 1 приведены данные по температурной зависимости температуропроводности графитов.

Видно, что температуропроводность МПГ-6 и SGL существенно уменьшается с ростом температуры – до 5 раз, а композита на основе  $^{13}\text{C}$  существенно меньше – в 2 раза. Кроме того при низких температурах  $\alpha$  МПГ-6 и SGL на порядок превосходит температуропроводность композита на основе  $^{13}\text{C}$ .

Следует заметить, что при расчете теплоемкости, когда в качестве эталонного мате-

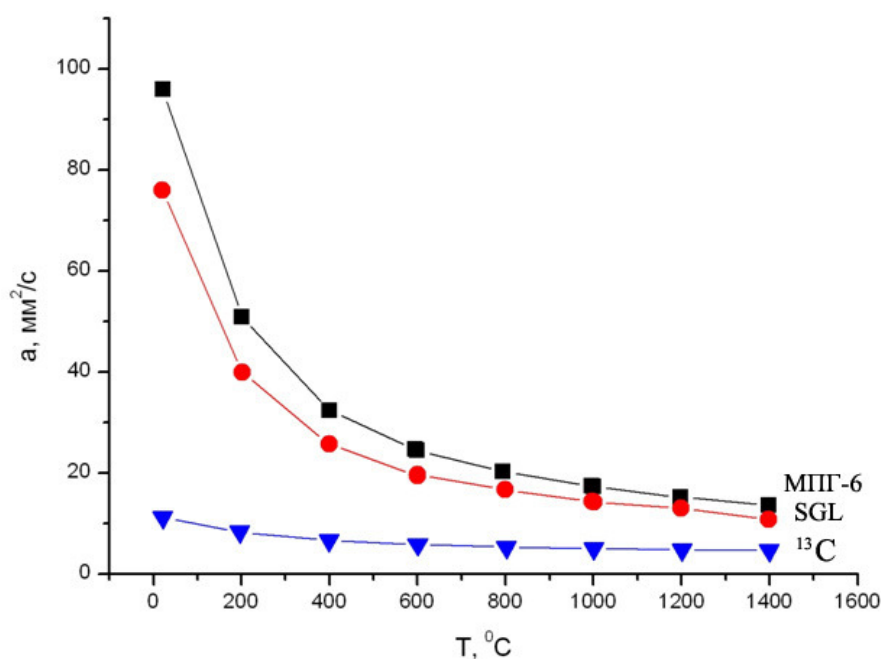


Рис. 1. Температурная зависимость температуропроводности графитов. Измерения температуропроводности графитов проводились методом лазерной вспышки на автоматизированном экспериментальном стенде LFA-427 фирмы «Netzsch»

риала использовался молибден, учитывался только интервал температур до 800 °С. Это связано с тем, что при более высоких температурах молибден начинал реагировать с графитовым покрытием. Результаты измерений теплоемкости приведены на рис. 2. Видно, что в отличие от температуропроводности, во всем температурном интервале теплоемкости всех исследованных графитов совпадают между собой и со справочными данными для РОСО графита [4].

Используя полученные результаты и соотношение (1) можно рассчитать температурную зависимость коэффициента теплопроводности графитов. Из (1) видно, что для проведения расчета требуются данные по температурной зависимости плотности образцов, последние определялись через относительное тепловое удлинение РОСО графита марки АХМ-5Q [5] и измеренную плотность графитов при комнатной температуре. Погрешность рассчитанных значений не превышает 0,15–0,20 % при 1 400 °С.

На рис. 3 представлены результаты расчета температурной зависимости теплопроводности графитов. Видно, что в отличие от температуропроводности температурная зависимость теплопроводности МПП-6 и CGD является слабо нелинейной, а теплопроводность композита на основе <sup>13</sup>С практически не изменяется с температурой.

### Обсуждение результатов

*Механизм теплопереноса.* К настоящему времени достоверно установлено, что перенос тепла в кристаллическом графите во всем температурном диапазоне осуществляется главным образом фононами, а не носителями заряда [6]. Исключением является только область низких температур, примерно до 10 К, где вклад электронов в теплопроводность по результатам измерений в поперечном магнитном поле может достигать 40 %. Многочисленные эксперименты по измерению константы в соотношении Видемана – Франца также показали, что число Лоренца графитов примерно в сто раз выше его классического значения [7]. Высокая теплопроводность графита, обусловленная переносом энергии за счет фононов, очень сильно зависит от степени упорядоченности решетки [8]. Чем выше упорядоченность структуры, тем выше теплопроводность графита, особенно в направлении

базисных плоскостей, при этом будет более заметна и анизотропия свойств.

Так, для монокристаллов графита отношение значений теплопроводности в направлениях, параллельном и перпендикулярном базисным плоскостям (коэффициент анизотропии  $k$ ), может достигать 6 для камберлендского или канадского графита. Для пирографита коэффициент анизотропии  $k$  теплопроводности находится в пределах 100÷800<sup>3</sup>.

При сравнительно низких температурах ( $T$ ) передача тепла происходит в основном за счет фононов, однако при высоких температурах в теплопереносе могут принимать участие носители заряда, особенно для графитов с невысокой степенью упорядоченности решетки [8. С. 25].

Согласно [9], теплопроводность, связанная с фононами, растет при низких температурах пропорционально теплоемкости. Для кристаллического (и близкого к нему по свойствам пиролитического графита) зависимость теплоемкости от температуры в области температур ниже 83 К близка к квадратичной [6] или даже к линейной при несколько более высоких температурах [7]. В то же время в области температур, где теплоемкость пропорциональна  $T^2$  температурный рост коэффициента теплопроводности в графитах следует в основном закону  $\lambda \sim T^{2+x}$ , где  $x$  может находиться в пределах от 0,4 до 0,7. Этот эффект называется тепловой аномалией и связан с особенностями фононного спектра графита, в частности с наличием так называемой «изгибной» ветви колебаний, обусловленной анизотропией кристалла [7]. При более высоких температурах, когда теплоемкость достигает своего предельного значения, любая зависимость теплопроводности от температуры в графите связана преимущественно с изменением длины свободного пробега фононов.

За температурную зависимость теплопроводности графитов при высоких температурах практически полностью отвечает фонон-фононное взаимодействие и процессы переброса [10. С. 267], а также рассеяние фононов на границах кристаллитов, неоднородностях структуры и дефектах решетки [7; 11; 12]. Динамика решетки кристалла,

<sup>3</sup> ХиМиК. Сайт о химии. Графит. URL: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1145.html>

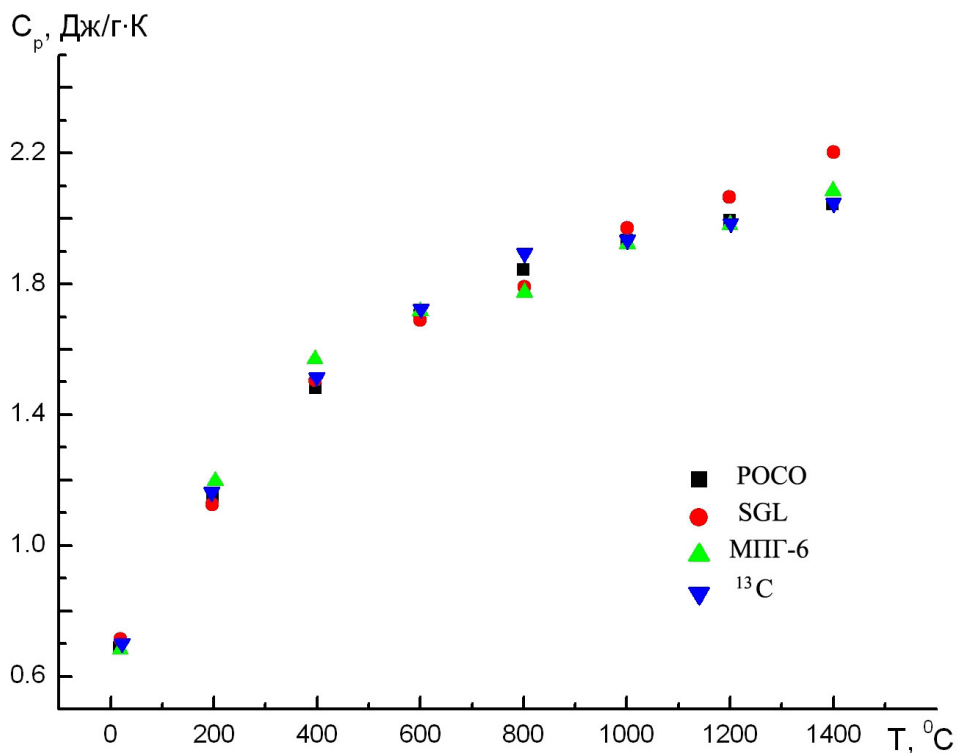


Рис. 2. Температурная зависимость теплоемкости графитов. Измерения температуропроводности графитов проводились методом лазерной вспышки на автоматизированном экспериментальном стенде LFA-427 фирмы «Netzsch» с использованием графита марки POCO в качестве эталона

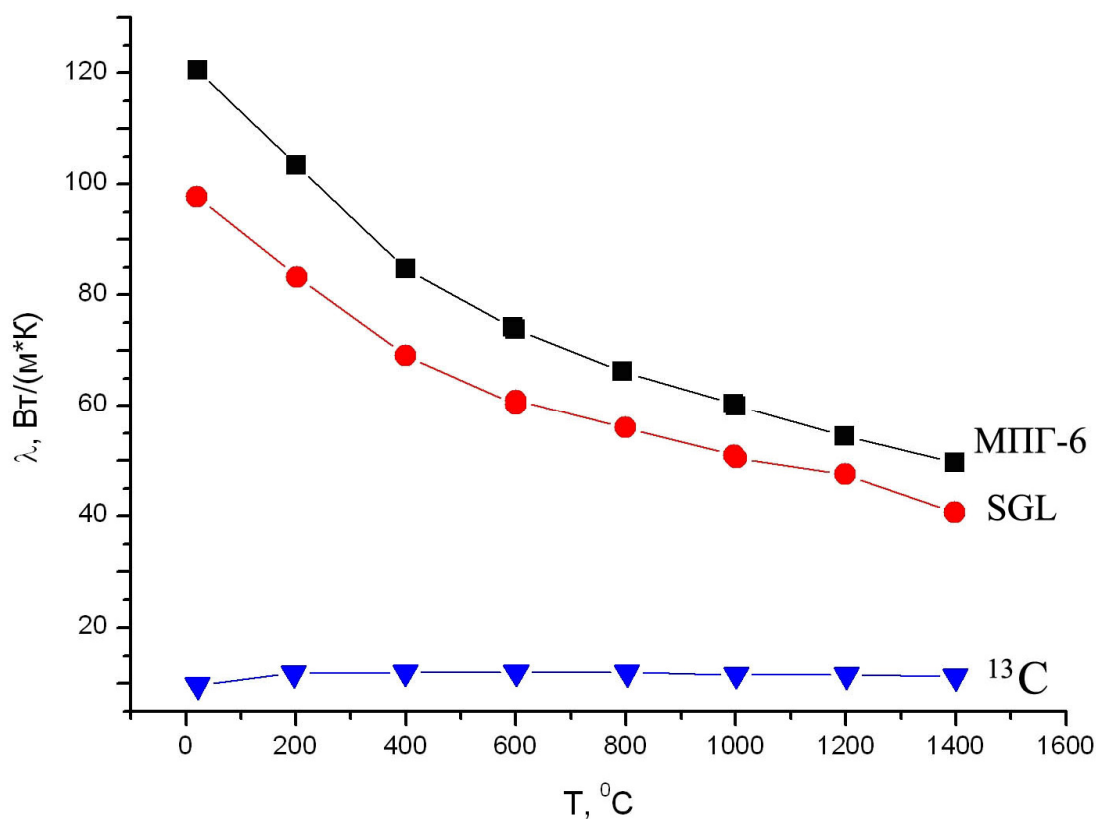


Рис. 3. Температурная зависимость теплопроводности графитов, рассчитанная из измерений по температуропроводности графитовых композитов

в котором учитывается фонон-фононное взаимодействие, очень сложна, но в конечном результате оказывается, что длина свободного пробега фононов обратно пропорциональна абсолютной температуре:

$$l_f \sim T^{-1} \quad (2)$$

Следовательно, при высоких температурах теплопроводность, обусловленная фононами, обратно пропорциональна температуре.

Кинетическое уравнение для фононной теплопроводности в случае графита, согласно [11; 12], может быть переписано в виде

$$\lambda = A \rho C_p v l_f f(\epsilon) f(\varphi) \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность;  $C_p$  – теплоемкость;  $v$  – скорость фононов;  $f(\epsilon)$  и  $f(\varphi)$  – факторы, учитывающие пористость и текстуру графита;  $A$  – геометрический фактор.

До температур 120–140 К, согласно [12], фонон-фононное взаимодействие пренебрежимо мало, и длина свободного пробега фононов определяется, главным образом, рассеянием энергии на границах кристаллитов. Из этого следует, что до температур 120–140 К длина свободного пробега фононов остается величиной постоянной и равной среднему размеру бездефектных областей в материале. В этом интервале теплопроводность, как уже было сказано, возрастает пропорционально теплоемкости.

При возрастании температуры и включении все более жестких мод фононных колебаний уменьшение длины свободного пробега фононов  $l_f$  за счет фонон-фононного взаимодействия начинает преобладать над увеличением числа фононов, что приводит к появлению максимума на температурной зависимости теплопроводности.

Для хорошо графитированных материалов этот максимум соответствует 300–400 К, для материалов с меньшим совершенством кристаллической структуры максимум смещается в область более высоких температур. Для графитов с так называемой мелкокристаллической или турбостратной структурой, где размер бездефектных областей мал ( $L_a \leq 20\text{--}30\text{Å}$ ), длина свободного пробега  $l_f$  также мала, определяется размерами кристаллитов и не зависит от температуры. Температурная зависимость теплопроводности в данном случае не имеет максимума и лишь незначительно возрастает пропорционально изменению теплоемкости, оставаясь на весьма низком уровне по абсолютной величине.

В общем случае длину свободного пробега фононов, согласно [12. С. 109], можно записать в виде

$$1/l_f = 1/l_1 + 1/l_2 \quad (4)$$

где  $l_1$  – средний пробег фононов, определяемый фонон-фононным взаимодействием, и обратно пропорциональный температуре;  $l_2$  – средний пробег, не зависящий от температуры и обусловленный рассеянием на границах кристаллитов и дефектах кристаллического строения.

*Особенности кристаллической структуры исследуемых графитов.* Исследование структуры и электронного строения графитовых композитов – как традиционных, так и на основе изотопа  $^{13}\text{C}$ , проводилось ранее методами высокоразрешающей электронной микроскопии на просвет (HRTEM), рентгеновской дифракции, рентгеновской флуоресцентной спектроскопии, комбинационного рассеяния и т. д. [3; 13–16]. Было показано, в частности, что достаточно совершенная кристаллическая структура графитов типа МПГ радикально отличается от мелкокристаллической, турбостратной структуры графитов на основе изотопа углерода  $^{13}\text{C}$ .

В частности, в случае композита на основе изотопа  $^{13}\text{C}$  использование фенолформальдегидной резольной смолы в качестве биндера и относительно невысокая температура окончательной стадии графитизации ( $\leq 2\ 200\text{ °C}$ ) приводит к структуре, морфологически схожей со структурой стеклоуглерода [17]. Макромолекулярная, полиэдрическая структура стеклоуглерода детально проанализирована в [12. С. 208].

Просвечивающая электронная микроскопия показала [3], что размер области когерентного рассеяния (ОКР) в композитах на основе  $^{13}\text{C}$  составляет величину порядка  $100\text{ Å}$ , длина когерентности, по данным электрофизических измерений, также составляет около  $150\text{ Å}$ . Таким образом, средний размер микрокристаллитов может быть оценен величиной  $100\text{--}150\text{ Å}$ . Представляется, что в данном случае так же точно, как и в случае стеклоуглерода, резкое снижение теплопроводности связано с тем, что длина свободного пробега фононов  $l_f$  ограничена размером микрокристаллитов и не зависит от температуры (см. рис. 3).

*Фононный характер теплопроводности.* Согласно [3], концентрация носителей заряда в углеродном композите на основе изотопа

па  $^{13}\text{C}$ , по данным измерений эффекта Холла, не превышает  $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , примерно такова же или даже ниже концентрация носителей заряда в мелкозернистом графите марки МПГ-6. Это почти на четыре порядка меньше чем в меди, например. В то же время [9. С. 249] для стандартного металла соотношение Видемана – Франца

$$\lambda / \sigma T = \pi^2/3 \cdot (k_B/e)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/Ом} \cdot \text{К}^2 \quad (5)$$

Эта универсальная постоянная называется числом Лоренца. Используя данные по проводимости [3; 14] и полученные нами данные по теплопроводности углеродных композитов (см. рис. 3) несложно убедиться, что число Лоренца в нашем случае не менее чем в сто раз превышает таковое для обычных металлов. Последнее обстоятельство позволяет говорить о том, что фоновый вклад является доминирующим во всем диапазоне температур измерения в процессах, связанных с теплопереносом как в традиционных углеродных композитах, так и в композитах на основе изотопа  $^{13}\text{C}$ .

В настоящее время опубликован ряд работ [18; 19], где рассматривается влияние изотопного эффекта на теплопроводность графитов. Так, в работе [19] методами молекулярной динамики было показано, что в графеновом слое теплопроводность, связанная с фононами, может уменьшаться до 80 % при случайном замещении атомов углерода  $^{12}\text{C}$  на атомы изотопа  $^{13}\text{C}$ . Наибольшее уменьшение будет иметь место, если общая концентрация замещающих атомов изотопа  $^{13}\text{C}$  составит примерно половину от общего количества атомов углерода в графеновом слое.

Данные по теплопроводности традиционных графитов, таких как SGL или МПГ-6, практически не отличаются от справочных данных производителя. В измеряемом диапазоне температур нет оснований сомневаться, что монотонное падение теплопроводности с температурой связано прежде всего с фонон-фононным взаимодействием, а также с рассеянием фононов на границе кристаллитов и в ограниченной области межкристаллитного пространства.

## Заключение

Проведены измерения теплофизических характеристик как промышленных графитов, так и впервые синтезированного графи-

та на основе изотопа углерода  $^{13}\text{C}$  в диапазоне температур от комнатной до  $1400^\circ\text{C}$ . Эти данные сопоставлены с полученными ранее рентгеноструктурными данными и результатами высокоразрешающей электронной микроскопии. Показано, что во всех случаях процессы теплопереноса в графитах обусловлены фононами. Эти данные могут быть использованы в тепловых расчетах конструкции нейтронного конвертора с использованием программы ANSYS.

## Список литературы

1. Alyakrinsky O., Avilov M., Bolkhovityanov D., Esposito J., Fadev S. et al. High Power Neutron Converter for Low Energy Proton / Deuteronbeams // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2006. Vol. 557. P. 403–413.
2. Avilov M. S., Tecchio L. B., Titov A. T., Tsybulya V. S., Zhmurikov E. I. Design of the 50 kW Neutron Converter for SPIRAL2 Facility // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2010. Vol. 618. P. 1–15.
3. Романенко А. И., Аникеева О. Б., Горбачев Р. В. и др. Новый материал на основе изотопа углерода  $^{13}\text{C}$  для нейтронных мишеней // Неорганические материалы. 2005. Т. 41, № 5. С. 531–539.
4. Taylor R. E., Groot H. Thermophysical properties of POCO graphite // High Temp. – High Press. 1980. Vol. 12. P. 147–160.
5. Touloukian Y. S., Kirby R. K., Taylor R. E., Lee T. Y. R. Thermal Expansion Nonmetallic Solids // Thermophysical Properties of Matter. 1977. Vol. 13. P. 75–78.
6. Лутков А. И., Волга В. И., Дымов Б. К. и др. Тепловые и электрические свойства пиролитического графита // Неорганические материалы. 1972. Т. 8, № 8. С. 1409–1416.
7. Абдуллаев Н. А., Сулейманов Р. А., Алджанов М. А. и др. О роли изгибных колебаний в процессе теплопереноса в кристаллах // ФТТ. 2002. Т. 44, вып. 10. С. 1775–1779.
8. Мармер Э. Н. Углеродные материалы. М.: Металлургия, 1973.
9. Анималу А. Квантовая теория кристаллических твердых тел. М.: Мир, 1981. 574 с.
10. Займан Дж. Электроны и фононы / Пер. с англ. В. Л. Бонч-Бруевича. М., 1962. 488 с.
11. Берман Р. Теплопроводность твердых тел. М.: Мир, 1979. 286 с.

12. *Островский В. С., Виргильев Ю. С., Костиков В. И., Шипков Н. Н.* Искусственный графит. М.: Металлургия, 1986. 272 с.

13. *Жмуриков Е. И., Романенко А. И., Булушева Л. Г.* и др. Исследования электронной структуры и свойств композитов на основе изотопа углерода  $^{13}\text{C}$  // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2007. № 11. С. 29–35.

14. *Жмуриков Е. И., Романенко А. И., Анисеева И. П.* и др. Влияние высоких температур на электрические свойства и макроструктуру углеродных композитов // *Неорганические материалы.* 2006. Т. 41, № 6. С. 676–683.

15. *Жмуриков Е. И., Романенко А. И., Логачев И. П.* и др. Высокотемпературные испытания мелкозернистого плотного графита с целью прогноза времени жизни конвертора нейтронной мишени // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2007. № 2. С. 5–8.

16. *Жмуриков Е. И., Болховитянов Д. Ю., Блинов И. П.* и др. К вопросу о долговечности реакторных графитов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2010. № 5. С. 89–99.

17. *Бубненко И. А., Сорокин А. И., Котосонов А. С.* и др. Особенности графитации углерода на основе изотопа  $^{13}\text{C}$  // *Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология.* 2010. Т. 53, вып. 10. С. 64–68.

18. *Plekhanov V. G.* Lattice Dynamics of Isotope-Mixed Crystals // *Phys. Usp.* 2003. Vol. 46. P. 689–784.

19. *Zhang H., Lee G., Fonseca A. et al.* Isotope Effect on the Thermal Conductivity of Graphene // *Journal of Nanomaterials.* 2010. Article ID 537657. URL: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2010/537657.html>

*Материал поступил в редакцию 10.10.2010*

**E. I. Zhmurikov, I. V. Savchenko, S. V. Stankus, L. Tecchio**

#### **THERMOPHYSICAL PROPERTIES MEASUREMENTS OF GRAPHITE COMPOSITES FOR THE NEUTRON TARGET CONVERTER**

Measurements thermophysical characteristics are carried out for the industrial graphites traditionally used in nuclear engineering, such as MPG-6 or SGL from Carbon Group, and for the first synthesized graphite composite on the basis of an isotope of carbon  $^{13}\text{C}$ . Measurements were carried out in a range of temperatures from room up to 1 400 °C by a method of laser flash on installation LFA-427 of firm Netzsch (Germany). These results are compared to the received earlier data of the X-Ray analysis and high-resolution electron microscopy and can be used in thermal calculations of a design of a graphite target of the neutron converter with use of program ANSYS.

*Keywords:* heat conductivity, a thermal capacity, graphite, an isotope of graphite  $^{13}\text{C}$ .