

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

СРАВНЕНИЕ НА ОСНОВЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ТЕРМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ
ГРАФИТА ТРАДИЦИОННЫХ И СОВРЕМЕННЫХ МАРОК¹

© 2022 г. А. В. Костановский^а, *, М. Г. Зеодинов^а, М. Е. Костановская^а, А. А. Пронкин^а

^аОбъединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

*e-mail: Kostanovskiy@gmail.com

Поступила в редакцию 18.01.2022 г.

После доработки 23.02.2022 г.

Принята к публикации 24.02.2022 г.

Впервые выполнено экспериментальное определение термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) конструкционного мелкозернистого графита марки МПГ-7, изготовленного методом прессования в “глухую” матрицу, в диапазоне температуры 1650–2350 К. Реализован метод, при котором температурная диагностика образца проводится вне области измерения ТКЛР. Эксперименты выполнены в стационарном тепловом режиме на образцах, вырезанных перпендикулярно и параллельно направлению прессования графита. Отмечено, что образец, вырезанный перпендикулярно прессованию, имеет более высокие значения ТКЛР, чем образец, вырезанный параллельно прессованию. Это указывает на наличие у графита марки МПГ-7 анизотропии ТКЛР. Проведено сравнение температурных зависимостей термического коэффициента линейного расширения графита марки МПГ-7 с данными, приведенными в литературе для традиционного мелкозернистого графита марки МПГ-6, изготовленного методом прошивного прессования через мундштук. Анализ значений ТКЛР графита марок МПГ-6 и МПГ-7 показал, что они находятся в пределах относительной расширенной неопределенности измерений, равной примерно 17%. Результаты измерений ТКЛР мелкозернистых графитов традиционных марок МПГ-6, МПГ-7 были использованы для сравнения с данными для мелкозернистого изотропного изостатического графита современных марок ГИП-4 и ДЕ-24 в диапазоне температуры 1300–2300 К. При изготовлении графита марок ГИП-4 и ДЕ-24 реализован метод объемного изостатического прессования. Особенностью этого графита является отсутствие анизотропии ТКЛР. Сравнение полученных результатов измерения термического коэффициента линейного расширения мелкозернистых графитов всех рассмотренных марок показало, что изотропные изостатические графиты ДЕ-24 и ГИП-4 характеризуются меньшими значениями ТКЛР по сравнению с мелкозернистыми графитами МПГ-6 и МПГ-7. Сделан вывод о нецелесообразности использования анизотропного графита МПГ-6 и МПГ-7 для изготовления теплоэнергетического оборудования.

Ключевые слова: термический коэффициент линейного расширения, графит, температура, модель абсолютно черного тела, анизотропия

DOI: 10.56304/S0040363622100034

Графит обладает способностью выдерживать высокие температуры и механические нагрузки, а также работать в агрессивной среде, поэтому он широко используется в самых разнообразных отраслях промышленности. Указанные свойства обусловили применение графита и в теплоэнергетике. Из мелкозернистого конструкционного графита марки МПГ-6 (средний размер зерна примерно 0.05 мм), имеющего высокую плотность и низкую пористость, можно изготавливать изделия с тонкими стенками, ребрами, выступами. Для проек-

тирования изделий, предназначенных для эксплуатации при высоких температурах, необходимо знать термический коэффициент линейного расширения графита. Совершенствование свойств графита МПГ-6 привело к появлению мелкозернистого (средний размер зерна примерно 0.03 мм) конструкционного графита МПГ-7, изготовленного методом прессования в “глухую” матрицу. Однако характеристики этого графита еще мало изучены.

Относительно недавно был создан изотропный изостатический графит (марки ГИП-4 и ДЕ-24), ТКЛР которого был измерен авторами данной работы ранее в [1, 2]. Для изготовления этого графита

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23.09.2020).

Характеристики исследованных образцов из графита марки МПГ-7

Образец	Диаметр образца, мм	Длина образца, мм	Диаметр меток, мм	Расстояние между метками*, мм	Диаметр/глубина отверстий АЧТ, мм	Расстояние между центрами моделей АЧТ, мм
1	6.15	29.5	0.80	9.80	0.8/3.9	13.8
2	6.18	30.2	0.78	10.11	0.8/3.9	14.12

* Расстояние между метками определялось при комнатной температуре.

(средний размер зерна около 0.015 мм) использовался метод объемного прессования, особенностью которого является отсутствие анизотропии ТКЛР.

Практический интерес представляет сравнение данных по удлинению графита традиционных (МПГ-6, МПГ-7) и современных (DE-24, ГИП-4) марок. Цель настоящей работы состоит в экспериментальном изучении ТКЛР графита марки МПГ-7 и сравнении полученных результатов по этому показателю с изотропным изостатическим графитом марок DE-24 и ГИП-4.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Стабильность относительного удлинения при циклических термических нагрузках и зависимость ТКЛР от температуры графита марки DE-24 в диапазонах температур $T = 1200\text{--}2300$ К и графита марки ГИП-4 при $T = 1240\text{--}2270$ К были исследованы в [1, 2]. Подробное описание основных элементов установки, системы диагностики и процедуры эксперимента приведено в [1]. В этих работах действительную температуру измеряли с помощью моделей абсолютно черного тела (АЧТ), представляющих собой два отверстия, вырезанных в образцах перпендикулярно их оси вне участка, на котором определяли относительное удлинение. Особенностью эксперимента было и то, что относительное удлинение измеряли с помощью меток в форме сквозных цилиндрических отверстий. В данной работе накопленный ранее опыт был использован для определения зависимости ТКЛР от температуры для графита марки МПГ-7.

Исследуемые в настоящей работе образцы были изготовлены из графита марки МПГ-7 путем их вырезки из одной и той же заготовки перпендикулярно (образец 1) и параллельно (образец 2) направлению прессования. Плотность МПГ-7 составляла 1.8×10^3 кг/м³, средний размер зерна – 0.03 мм, предел прочности на изгиб – 39 МПа, на сжатие – 80 МПа. Образцы представляли собой сплошные стержни (геометрические характеристики образцов представлены в таблице), в центральной части которых на одной образующей перпендикулярно оси были просверлены два сквозных отверстия, которые использовались в качестве меток. Дополнительно в каждом образце

перпендикулярно оси были просверлены два отверстия (модели АЧТ) таким образом, что температурная диагностика была вынесена из области, где измеряли ТКЛР. Геометрическое совершенство² моделей АЧТ обеспечивалось при отношении глубины модели к ее диаметру $3.9/0.8 \approx 4.9$.

Температура измерялась автоматическим оптическим микропирометром, работающим на длине волны 0.65 мкм с диаметром пятна визирования 0.4 мм [1]. Пирометр был откалиброван во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. Действительное значение температуры находили, используя поправки на поглощение в стекле окна камеры. В предварительном эксперименте в образце, подобном исследуемому в данной работе, были сделаны три отверстия: одно – модель АЧТ (такая же, как в основном эксперименте) и два на глубине 8 мм с торцевой поверхности по оси и на расстоянии 0.9 мм от центра. Последние два отверстия позволили рассчитать поправку для температуры, измеряемой моделями АЧТ, обусловленную подсветкой от внешнего нагревателя, и определить градиент температуры по радиусу экспериментального образца для оценки степени совершенства модели АЧТ [3].

Процедура подготовки и проведения эксперимента была одинакова для обоих образцов. Перед экспериментом измеряли их геометрические характеристики, затем взвешивали и отжигали. Образцы по очереди устанавливали горизонтально на подставке в камеру и заполняли ее гелием высокой чистоты. Далее юстировали местоположение образца, фотографировали в холодном состоянии и находили расстояние между центрами меток l_0 . Нагрев образца осуществляли внешним нагревателем, выполненным также из графита.

При заданной скорости изменения температуры $dT/dt = 60$ К/мин образец нагревали до температуры T_{\max} . Для контроля выполнения условия $T = \text{const}$ по длине образца измеряли действительную температуру в моделях АЧТ. На участке с постоянной температурой определяли относи-

² Под геометрическим совершенством модели понимается такое соотношение размеров цилиндрической полости (отношение глубины модели к ее диаметру), когда в условиях изотермичности ее эффективная излучательная способность равняется 0.995.

тельное удлинение. Затем многократно (не менее 5 раз) фотографировали образец с периодом 5 мин. Предварительной обработкой фотографий устанавливали так называемое время выдержки t_{delay} , при котором расстояние между метками переставало изменяться (стабилизировалось). Это время составило более 30 мин. Фотографии, сделанные при $t > t_{delay}$ (не менее пяти фотографий при каждом значении T_{max}), были в дальнейшем использованы для нахождения расстояния между метками $l_{T_{max}}$ (стационарный тепловой режим). Далее образец охлаждали с заданной скоростью изменения температуры, выдерживали при $T = 300$ К в течение $t_{2_delay} \geq 30$ мин и вновь фотографировали.

Определение геометрических размеров и массы образца до и после эксперимента позволяло контролировать отсутствие уноса материала в процессе многократного нагрева. Расстояние между метками измеряли при комнатной температуре перед началом и после каждого эксперимента при достижении максимальной температуры T_{max} , при этом $l_0 = l_{300\text{ К}}$, а относительное удлинение $\Delta l/l_0$ образца в нагретом состоянии рассчитывали в пикселях путем обработки фотографий в среде КОМПАС 3D. Расстояния Δl и l_0 определяли по центрам меток, которые находили, используя три точки эллипса, вписанного в метку. Важно, что фотографирование проводили при неизменном фокусном расстоянии, а центр каждой метки рассчитывали по одинаковым точкам эллипса как в холодном, так и в нагретом состоянии. Для повышения точности нахождения центра каждого эллипса обработку фотографий выполняли не менее 5 раз и затем вычисляли среднее арифметическое значение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среднее значение термического коэффициента линейного расширения α рассчитывали по известной формуле [4, 5]

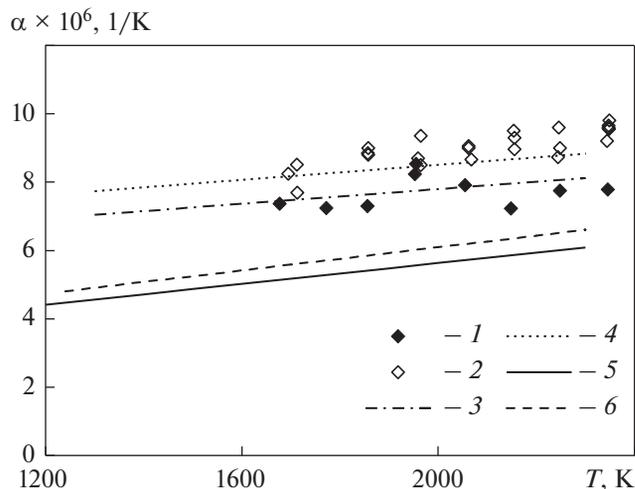
$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 (T_{max} - 293)} = \frac{l_{T_{max}} - l_0}{l_0 (T_{max} - 293)}$$

для каждого значения температуры T_{max} .

На рисунке приведены экспериментальные данные α графита марки МПГ-7 от температуры в диапазоне 1650–2350 К для образцов 1 и 2. Экспериментальные точки можно аппроксимировать следующими функциями:

$$\alpha = 4.857 \times 10^{-10} T + 6.732 \times 10^{-6} \quad (\text{для образца 1});$$

$$\alpha = 1.841 \times 10^{-9} T + 5.194 \times 10^{-6} \quad (\text{для образца 2}).$$



Зависимость среднего термического коэффициента линейного расширения графита различных марок от температуры.

Графит: 1 – МПГ-7 (образец вырезан перпендикулярно направлению прессования – образец 1); 2 – МПГ-7 (образец вырезан параллельно направлению прессования – образец 2); 3 – МПГ-6 (вырезан перпендикулярно плоскости прессования) [4]; 4 – МПГ-6 (вырезан параллельно плоскости прессования) [4]; 5 – DE-24 [1]; 6 – ГИП-4 [2]

На рисунке видно, что образцы, вырезанные перпендикулярно и параллельно прессованию, имеют различные значения ТКЛР, причем у первого из них α существенно выше. Этот факт указывает на наличие у графита марки МПГ-7 анизотропии ТКЛР.

Сравнение температурной зависимости термического коэффициента линейного расширения графита марки МПГ-7 с литературными данными для традиционного мелкозернистого графита марки МПГ-6 свидетельствует об аналогичной тенденции изменения ТКЛР от температуры и уровня его значений для образцов с перпендикулярным и параллельным прессованием у графита марки МПГ-6. Анализ числовых значений ТКЛР графита марок МПГ-6 и МПГ-7 показал, что они различаются несущественно [4].

На рисунке также приведены зависимости α для изотропных изостатических марок графита ГИП-4 и DE-24.

Таким образом, можно сделать вывод, что графит всех указанных на рисунке марок имеет возрастающую от температуры зависимость α . Однако графит изотропных изостатических марок характеризуется более низкими значениями ТКЛР, чем МПГ-6 и МПГ-7, и отсутствием анизотропии. По-видимому, это связано с зависимостью ТКЛР от среднего размера зерна накопителя и малой пористости графита, изготавливаемого методом объемного изостатического прессования, в

отличие от графита, получаемого методами прошивного прессования через мунштук и прессованием в “глухую” матрицу.

Это означает, что при эксплуатации изделий при высоких температурах графит марок ГИП-4 и DE-24 имеет существенное преимущество — меньший коэффициент линейного расширения по сравнению с традиционными конструкционными марками. Кроме того, отсутствие анизотропии ТКЛР создает возможность дополнительно экономить материал при изготовлении деталей.

Внедрение графита новых изотропных изостатических марок в теплоэнергетике может привести к повышению эффективности и увеличению срока службы высокотемпературных элементов конструкций.

Оценка полученных экспериментальных данных показала, что значение относительной расширенной неопределенности ТКЛР составляет $U_{0,95}(\alpha) \approx 17\%$ (нормальный закон распределения, коэффициент охвата $k = 1.96$) при температуре 1600 К и уменьшается при более высоких температурах.

ВЫВОДЫ

1. Мелкозернистый графит марок МПГ-7 и МПГ-6 обладает анизотропией ТКЛР в диапазоне температур 1650–2350 К.

2. Изотропный изостатический графит марок ГИП-4 и DE-24 характеризуется меньшими значениями ТКЛР по сравнению с графитом традиционных конструкционных марок МПГ, что свя-

зано с зависимостью ТКЛР от среднего зерна наполнителя и плотности графита.

3. Использование мелкозернистого графита конструкционных марок МПГ нецелесообразно при изготовлении теплоэнергетического оборудования, поскольку он обладает анизотропией ТКЛР и довольно большими значениями коэффициента линейного расширения по сравнению с этим показателем для графита изотропных изостатических марок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Изучение** стабильности относительного удлинения графита марки DE-24 при циклических термических нагрузках / А.В. Костановский, М.Г. Зеодин, М.Е. Костановская, А.А. Пронкин // ТВТ. 2015. Т. 53. № 1. С. 54–57. <https://doi.org/10.7868/S0040364415010135>
2. **Изучение** стабильности относительного удлинения графита марки ГИП-4 при циклических термических нагрузках / А.В. Костановский, М.Г. Зеодин, М.Е. Костановская, А.А. Пронкин // ТВТ. 2016. Т. 54. № 1. С. 144–146. <https://doi.org/10.7868/S004036441601004X>
3. **Sparrow E.M.** Radiant emission characteristics of non-isothermal cylindrical cavities // Appl. Opt. 1965. V. 4. № 1. P. 41–43. <https://doi.org/10.1364/AO.4.000041>
4. **Свойства** конструкционных материалов на основе углерода: справ. / под ред. В.П. Соседова. М.: Металлургия, 1975.
5. **Petukhov V.A., Chekhovskoi V.Ya.** Investigation of the thermal expansion of molybdenum and tungsten at high temperatures // High Temp. — High Pressures. 1972. V. 4. Is. 6. P. 671–677.

Temperature Dependence of the Thermal Coefficient of Linear Expansion

A. V. Kostanovskiy^{a, *}, M. G. Zeodinov^a, M. E. Kostanovskaya^a, and A. A. Pronkin^a

^a Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

*e-mail: Kostanovskiy@gmail.com

Abstract—The results from comparing temperature dependences of thermal coefficient of linear expansion of MPG-7 and MPG-6 structural-grade graphite and GIP-4 and DE-24 isotropic isostatic grades in the 1300–2300 K temperature range are presented. For the first time, the results of experimental research into the thermal coefficient of linear expansion of MPG-7 brand graphite in the 1650–2350 K temperature range on the samples cut perpendicularly and parallel to the direction of pressing are presented. The experiment was carried out in the steady-state heat mode. Comparison of the results obtained by measuring the thermal coefficient of linear expansion of MPG-7 brand graphite with similar data for MPG-6 structural brand graphite and DE-24 and GIP-4 isotropic isostatic graphite brands has shown that the latter brands are characterized by lower values of thermal coefficient of linear expansion. The conclusion is made on the expediency of introducing isotropic isostatic graphite grades in heat power engineering.

Keywords: thermal coefficient of linear expansion, graphite, temperature