

## Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 53.06

Научная специальность ВАК – 1.3.8. Физика конденсированного состояния  
<https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12809>

## К анализу анизотропной тепло- и температуропроводности терморасширенного графита

Д. А. Прохоров<sup>1,2</sup>, М. Г. Рыбин<sup>3</sup>, С. М. Зуев<sup>1,2✉</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет», проспект Вернадского, 78, Москва 119454, Российская Федерация

<sup>2</sup>ГНЦ РФ ФГУП НАМИ – Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт, ул. Автомоторная, 2, Москва 125438, Российская Федерация

<sup>3</sup>ООО «РУСГРАФЕН», проспект Биологов, 15, Московская обл., г.о. Серпухов, п. Оболенск 142279, Российская Федерация

### Аннотация

**Цель статьи:** В данной статье исследована анизотропная температуропроводность фольги из терморасширенного графита (TEG) с помощью флэш-метода и проведено сравнение его структуры с плёнкой из многослойного оксида графена (GO). Продемонстрирована морфология, дифрактограмма и профилометрия поверхностей TEG и GO, произведённого по двум различным технологическим процессам – изготовление TEG осуществлялось из интеркалированного графита методом термолиза, а GO методом отслаивания оксида графита в микроволновой печи (MEGO).

**Экспериментальная часть:** Исследовано распределение температуры в образце TEG в результате непрерывного воздействия лазерного излучения и проведено последующее сравнение результатов с аналогичными образцами из меди и алюминия.

**Выводы:** Описана перспективность применения TEG в задачах теплопередачи.

**Ключевые слова:** двумерная аллотропная модификация углерода, графен, терморасширенный графит, анизотропия, охлаждение

**Для цитирования:** Прохоров Д. А., Рыбин М. Г., Зуев С. М. Анизотропная тепло- и температуропроводности терморасширенного графита. Конденсированные среды и межфазные границы. 2025;27(2): 284–292. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12809>

**For citation:** Prokhorov D. A., Rybin M. G., Zuev S. M. Analysis of anisotropic heat and thermal diffusivity of thermally expanded graphite. Condensed Matter and Interphases. 2025;27(2): 284–292. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2025.27/12809>

✉ Зуев Сергей Михайлович, e-mail: sergei\_zuev@mail.ru

© Прохоров Д. А., Рыбин М. Г., Зуев С. М., 2025



## 1. Введение

Целью исследования является измерение анизотропных физических свойств TEG, в частности тепло- и температуропроводности, и его практическое применение. Полученная структура TEG сравнивалась со структурой GO, которая также была изучена в настоящей работе. Jackie Renteria и соавт. [1] проводили исследования ортотропии GO, в ходе которых была установлена существенная разница значений коэффициента теплопроводности GO 61 Вт/(м·К) в направлении плоскости и 0.09 Вт/(м·К) в перпендикулярном (вертикальном) направлении. Дальнейшее уменьшение содержания кислорода в GO с помощью высокотемпературной обработки до температуры плюс 1000 °C в теоретических расчётах приводит к величине коэффициента теплопроводности порядка 500 Вт/(м·К). Графен превосходит по своим теплофизическим свойствам такие металлы как медь и алюминий, что обеспечивает его применяемость в таких теплоотводящих конструкциях как радиаторы воздушного и жидкостного охлаждения.

Массовое производство GO в настоящее время осуществляется такими химическими методами как осаждение из газовой фазы и последующее осаждение графена на подложку, окисление графита и последующее восстановление из оксида графена в жидкости, применение поверхностно-активных веществ (ПАВ) при расслоении графита и др. Исследуемый GO был изготовлен с использованием модифицированного метода Хаммерса ООО «ГРАФЕНОКС» [2]. Толщина изготовленного GO составляла около 10 мкм.

Массовое производство TEG, исследуемого в работе, осуществлялось ООО «Силур» из интеркалированного графита методом термолиза. В качестве исходного материала использовался природный, явнокристаллический (крупночешуйчатый) графит, в межслоевое пространство которого внедрялись сульфит-ионы (интеркаланты) в присутствии серной кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Далее окисленный графит подогревали со скоростью нагрева не менее 600 °C/с для выделения газообразных продуктов разложения H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. В процессе терморасширения интеркалированного графита происходило увеличение размеров кристаллитов графита вдоль одного направления более чем в 300 раз. Полученный TEG прокатывали в тонкие пленки с поддержанием анизотропии до толщины 0.3 и 1.5 мм.

В статье также приведено сравнение морфологии боковой поверхности изготовленного TEG

и GO, в отличии от работы Teddy Tite и соавт. [3], где рассматривалась морфология графеновых нанопластин от 1 до 20 нм только фронтальной поверхности, не позволяющая определить качество наложения слоёв графена.

Измерение шероховатости боковой поверхности TEG и GO проводилась методом оптической профилометрии.

Измерение температуропроводности производилось фланш-методом, в котором возрастание температуры образца измеряется в зависимости от времени с помощью инфракрасного детектора кадмий-ртуть-теллур (МСТ).

Для получения дифрактограмм применялся рентгенодифрактометрический метод с одинаковыми условиями съёмки и щелями – как со стороны рентгеновской трубки, так и со стороны детектора устанавливавшая щель Соллера.

Практические исследования проводились на основании результатов достижения максимальной температуры в образцах меди и алюминия, а также образца, образованного после прессования слоёв TEG. Изменение температуры образцов, достигавшиеся воздействием лазерного излучения, непрерывно регистрировалось тепловизором на протяжении всего эксперимента.

Известно, что сверхвысокие давления оказывают воздействия на межатомные расстояния в кристаллической решётке графена. Взаимосвязь параметра Грюнайзена с теплопроводностью описывается формулой Лейбфрида-Шлемана (1):

$$\chi = \frac{3}{10\pi^3} \frac{k_B^3 M a \theta_D^3}{h^3 \gamma^2 T}, \quad (1)$$

где  $\chi$  – коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)),  $\theta_D$  – температура Дебая (К),  $k_B$  – постоянная Больцмана ( $1.381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К),  $M$  – молекулярный вес (кг),  $h$  – постоянная Планка ( $6.626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с),  $a$  – параметр кристаллической решётки (м),  $T$  – температура (К),  $\gamma$  – параметр Грюнайзена.

Однако стоит отметить, что параметр Грюнайзена целесообразнее воспринимать как совокупность акустического  $\gamma_{ak}$ , упругого  $\gamma_{up}$  и термодинамического  $\gamma_{tg}$  факторов, значения которых в сумме дают различие в показаниях от 10 до 15 %. Численные значения для данных параметров представлены в работе Беломестных В. Н. и соавт. [4] и доступны для вычисления по формулам (2–4):

$$\gamma_{ak} = \frac{9}{2} \frac{x^2 - \frac{4}{3}}{x^2 + 2}, \quad (2)$$

где  $\gamma_{\text{ак}}$  – акустический параметр Грюнайзена,  $x$  – параметр, характеризующий отношение скорости распространения продольных упругих волн к поперечным.

$$\gamma_{\text{уп}} = \frac{3}{2} \frac{1+\sigma}{2-3\sigma}, \quad (3)$$

где  $\gamma_{\text{уп}}$  – упругий параметр Грюнайзена,  $\sigma$  – коэффициент Пуассона.

$$\gamma_{\text{tg}} = \frac{\alpha V}{\beta_{\text{tg}} C_V}, \quad (4)$$

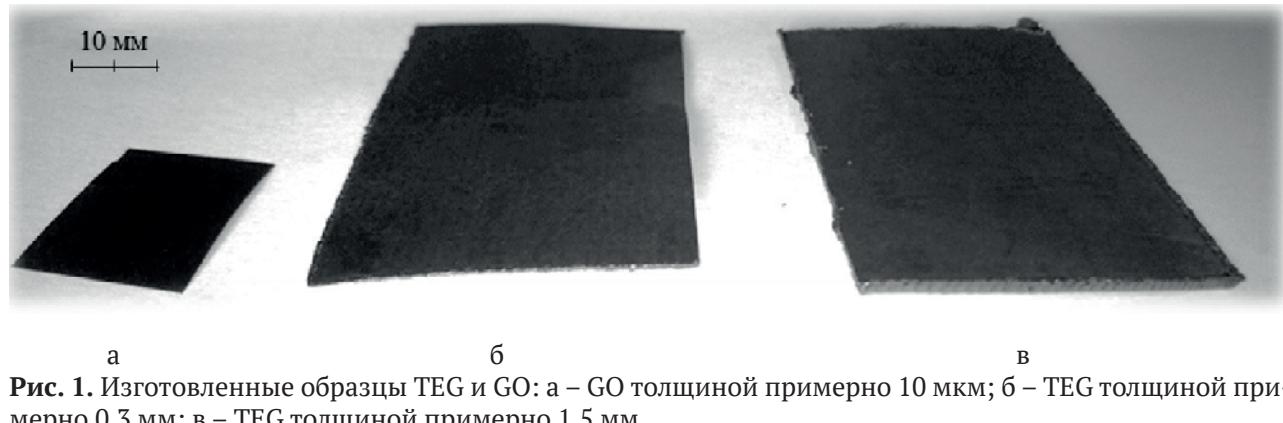
где  $\gamma_{\text{tg}}$  – термодинамический параметр Грюнайзена,  $\alpha$  – коэффициент теплового расширения (1/К),  $\beta_{\text{tg}}$  – объёмная сжимаемость (1/Па),  $C_V$  – удельная теплоёмкость при постоянном объёме (Дж/К).

В ходе работ по прессованию поликристаллического графена, изготовленного методом химического восстановления оксида графита [5], было установлено, что без учитывания его анизотропных свойств, коэффициент теплопроводности составляет около 59 Вт/(м·К) (при давлении прессования до 44 МПа). Макроскопически наиболее явно анизотропия проявляется в мо-

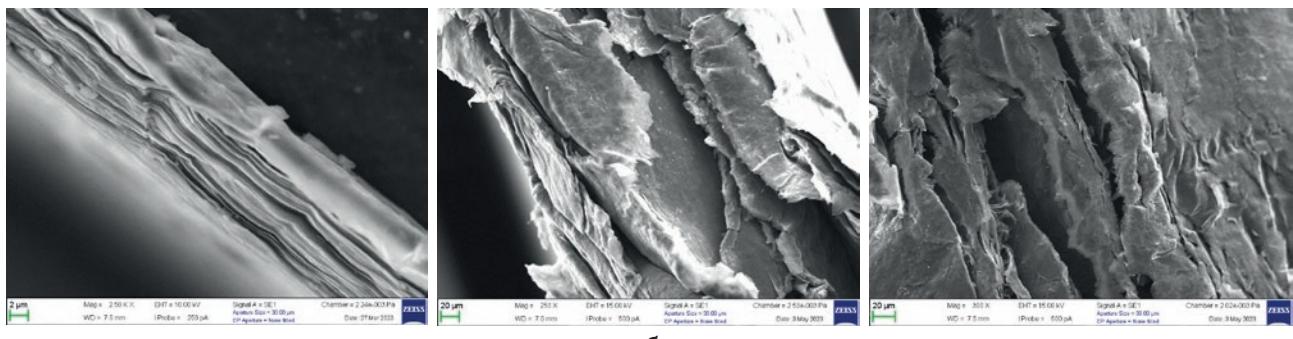
нокристаллах, однако может наблюдаться и в поликристаллах, например, наиболее стабильная для нитрида бора гексагональная кристаллическая решётка (*h*-BN) имеет слоистую структуру с анизотропной теплопроводностью, находящейся в пределах от 200 до 500 Вт/(м·К) в направлении плоскости [6] и до 30 Вт/(м·К) во внешней плоскости направлении [7].

Изображения в плоскости сечения исследуемых образцов TEG и GO, представленных на рис. 1, создавались методом сканирующей электронной микроскопии с помощью сканирующего электронного микроскопа AURIGA CrossBeam. Как видно из рис. 2, образец GO имеет более ориентированное расположение слоёв, что способствует изучению его анизотропных свойств. Однако, ввиду малой толщины образца (около 10 мкм), не представляется возможным измерить температуропроводность фланш-методом (по крайней мере с помощью анализатора LFA 467 HyperFlash) ввиду его малой толщины. По этой причине дальнейшие измерения температуропроводности, в том числе с учётом анизотропии, проводились на образце TEG.

Для TEG измерение температуропроводности в направлении плоскости проводилось фланш-



**Рис. 1.** Изготовленные образцы TEG и GO: а – GO толщиной примерно 10 мкм; б – TEG толщиной примерно 0.3 мм; в – TEG толщиной примерно 1.5 мм



**Рис. 2.** Морфология боковой поверхности изготовленных образцов TEG и GO: а – GO толщиной примерно 10 мкм; б – TEG толщиной примерно 0.3 мм; в – TEG толщиной примерно 1.5 мм

методом на анализаторе LFA 467 HyperFlash при различных температурах. В отличии от методов горячей охранной зоны (GHP), греющих плит (HFM) или термостимулированного тока (TCT), флэш-метод (LFA) позволяет проводить точнейшие измерения температуропроводности образца в области наибольших значений.

Шероховатость поверхности в плоскости сечения исследуемых образцов определялась такими параметрами как: среднее арифметическое из абсолютных значений отклонений поверхности от базовой плоскости  $R_a$ , среднеквадратичное значение высот поверхности (RMS)  $R_q$ , средняя максимальная высота профиля (среднее значение из десяти максимумов и десяти минимумов поверхности)  $R_z$  и максимальная высота поверхности (расстояние между максимумом и минимумом поверхности)  $R_t$ . Создание и визуализация шероховатости поверхности осуществлялась оптическим профилометром WYKO NT 1100 бесконтактным методом – методом оптической профилометрии.

Дифрактограммы исследуемых образцов с шагом 1.2 угловой минуты, представленные на рис. 3, были получены рентгенодифрактометрическим методом при использовании рентгеновского дифрактометра ДРОН-8. Со стороны рентгеновской трубы устанавливалась щель Соллера и экваториальная щель 0.5 мм, а со стороны детектора – щель Соллера, экваториальная щель 0.05 мм и никелевый бета-фильтр.

Для проведения практических исследований распределения температуры в образцах была собрана установка с управляемым полупроводниковым лазером, структурная схема которой

изображена на рис. 4. В устройстве установлены сегментарные индикаторы величины тока, протекающего через полупроводниковый лазер, напряжения на нём, рассеивающей электрической мощности и температуры в пятне лазера. В установке главным управляющим устройством является микроконтроллер с технологией управления питанием (picoPower). В качестве связующего устройства микроконтроллера с персональным компьютером использовался преобразователь интерфейсов USB-UART с интегрированным тактовым генератором и схемой начального сброса при включении питания (Power-On Reset), выполненный на базе микросхемы. Для измерения величины протекающего через лазер тока и напряжения на нём использовался аналого-цифровой преобразователь. Величина тока, протекающего через лазер, была постоянной и составляла 1 А при напряжении 4.6 В. Для измерения температуры в пятне лазера (поверхности образца) помимо термопары использовался тепловизор Fluke Ti125.

## 2. Экспериментальная часть

Измерение коэффициента температуропроводности  $\alpha$  образца TEG производилось установлением образца в кювету, нижняя поверхность которой нагревалась импульсами длительностью 0.6 мс лучистой энергией 10 Дж, создаваемыми ксеноновой лампой. Кювета, изготовленная из алюминия, предназначалась специально для слоистых образцов или композитов с возможностью измерения температуропроводности в разных направлениях. В последствии из многослойной модели кювета-образец с помо-

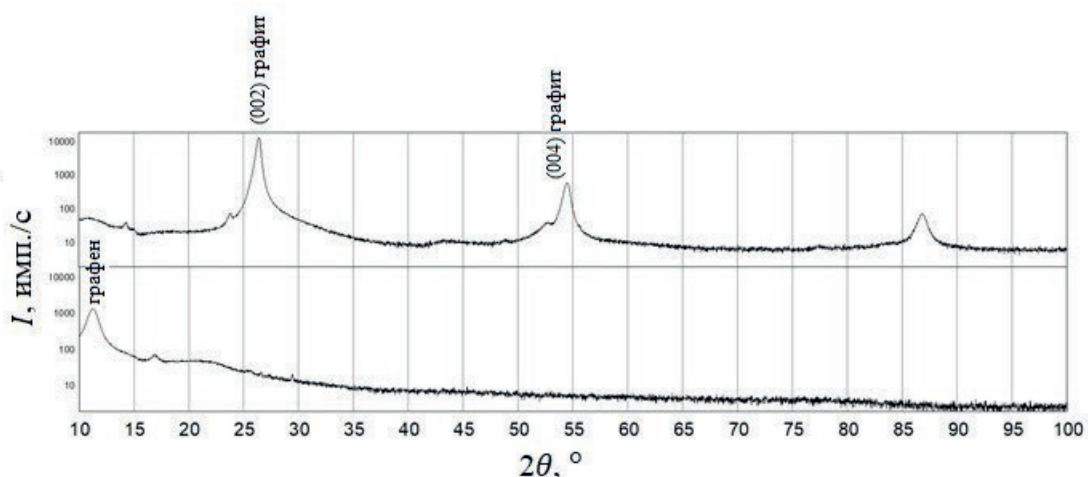
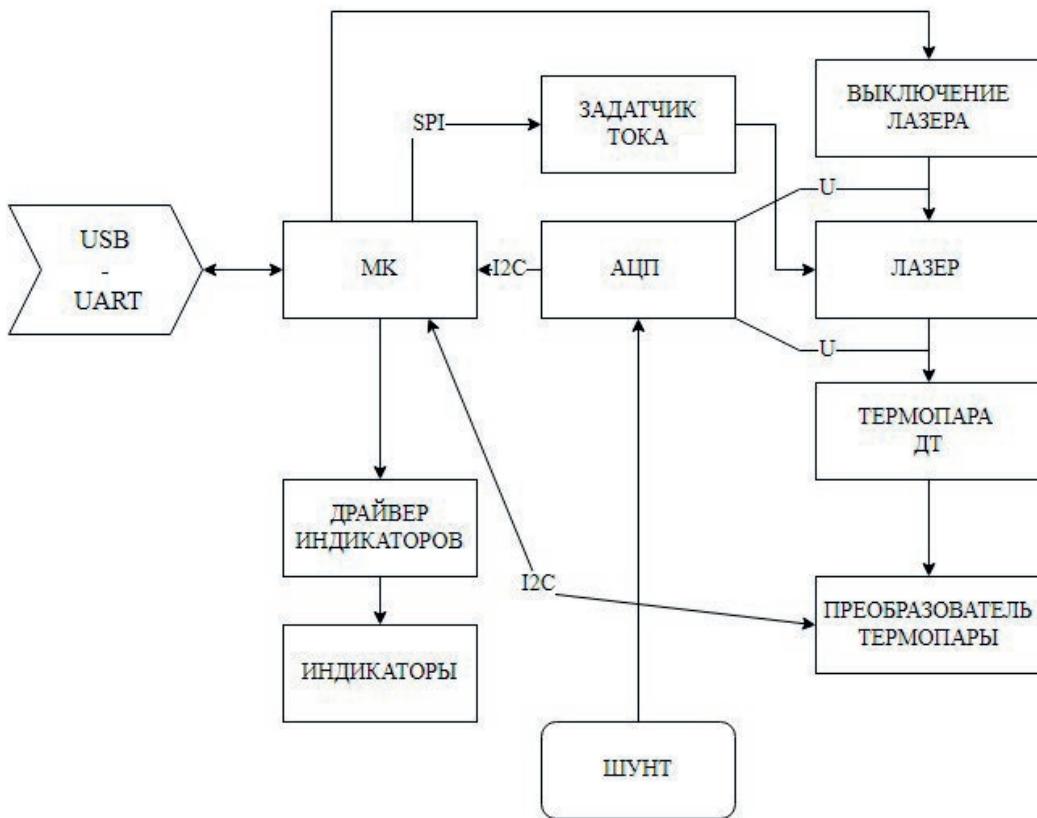


Рис. 3. Дифрактограммы изготовленных образцов TEG и GO: сверху – TEG; снизу – GO



**Рис. 4.** Структурная схема установки с управляемым полупроводниковым лазером

щью программного обеспечения Netzsch Proteus проводилось выделение коэффициента температуропроводности образца. Программное обеспечение позволяет провести корректировку в соответствии с потерями тепла и изменения расстояния от ксеноновой лампы до образца внутри измерительной камеры. Измерения проводились после терmostатирования образца в течение 60 минут при постоянной температуре +25 °C, +100 °C и +150 °C. Интервал времени между импульсами (выстрелами)  $\tau$  составлял 7 минут, а их число составляло от 10 до 20 с целью получения среднего значения измеряемой величины. Плотность образцов  $\rho$  определялась после предварительного терmostатирования образца в вакууме путём прямых измерений геометрических размеров образца и его массы. Теплоёмкость определялась методом дифференциальной сканирующей калориметрии с помощью калориметра DSC 204 F1, в котором как образец, так и эталон (графит марки AXM-5Q) поддерживаются при равной и постоянной температуре. Величина коэффициента теплопроводности вычислялась по формуле 5 при допущении гомогенной системы:

$$\chi(T) = \alpha(T) \cdot \rho(T) \cdot C_p(T). \quad (5)$$

Здесь  $\rho$  – плотность образца (кг/м<sup>3</sup>),  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности (м/с<sup>2</sup>),  $C_p$  – удельная теплоёмкость при постоянном давлении (Дж/(кг·К)).

Исходя из дифрактограмм, изображённых на рис. 3, можно приближённо оценить размеры кристаллитов образцов по формуле Шерпера (6):

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}, \quad (6)$$

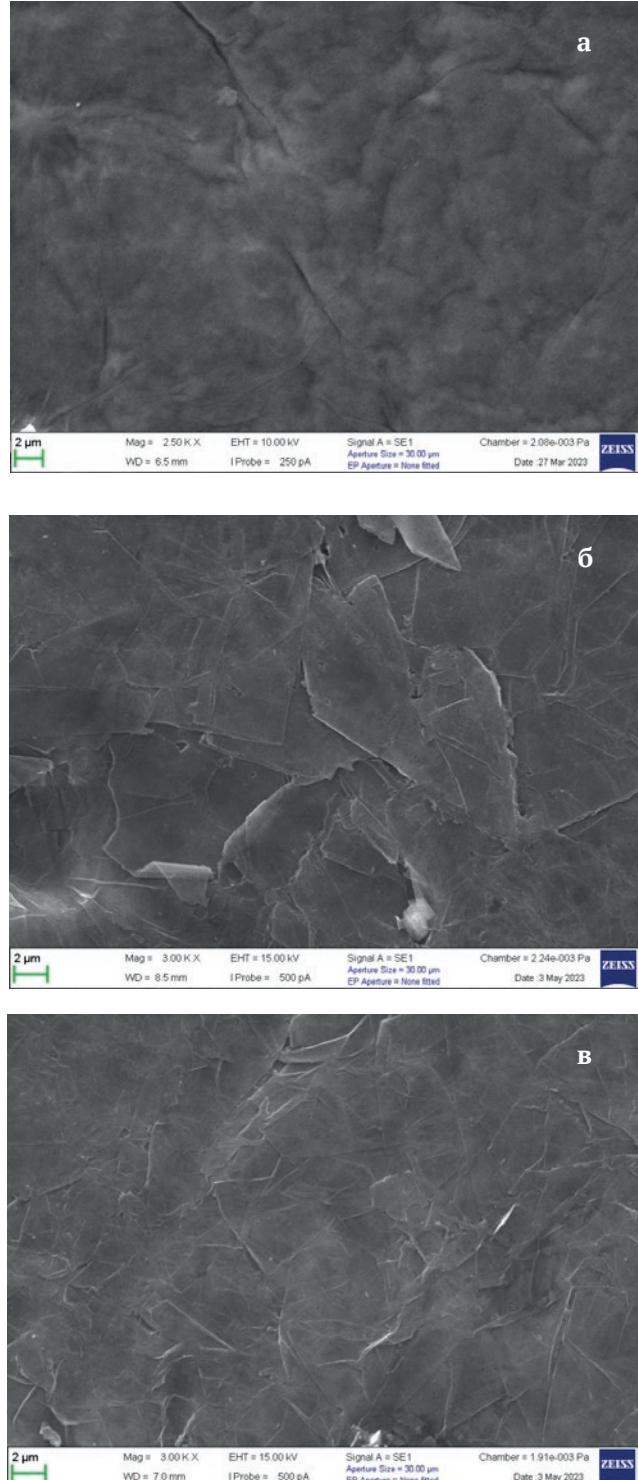
где  $d$  – средний размер областей когерентного рассеяния кристаллитов (нм),  $k$  – коэффициент формы частицы образца,  $\lambda$  – длина волны рентгеновского излучения (нм),  $\beta$  – ширина рефлекса на полувысоте (°),  $\theta$  – угол дифракции (°).

Методом сканирующей электронной микроскопии можно установить не только ориентированность слоёв, как было показано на рис. 2, но и подтвердить его поликристаллическую структуру. Для изготовленных образцов была исследована морфология фронтальной поверхности образцов, характерные размеры кристаллитов,

Д.А. Прохоров и др. К анализу анизотропной тепло- и температуропроводности терморасширенного графита

полученных данным методом, которые также представлены на рис. 5.

Для проведения практических исследований распределения температуры в образце



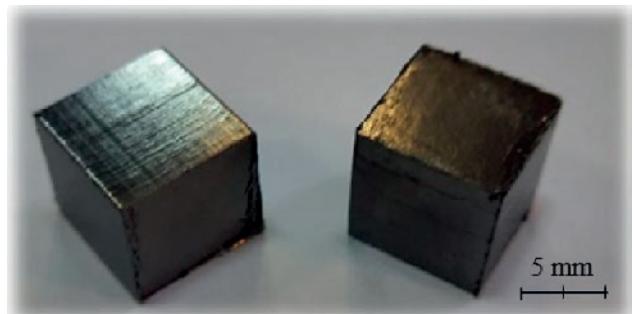
**Рис. 5.** Морфология фронтальной поверхности изготовленных образцов TEG и GO: а – GO толщиной примерно 10 мкм; б – TEG толщиной примерно 0.3 мм; в – TEG толщиной примерно 1.5 мм

была применена установка с управляемым полупроводниковым лазером. Образец TEG предварительно был спрессован под давлением 300 МПа до кубической формы со стороной 1.5 см. Прессование производилось на гидравлическом прессе путём однократного воздействия на 105 слоёв образца, что неизбежно приводило к уплотнению слоёв и изменению параметра Грюнайзена  $\gamma$ , а, следовательно, и коэффициента теплопроводности  $\chi$ . Полученный образец, изображённый на рис. 6, помещался на расстоянии 10 см от источника излучения, как показано на рис. 7. После 30 секунд непрерывного воздействия лазерного излучения на образец фиксировалось максимальное значение его температуры. При большем значении коэффициента теплопроводности  $\chi$  и температуропроводности  $\alpha$  образца достигается большая максимальная температура  $T_{\max}$ . Для сравнения полученных результатов применялись также два аналогичных по форме и размеру образца из меди и алюминия.

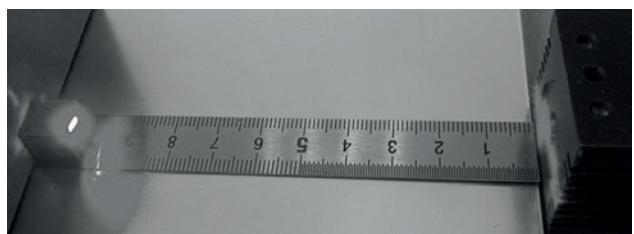
### 3. Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены результаты измерений и расчётов физических свойств исследуемого образца TEG.

Увеличение температуры таких металлов как медь, алюминий и серебро от +27 до +127 °C при-



**Рис. 6.** Внешний вид спрессованного при давлении 300 МПа образца TEG



**Рис. 7.** Условия эксперимента по исследованию распределения температуры в образцах при воздействии на них лазерного излучения

**Таблица 1.** Результаты измерения физических свойств исследуемого образца TEG

$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha$ , мм <sup>2</sup> /с	$\chi$ , Вт/(м·К)	$T$ , °С
990	$116.75 \pm \delta_\alpha$	$622.8 \pm \delta_\gamma$	плюс 25
	$81.94 \pm \delta_\alpha$	$597.4 \pm \delta_\gamma$	плюс 100
	$66.37 \pm \delta_\alpha$	$642.6 \pm \delta_\gamma$	плюс 150

\*  $\delta_\alpha$  – относительная погрешность измерения температуропроводности 3 % [8] или ± 8 % [9]

\*\*  $\delta_\gamma$  – относительная погрешность измерения теплопроводности 4 % [8,10] или 10.5 % [9,11], рассчитанная, исходя из суммарной погрешности по формуле (5) при пренебрежимо малой погрешности измерении плотности (около 0.2 %)

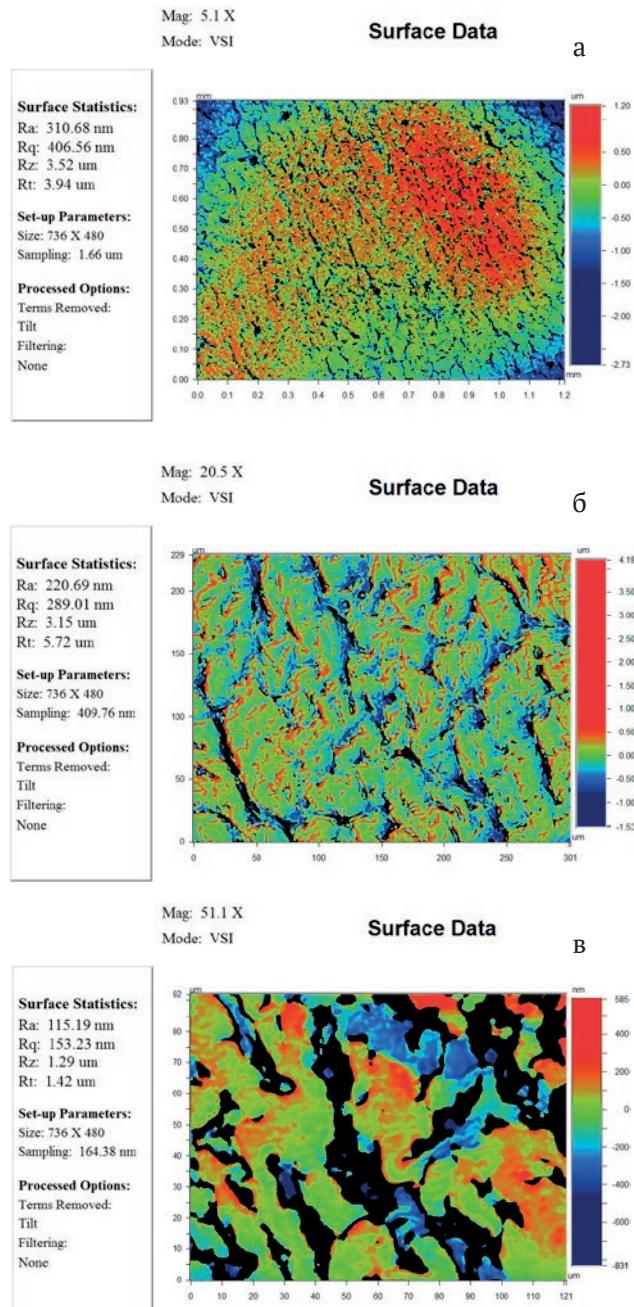
водит к уменьшению коэффициента теплопроводности на 2 % [12, с. 70] для меди и на 1.3 % [12, с. 76] для серебра, но к увеличению коэффициента теплопроводности на 1 % [12, с. 108] для алюминия. Как видно из табл. 1, увеличение температуры TEG при почти аналогичных температурах (от +25 до + 150 °С) приводит к увеличению теплопроводности на 3 %, однако стоит отметить, что для получения качественной зависимости температуры от коэффициента теплопроводности TEG необходимо увеличить число проведённых измерений до нескольких десятков. В среднем, в исследуемом диапазоне температур теплопроводность образца TEG почти на треть превышает теплопроводность серебра. Стоит отметить, что изменение температуропроводности TEG в исследуемом диапазоне температур выражено более ярко. При увеличении температуры меди, алюминия и серебра от + 27 до +127 °С их температуропроводность снижается на 5 % [12, с. 70], 2 % [12, с. 76] и 0.2 % [12, с. 108] соответственно, тогда как у TEG происходит на 43 % при почти аналогичных температурах.

Шероховатость боковой поверхности спрессованного образца TEG, двумерные изображения рельефа которой представлены с различными разрешениями на рис. 8, не требует дальнейшей обработки перед использованием в задачах теплопередачи.

Измерение морфологии поверхностей TEG и GO позволило определить поликристаллическую структуру с границами раздела кристаллитов.

В табл. 2 приведены результаты расчётов по дифрактограммам образцов TEG и GO, изображённым на рис. 3. Образец TEG имеет пик вблизи 26.55° (рис. 3), соответствующий фазе графита с ориентацией (002) [14], а пик вблизи 54.69° с ориентацией (004). Пики в областях от 23° до

25° и от 42° до 45° могут соответствовать как фазе графита, так и графена. Дифрактограмма образца GO имеет один интенсивный пик в области угла 11°. Исходя из более ранних исследований дифрактограмм графена [15–17], можно сделать вывод, что дифрактограмма образца TEG соответствует дифрактограмме графита, но достоверно нельзя сказать и об отсутствии в нём графена. Дифрактограмма образца GO соответ-



**Рис. 8.** Шероховатость боковой поверхности спрессованного образца TEG с различными разрешениями: а – 5.1 X; б – 20.5 X; в – 51.1 X

**Таблица 2.** Результаты расчётов по дифрактограммам исследуемых образцов

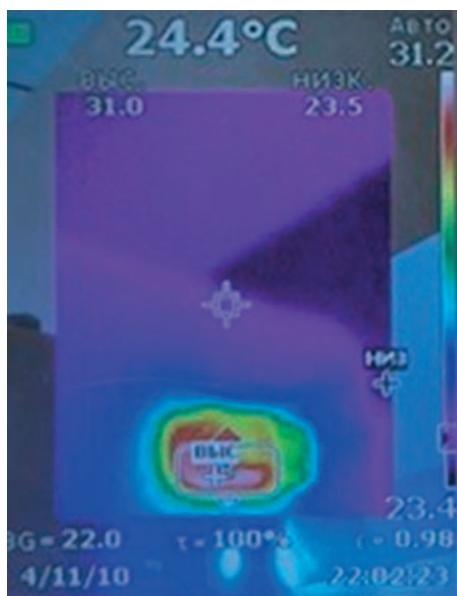
Образец	<i>K</i>	<i>a</i> , нм	$2\theta, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	<i>d</i> , нм
рис. 2б	0.94	$0.1541 \pm \Delta_\alpha$	$26.41 \pm \Delta_\theta$	0.4356	19.57
рис. 2а	0.94	$0.1541 \pm \Delta_\alpha$	$11.24 \pm \Delta_\theta$	1.2644	6.59

\*  $\Delta_\alpha$  – абсолютная погрешность измерения параметра кристаллической решётки 0.0001 нм [13]

\*\*  $\Delta_\theta$  – абсолютная погрешность измерения угла дифракции 0.01 % [13]

стует дифрактограмме графена, причём без содержания графита.

При исследовании распределения температуры в образце спрессованного TEG при непрерывном воздействии лазерного излучения была получена термограмма, изображённая на рис. 9. В результате непрерывного воздействия лазерного излучения за 30 секунд была зафиксирована максимальная температура в данном образце плюс 31.2 °C, тогда как в аналогичных образцах, изготовленных из меди и алюминия, она составляла плюс 29.0 °C и плюс 28.4 °C соответственно.



**Рис. 9.** Термограмма распределения температуры в образце спрессованного TEG, при воздействии непрерывного лазерного излучения

#### 4. Выводы

Применение анизотропных свойств TEG в направлении плоскости позволяет на порядок увеличить теплопроводность, что обуславливает его применение как материала, заменяющего медаль в таких конструкциях, как теплораспределительные крышки (IHS), радиаторы охлаждения простейшей формы, термоинтерфейсы (TIM).

В качестве особенностей, ограничивающих применение TEG, целесообразно упомянуть его

как хорошего проводника электрического тока, и проблемы в изготовлении из него сложных по форме конструкций.

Несмотря на то, что ввиду малой толщины (около 10 мкм) для образца GO не представляется возможным измерить температуропроводность флэш-методом (по крайней мере с помощью анализатора LFA 467 HyperFlash) ввиду его малой толщины, однако теплофизические свойства данного образца могут превосходить теплофизическими свойствами образца TEG. Произвести аналогичные измерения образца TEG для образца GO возможно также путём прессования множества GO при высоких давлениях (вплоть до нескольких ГПа).

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

#### Список литературы

- Renteria J. D., Ramirez S., Malekpour H., ... Balandin A. A. Anisotropy of thermal conductivity of free-standing reduced graphene oxide films annealed at high temperature. *Advanced Functional Materials.* 2015;25(2): 4664. <https://doi.org/10.1002/adfm.201501429>
- Shulga Y. M., Baskakov S. A., Baskakova Y. V., ... Kovalev I. D. Supercapacitors with graphene oxide separators and reduced graphite oxide electrodes. *Journal of Power Sources.* 2015;279: 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.01.032>
- Tite T., Chiticaru E. A., Burns J. S., Ionita M. Impact of nano-morphology, lattice defects and conductivity on the performance of graphene based electrochemical biosensors. *Journal of Nanobiotechnology.* 2019;17(101): p. 5. <https://doi.org/10.1186/s12951-019-0535-6>
- Беломестных В. Н., Теслева Е. П. Коэффициент Пуассона и параметр Грюнайзена твердых тел. *Известия Томского политехнического университета.* 2003;306(5): 8–12. EDN: HTNCZD. Режим доступа: <https://elibrary.ru/htnczd>

5. Prokhorov D. A., Zuev S. M. Investigation of the characteristics of a graphene-based thermal interface for cooling integrated microcircuits. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2023;59(2): 155–162. <https://doi.org/10.1134/s2070205123700247>
6. Donghua L., Xiaosong C., Yaping Y., ... Dacheng W. Conformal hexagonal-boron nitride dielectric interface for tungsten diselenide devices with improved mobility and thermal dissipation. *Nature Communications*. 2019;10(1188): 2. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09016-0>
7. Sarkarat M., Lanagan M., Ghosh D., Lottes A., Budd K., Rajagopalan R. Improved thermal conductivity and AC dielectric breakdown strength of silicone rubber/BN composites. *Composites Part C: Open Access*. 2020;2: 100023. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100023>
8. Light-flash-apparatus LFA 467 HyperFlash-Series methods, techniques, applications for temperature and warmth factors. Netzschr. 0823. Available at: [https://analyzing-testing.netzschr.com/\\_Resources/Persistent/3/6/7/f/367f54b9bc7fc3a5b36f6b41191f5dbaf802ecb7/LFA\\_467\\_HyperFlash\\_en\\_web.pdf](https://analyzing-testing.netzschr.com/_Resources/Persistent/3/6/7/f/367f54b9bc7fc3a5b36f6b41191f5dbaf802ecb7/LFA_467_HyperFlash_en_web.pdf)
9. Описание типа средства измерений. Измерители теплофизических параметров модификации LFA 467 HyperFlash/ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 57491-14. 2022.
10. Technical Specifications DSC 204 F1 Phoenix / Netzschr. 0222. Режим доступа: [https://analyzing-testing.netzschr.com/\\_Resources/Persistent/b/8/6/c/b86c2a6637064b1361d580c2bc05367072b194d6/Key\\_Technical\\_Data\\_en\\_DSC\\_204\\_F1\\_Phoenix.pdf](https://analyzing-testing.netzschr.com/_Resources/Persistent/b/8/6/c/b86c2a6637064b1361d580c2bc05367072b194d6/Key_Technical_Data_en_DSC_204_F1_Phoenix.pdf)
11. Описание типа средства измерений. Калориметры дифференциальные сканирующие модификаций DSC 200 F3, DSC 204 F1, DSC 204 HP, DSC 404 C, DSC 404 F1, DSC 404 F3 / ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 54912-13. 2023.
12. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справ. изд., М.: Металлургия. 1989. 384 с.
13. Описание типа средства измерений. Дифрактометры рентгеновские модели ДРОН-8Н и ДРОН-8Т / ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Свидетельство об утверждении типа средств измерений № 82575-21. 2023.
14. Fayos J. Possible 3D carbon structures as progressive intermediates in graphite to diamond phase transition. *Journal of Solid State Chemistry*. 1999;148(2): 278–285. <https://doi.org/10.1006/jssc.1999.8448>
15. Siburian R., Sihotang H., Lumban S. R., Supeno M., Simanjuntak C. New route to synthesize graphene nano sheets. *Oriental Journal of Chemistry*. 2018;34(1): 182–187. <https://doi.org/10.13005/ojc/340120>
16. Fentaw T. E., Worku D. A. Controlled synthesis, characterization and reduction of graphene oxide: a convenient method for large scale production. *Egyptian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2017;4(1): 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2016.11.002>
17. Aftab A., Sadeeq U., Abrar K., ... Qipeng Y. Graphene oxide selenium nanorod composite as a stable electrode material for energy storage devices. *Applied Nanoscience*. 2020;10: 1243–1255. <https://doi.org/10.1007/s13204-019-01204-0>

## Информация об авторах

Прохоров Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры оптико-электронных приборов и систем, МИРЭА - Российский технологический университет, главный специалист ФГУП «НАМИ», (Москва, Российская Федерация).

[prohorovdmmitrii97@yandex.ru](mailto:prohorovdmmitrii97@yandex.ru)

Рыбин Максим Геннадьевич, к. ф.-м. н., заместитель генерального директора по науке, ООО «Русграфен» (Московская обл., г.о. Серпухов, п. Оболенск, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-1529-5326>  
[rybin@rusgraphene.ru](mailto:rybin@rusgraphene.ru)

Зев Сергей Михайлович, к. ф.-м. н., доцент, доцент кафедры оптико-электронных приборов и систем, МИРЭА - Российский технологический университет, начальник управления ФГУП «НАМИ», (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-7033-1882>  
[sergei\\_zuev@mail.ru](mailto:sergei_zuev@mail.ru)

Поступила в редакцию 04.08.2024; одобрена после рецензирования 30.01.2025; принята к публикации 17.02.2025; опубликована онлайн 25.06.2025.