

Удельная теплоемкость диоксида циркония, полностью стабилизированного оксидом иттрия, в интервале температур 300–1270 К*

Д.А. Самошкин, С.В. Станкус

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: d.a.samoshkin@gmail.com

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии проведены измерения удельной изобарной теплоемкости диоксида циркония, полностью стабилизированного оксидом иттрия (15 вес. %), который широко используется в изготовлении высокотемпературной конструкционной керамики. Получены новые достоверные экспериментальные данные по удельной теплоемкости в интервале температур 300–1270 К твердого состояния с погрешностью 2–4 %. Разработана таблица справочных значений для температурной зависимости удельной теплоемкости исследованной керамики. Проведено сопоставление полученных результатов с известными литературными данными. Установлено, что в широком интервале температур и концентраций Y_2O_3 теплоемкость твердых керамик YSZ с высокой точностью можно оценить с использованием правила Неймана–Коппа, а также по среднему атомному весу соединения.

Ключевые слова: YSZ, удельная теплоемкость, дифференциальная сканирующая калориметрия.

Введение

Стабилизированный оксидом иттрия диоксид циркония (YSZ) обладает превосходными свойствами при высоких температурах, такими как высокая устойчивость к тепловому удару, низкая теплопроводность, высокий коэффициент теплового расширения, повышенная температура плавления, хорошая фазовая стабильность, отличная стойкость к окислению и химическая инертность в атмосфере горения [1–3]. Таким образом, YSZ является перспективным материалом, который широко используется в качестве высокотемпературной конструкционной керамики. Так, например, ZrO_2 , частично стабилизированный Y_2O_3 (YPSZ), наносится в качестве верхнего слоя термобарьерных покрытий, применяемых в газовых турбинах и дизельных двигателях для защиты основных металлических частей от высокотемпературного газового воздействия, повышения долговечности компонентов и КПД двигателя [1–4]. Керамика из полностью стабилизированного ZrO_2 (YFSZ) при повышенных температурах обладает кислородно-ионной проводимостью, что используется в датчиках определения кислорода в газовых средах и расплавах, а также при создании высокотемпературных твердооксидных топливных

* Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (№ 121031800219-2).

элементов для газовых электролизеров и электрохимических генераторов — автономных источников электрического тока [5].

Надежные и систематизированные данные по теплофизическим свойствам (в том числе по теплоемкости) керамик необходимы для конструирования на их основе новых материалов и их успешного внедрения в разных областях промышленности. Обзор имеющейся в литературе информации показал, что в основном исследуются теплофизические свойства YPSZ. Так, например, экспериментальное исследование удельной теплоемкости (c_p) YPSZ с содержанием 2,4–14,7 вес. % Y_2O_3 проводилось в работах [1, 2, 4, 6–21]. Однако теплофизические свойства керамик из YFSZ, легированного высоким содержанием Y_2O_3 (≥ 15 вес. %), изучены недостаточно. Теплоемкость YFSZ, схожего по составу (15–17 вес. % Y_2O_3) с исследованной в настоящей работе керамикой, экспериментально определялась в работах [8, 12, 14, 22], при этом измерения c_p выше комнатной температуры проводились только в [8, 14]. Исходя из этого, целью данной работы являлось экспериментальное исследование удельной теплоемкости диоксида циркония, полностью стабилизированного оксидом иттрия (с содержанием 15 вес. % Y_2O_3), в широком интервале температур (300–1270 К).

Экспериментальная техника

Измерения удельной изобарной теплоемкости осуществлялись на установке DSC 404 F1 (NETZSCH), реализующей метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Подробное описание процедуры экспериментов, калибровки калориметра, а также метода определения c_p было изложено авторами ранее [23]. Эксперименты выполнялись на образце ZrO_2 , стабилизированном 15 вес. % Y_2O_3 . В соответствии с сертификатом, предоставленным АО «Чепецкий механический завод», содержание ZrO_2 и Y_2O_3 в керамике составляло не менее 99,5 вес. %. Содержание основных примесей (вес. %) было следующим: $SiO_2 \leq 5 \cdot 10^{-2}$, $Fe_2O_3 \leq 3 \cdot 10^{-2}$, $TiO_2 \leq 1 \cdot 10^{-2}$, $CaO \leq 3 \cdot 10^{-2}$, $Al_2O_3 \leq 3 \cdot 10^{-2}$, $MgO \leq 2 \cdot 10^{-2}$, $Na_2O + K_2O \leq 1 \cdot 10^{-2}$, $SO_2 \leq 3 \cdot 10^{-1}$. Масса исследуемого образца YSZ взвешивалась на электронных весах AND GH-252 с погрешностью $\pm 0,3$ мг и равнялась 79,9 мг. Контрольные измерения массы образца YSZ проводились непосредственно до и после экспериментов. В качестве калибровочного образца использовался сапфир массой 84,4 мг. Измерения c_p проводились в интервале температур 300–1270 К с использованием платиновых ячеек со скоростью нагрева 10 К/мин в проточной (20 мл/мин) атмосфере аргона особой чистоты (99,999 об. %). Перед проведением каждого термического цикла рабочий объем печи калориметра откачивался до вакуума (1 Па) и несколько раз промывался аргоном.

Калибровка калориметра по температуре и энтальпии плавления проводилась с использованием следующих стандартов: Hg, In, Sn, Bi, Pb, Zn, Al, Ag, Au. Все металлы имели степень чистоты не ниже 99,99 вес. %. Оцениваемая погрешность полученных данных по c_p на установке DSC 404 F1 составляет 2–4 %, что было установлено в экспериментах со стандартными образцами сапфира, графита марки РОСО AXM-5Q1 и платины высокой чистоты.

Результаты измерений и обсуждение

На рис. 1 представлены экспериментальные данные удельной массовой теплоемкости YSZ (с содержанием 15 вес. % Y_2O_3), которые были получены в ходе последовательных

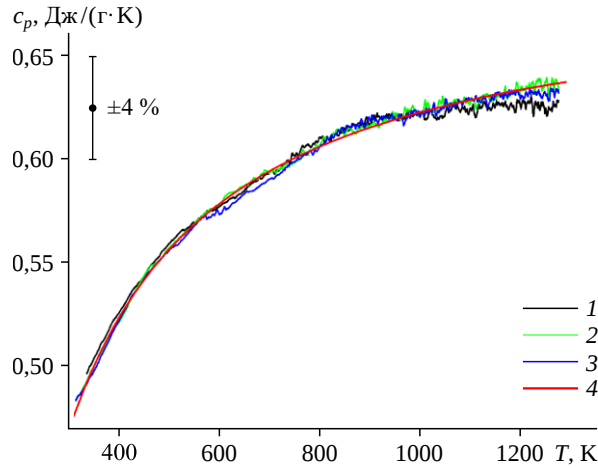


Рис. 1. Удельная теплоемкость YSZ.

1 – 3 — соответственно результаты экспериментов № 1 – 3,
4 — аппроксимация (1).

циклов нагревов образца, а также аппроксимация полученных результатов измерений. Из рисунка видно, что результаты экспериментов очень хорошо согласуются между собой, не выходя за пределы оцениваемой погрешности измерений. Температурная зависимость удельной теплоемкости YSZ в рассматриваемом интервале температур твердого состояния изменяется монотонно, аномальных изменений $c_p(T)$ и фазовых переходов не обнаружено. Следует отметить, что после каждого термического цикла масса исследуемого образца керамики оставалась без изменений.

Аппроксимацией первичных результатов по c_p YSZ методом наименьших квадратов получено уравнение:

$$c_p(T) = 0,691 - 1,9 \cdot 10^{-6} T - 67,3 T^{-1}, \quad (1)$$

где c_p измеряется в Дж/(г·К), T — в К. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных значений от аппроксимации (1) не превышает 0,4 %. Случайная погрешность аппроксимации (при 95 % доверительной вероятности) удельной теплоемкости находится в пределах 0,01 – 0,02 %. В табл. 1 представлены рекомендуемые данные по c_p YSZ (с содержанием 15 вес. % Y_2O_3), полученные на основании уравнения (1).

Таблица 1
Рекомендуемые данные по удельной теплоемкости YSZ

T, K	c_p , Дж/(г·К)	$\langle c_p M \rangle^*$, Дж/(моль·К)	T, K	c_p , Дж/(г·К)	$\langle c_p M \rangle$, Дж/(моль·К)
300	0,466	19,1	900	0,615	25,0
400	0,522	21,5	1000	0,622	25,3
500	0,555	22,8	1100	0,628	25,7
600	0,578	23,6	1200	0,633	25,9
700	0,594	24,2	1300	0,637	26,2
800	0,605	24,6	—	—	—

* $\langle c_p M \rangle$ — среднее значение среднеатомной теплоемкости $c_p M$ исследованных образцов YSZ.

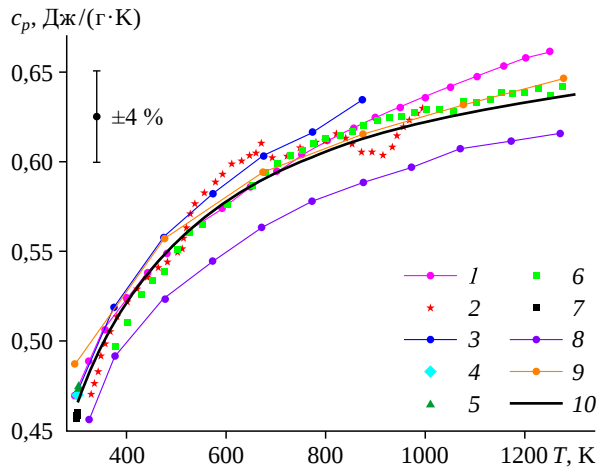


Рис. 2. Сравнение результатов удельной теплоемкости YSZ с содержанием 12–20 вес. % Y_2O_3 .
 1 – [6], 2 – [7], 3 – [8], 4 – [10], 5 – [12], 6 – [14], 7 – [16, 22],
 8 – [19], 9 – [3], 10 — данные настоящего исследования.

На рис. 2 представлено сравнение результатов настоящего исследования по удельной теплоемкости YSZ с литературными данными по c_p YPSZ (12–14,7 вес. % Y_2O_3) [6, 10, 12, 16, 19] и YFSZ (15–20 вес. % Y_2O_3) [3, 7, 8, 12, 14, 22]. Сравнение проводилось с образцами близкими по содержанию Y_2O_3 с исследуемой в настоящей работе керамикой (отличие в составе не превышало 5 вес. %). Из рисунка видно, что результаты работ [3, 6–8, 10, 12, 14, 16, 22] совпадают с данными настоящего исследования в пределах погрешности измерений, а значения [19] — в пределах суммарных погрешностей измерений. Следует отметить, что авторам удалось найти всего одну работу [14], в которой проводились измерения c_p YSZ с содержанием 15 вес. % Y_2O_3 (т.е. с составом, аналогичным исследуемой керамике) в интервале температур 373–1273 К. Таким образом, для интервала температур 300–373 К экспериментальные данные по удельной теплоемкости ZrO_2 , стабилизированного 15 вес. % Y_2O_3 , получены впервые.

Для работы с многоатомными соединениями в достаточно широком интервале температур твердого состояния при анализе тепловых характеристик необходим обобщенный параметр, который бы отражал количественным образом изменение состава соединений. Таким параметром, как было показано в исследовании [24], может выступать средний атомный вес M , равный молекулярному M_0 , деленному на число атомов в соединении N . Поскольку составляющими YSZ являются ZrO_2 и Y_2O_3 , имеющие соответственно 3 и 5 атомов в соединении, то N в YSZ будет вычисляться по формуле $N(YSZ) = (3 \cdot X(ZrO_2) + 5 \cdot X(Y_2O_3))/100$, где X — содержание оксидов (в моль %) в YSZ. В табл. 2 представлены значения M_0 , N и M при разном содержании Y_2O_3 . Величина среднеатомной теплоемкости $c_p M$ (произведение удельной массовой теплоемкости на средний атомный вес) может быть сопоставлена с атомной теплоемкостью простых веществ [24]. Это дает возможность оценить, насколько c_p YSZ разного состава при данной температуре далека от классического насыщения, а также прогнозировать теплоемкость по среднему атомному весу. Так, для многоатомных соединений схожего состава c_p обратно пропорциональна M , а $c_p M$ является приблизительно постоянной величиной

Таблица 2

Молекулярный M_0 и средний атомный M веса YSZ от содержания Y_2O_3

C , вес. % Y_2O_3	X , моль % Y_2O_3	M_0 , г/моль YSZ	N YSZ	M , г/моль YSZ
0	0	123,22	3,00	41,07
5	2,8	126,09	3,06	41,21
10	5,7	129,07	3,11	41,50
15	8,8	132,25	3,18	41,59
20	12,0	135,53	3,24	41,83
25	15,4	139,02	3,31	42,00
30	18,9	142,49	3,38	42,16
35	22,7	146,51	3,45	42,47
40	26,7	150,61	3,53	42,67

в пределах рассматриваемого класса соединений при одинаковых термодинамических условиях.

Изложенные выше положения подтверждаются данными настоящего исследования и результатами работ [1–4, 6–22, 25] по c_p YSZ. На рис. 3 показана зависимость $c_p M(T)$, а также результаты расчета по правилу Неймана–Коппа для исследуемой в настоящей работе керамики YSZ (15 вес. % Y_2O_3). Расчет среднеатомной теплоемкости по правилу Неймана–Коппа осуществлялся по значениям c_p ZrO_2 [26] и Y_2O_3 [27] и их массовому содержанию в YSZ, а также умножением полученного результата на $M = 41,59$ (соответствует содержанию 15 вес. % Y_2O_3 , см. табл. 2). Из графика видно, что результаты расчета лежат ниже экспериментальных значений и согласуются с ними в пределах погрешности измерений. На рис. 3 также можно увидеть, что экспериментальные значения $c_p M$ в области температур 650–1100 К достигают классического насыщения для решеточной теплоемкости твердых тел (25 Дж/(моль·К)). Особенности в поведении $c_p M(T)$ исследуемой керамики, которые бы противоречили представлениям теории теплоемкости твердого тела, не обнаружено.

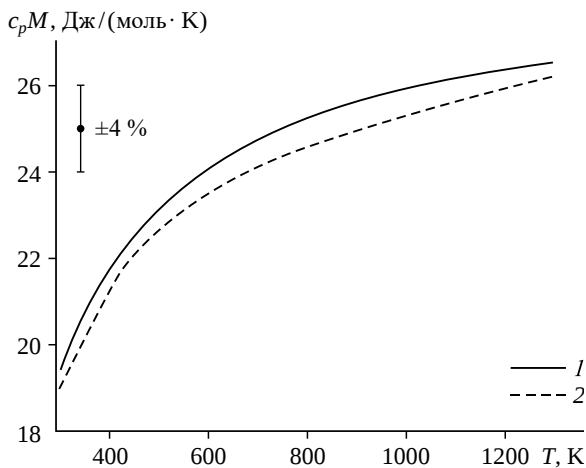


Рис. 3. Среднеатомная теплоемкость YSZ.

1 — результаты настоящей работы,
2 — результаты расчета по правилу Неймана–Коппа.

Согласно результатам настоящего исследования и литературным данным [1–4, 6–22, 25], при заданной температуре $c_p M$ исследованных образцов YSZ является постоянной величиной с отклонением от среднего значения среднеатомной теплоемкости $\langle c_p M \rangle$, не превышающим 5 %. Расчет $\langle c_p M \rangle$ проводился по имеющимся у авторов и всем доступным в литературе результатам c_p YSZ, содержание Y_2O_3 в которых находилось в пределах 2,4–37,4 вес. %. В табл. 3 указаны основные сведения по рассматриваемым литературным данным. При этом полученные значения $\langle c_p M \rangle$ хорошо согласуются с расчетом $c_p M$ по правилу Неймана–Коппа при массовом содержании компонентов YSZ 80 вес. % (ZrO_2) и 20 вес. % (Y_2O_3), поэтому далее в качестве $\langle c_p M \rangle$ будем использовать результаты расчета по правилу Неймана–Коппа. В табл. 1 приведены рассчитанные для интервала температур 300–1300 К значения $\langle c_p M \rangle$.

Зависимость $c_p(M)$ всех исследованных образцов YSZ (как в настоящей работе, так и авторами [1–4, 6–22, 25]) при температурах 300, 800 и 1300 К представлена на рис. 4. Из графиков можно видеть, что удельная массовая теплоемкость YSZ в среднем уменьшается с увеличением среднего атомного веса. Результаты экспериментов при 300, 800 и 1300 К в пределах 5 % укладываются на кривые $c_p = 19,1 \cdot M^{-1}$, $c_p = 24,6 \cdot M^{-1}$ и $c_p = 26,2 \cdot M^{-1}$ соответственно. Похожее поведение $c_p(M)$ также наблюдается при других температурах из интервала 300–1300 К. В работах [1–4, 8, 9, 11–19, 22, 25] погрешность определения c_p не приводилась (см. табл. 3), однако указывались методы измерений (ДСК либо

Таблица 3

Экспериментальные работы по измерению удельной теплоемкости YSZ

Литературный источник	C, вес. % Y_2O_3	Диапазон измерений c_p , К	Метод и погрешность измерений
[6]	12	300–2100	Изотермический (ледяной калориметр Бунзена), ± 2 %
[7]	7, 8, 20	300–1000	ДСК, ± 3 %
[8]*	2,4, 4,0, 5,3, 16,9	298–873	ДСК
[9]*	7–8	300–1473	ДСК
[10]	13,7	300	Импульсный, ± 2 %
[11, 12]*	3,6, 7,0, 13,4, 16,4	13–300	Адиабатическая калориметрия
[13]*	7	300–873	ДСК
[14]*	5,3, 5,8, 8,0, 15,0	373–1273	ДСК
[15]*	8	296–1773	–
[16, 22]*	13,4, 16,4, 19,0	13–300	Адиабатическая калориметрия
[17]*	5,4	573–1573	ДСК
[18]*	8	373–1523	ДСК
[19]	14,7, 24,7	320–1570	ДСК, ± 5 %
[20]	8	373–1523	ДСК, ± 4 %
[21]*	7–8	373–1573	ДСК
[1]*	7,1	300–1273	ДСК
[25]*	21,6, 37,4	300–1273	ДСК
[4]*	8	373–1523	ДСК
[2]*	13,7	298–1673	ДСК
[3]*	20,0, 23,0, 25,9, 28,7, 31,4	298–1673	ДСК

* — в данных работах не указывается погрешность определения c_p исследуемых образцов YSZ.

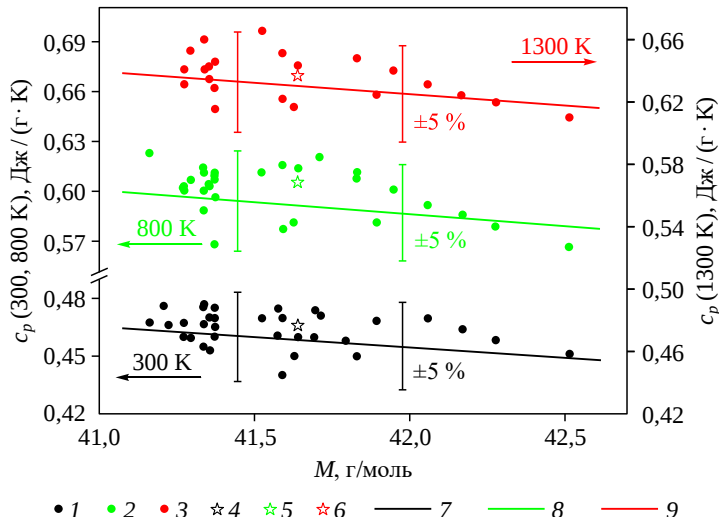


Рис. 4. Зависимость удельной теплоемкости YSZ от среднего атомного веса.
 1–3 — соответственно результаты исследований [1–4, 6–22, 25] при 300, 800 и 1300 К;
 4–6 — соответственно данные настоящей работы при 300, 800 и 1300 К;
 7–9 — расчет по формуле $\langle c_p M \rangle (T) \cdot M^{-1}$ соответственно при $T = 300, 800$ и 1300 К.

адиабатическая калориметрия). Погрешность определения c_p на адиабатическом и дифференциально-сканирующем калориметрах находится в пределах 2–5 %. Можно утверждать, что полученные в представленной работе значения и данные большинства работ в пределах погрешности измерений укладываются на представленные выше кривые. Тогда удельная теплоемкость YSZ с содержанием 0–40 вес. % Y_2O_3 при заданной температуре может описываться уравнением $c_p = \langle c_p M \rangle (T) \cdot M^{-1}$.

Рисунок 5 демонстрирует зависимость удельной массовой теплоемкости исследованных в настоящей работе и авторами [1–4, 6–22, 25] образцов YSZ от массового содержания Y_2O_3 $c_p(C)$ при 300, 800 и 1300 К. Видно, что в интервале концентраций

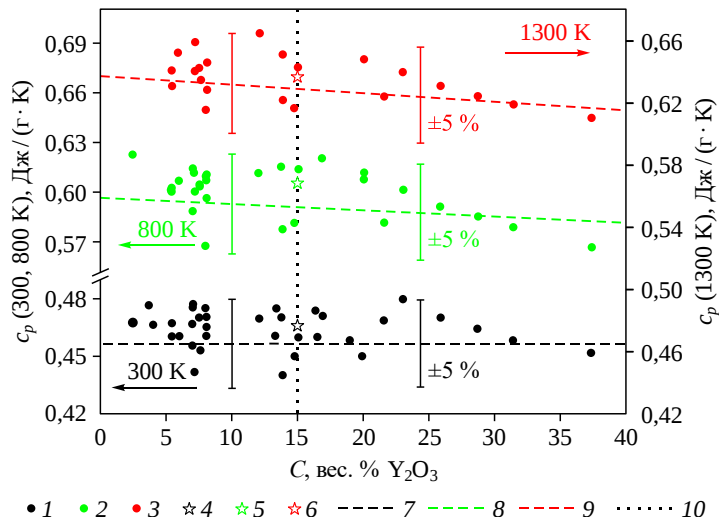


Рис. 5. Зависимость удельной теплоемкости YSZ от содержания Y_2O_3 .
 1–3 — соответственно результаты исследований [1–4, 6–22, 25] при 300, 800 и 1300 К;
 4–6 — данные настоящей работы соответственно при 300, 800 и 1300 К;
 7–9 — расчет по закону идеального раствора соответственно при 300, 800 и 1300 К;
 10 — граница, разделяющая результаты по c_p YPSZ (< 15 вес. % Y_2O_3) и YFSZ (≥ 15 вес. % Y_2O_3).

0–40 вес. % Y_2O_3 отличие результатов экспериментов (данные настоящего исследования и большинства работ) от аддитивных значений (линии 7–9) не превышает пределов погрешности измерений. Таким образом, теплоемкость керамических материалов YSZ может быть оценена с использованием правила Неймана–Коппа в интервале температур 300–1300 К и концентраций 0–40 вес. % Y_2O_3 практически в пределах неопределенности экспериментальных данных.

Заключение

Получены новые экспериментальные данные по удельной теплоемкости диоксида циркония, стабилизированного 15 вес. % оксидом иттрия, в широком интервале температур твердого состояния, причем для интервала 300–373 К они получены впервые. Проведено сопоставление результатов экспериментов с имеющимися литературными данными по теплоемкости YSZ. Выполнены расчеты температурной зависимости удельной теплоемкости исследованной керамики по правилу Неймана–Коппа, которые в пределах погрешности измерений совпали с результатами экспериментов, что подтверждает достоверность использования оценки этого свойства. Показано, что теплоемкость YSZ в твердом состоянии с высокой точностью можно оценивать с использованием правила Неймана–Коппа, а также по среднему атомному весу соединения в широком интервале температур (300–1300 К) и концентраций (0–40 вес. % Y_2O_3).

Список литературы

1. Jang B.K., Matsubara H. Thermophysical properties of EB-PVD coatings and sintered ceramics of 4 mol% Y_2O_3 -stabilized zirconia // J. Alloy Compd. 2006. Vol. 419, No. 1–2. P. 243–246.
2. Hu L., Wang C.A., Hu Z., Lu S., Sun C., Huang Y. Porous yttria-stabilized zirconia ceramics with ultra-low thermal conductivity. Pt II. Temperature dependence of thermophysical properties // J. Mater. Sci. 2011. Vol. 46. P. 623–628.
3. Xiwen S., Min X., Fen Z., Guixiao J., Xihong H., Shengli A. High-temperature thermal properties of yttria fully stabilized zirconia ceramics // J. Rare Earth. 2011. Vol. 29, No. 2. P. 155–159.
4. Di Girolamo G., Blasi C., Pagnotta L., Schioppa M. Phase evolution and thermophysical properties of plasma sprayed thick zirconia coatings after annealing // Ceram. Intern. 2010. Vol. 36, No. 8. P. 2273–2280.
5. Сайт Диоксид циркония. Керамика из диоксида циркония. Точка доступа: <https://www.chmz.net/product/keramika/> (дата обращения: 06.06.2024).
6. Wilkes K.E., Lagedrost J.F. Thermophysical properties of plasma sprayed coatings // NASA Rep. CR-121144. Cleveland: NASA Lewis Research Center, 1973. 140 p.
7. Brandt R., Pawlowski L., Neuer G., Fauchais P. Specific heat and thermal conductivity of plasma sprayed yttria-stabilized zirconia and NiAl, NiCr, NiCrAl, NiCrAlY, NiCoCrAlY coatings // High Temperatures — High Press. 1986. Vol. 18, No. 1. P. 65–77.
8. Hasselman D., Johnson L.F., Bentsen L.D., Syed R., Lee H.L., Swain M.V. Thermal diffusivity and conductivity of dense polycrystalline ZrO_2 ceramics: A survey // Am. Ceram. Soc. Bull. 1987. Vol. 66, No. 5. P. 799–806.
9. Taylor T.A. Thermal properties and microstructure of two thermal barrier coatings // Surf. Coat. Tech. 1992. Vol. 54–55. Pt 1. P. 53–57.
10. Spisiak J., Hartmanova M., Knab G.G., Krcho S. Thermal properties of yttria-stabilized zirconia (YSZ) // J. Eur. Ceram. Soc. 1993. Vol. 11, No. 6. P. 509–514.
11. Shirakami T., Tojo T., Atake T., Mori T., Yamamura H. Low temperature heat capacities of zirconia and yttria-doped zirconia $(ZrO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$ ($x = 0, 0,0200, 0,0396$) // Thermochim. Acta. 1995. Vol. 267. P. 415–420.
12. Shirakami T., Atake T., Mori T., Yamamura H. Low temperature heat capacity of $(ZrO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$ ($x = 0,0776$ and $0,0970$) and low energy excitations // Solid State Ionics. 1995. Vol. 79. P. 143–146.
13. Dinwiddie R.B., Beecher S.C., Porter W.D., Nagaraj B.A. The effect of thermal aging on the thermal conductivity of plasma sprayed and EB-PVD thermal barrier coatings // ASME. 1996. Vol. 78767, No. 96-GT-282. P. V005T13A006-1–V005T13A006-7.
14. Raghavan S., Wang H., Dinwiddie R.B., Porter W.D., Mayo M.J. The effect of grain size, porosity and yttria content on the thermal conductivity of nanocrystalline zirconia // Scripta Mater. 1998. Vol. 39, No. 8. P. 1119–1125.

15. Taylor R.E., Wang X., Xu X. Thermophysical properties of thermal barrier coatings // Surf. Coat. Tech. 1999. Vol. 120–121. P. 89–95.
16. Tojo T., Atake T., Mori T., Yamamura H. Heat capacity and thermodynamic functions of zirconia and yttria-stabilized zirconia // J. Chem. Thermodyn. 1999. Vol. 31, No. 7. P. 831–845.
17. Vassen R., Cao X., Tietz F., Basu D., Stover D. Zirconates as new materials for thermal barrier coatings // J. Am. Ceram. Soc. 2000. Vol. 83, No. 8. P. 2023–2028.
18. Bianchi P., Cernuschi F., Lorenzoni L., Ahmaniemi S., Vippola M., Vuoristo P., Mantyla T. Thermophysical and microstructural characterization of modified thick yttria stabilised zirconia thermal barrier coatings // Proceedings of the Liege Conf. Materials for Advanced Power Engng. Liege, Belgium, 2002. P. 449–463.
19. Leclercq B., Mevrel R., Liedtke V., Hohenauer W. Thermal conductivity of zirconia-based ceramics for thermal barrier coating // Materialwiss. Werkst. 2003. Vol. 34, No. 4. P. 406–409.
20. Ahmaniemi S., Vuoristo P., Mantyla T., Cernuschi F., Lorenzoni L. Modified thick thermal barrier coatings: thermophysical characterization // J. Eur. Ceram. Soc. 2004. Vol. 24, No. 9. P. 2669–2679.
21. Cernuschi F., Lorenzoni L., Ahmaniemi S., Vuoristo P., Mantyla T. Studies of the sintering kinetics of thick thermal barrier coatings by thermal diffusivity measurements // J. Eur. Ceram. Soc. 2005. Vol. 25, No. 4. P. 393–400.
22. Tojo T., Atake T., Mori T., Yamamura H. Excess heat capacity in yttria stabilized zirconia // J. Therm. Anal. Calorim. 1999. Vol. 57. P. 447–458.
23. Самошкин Д.А., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В., Агажанов А.Ш. Удельная теплоемкость сплавов магния с кальцием в твердом состоянии // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 3. С. 609–614.
24. Самошкин Д.А., Станкус С.В. Удельная теплоемкость гадолиний-скандий-галлиевого и кальций-ниобий-галлиевого гранатов // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 6. С. 1051–1056.
25. Winter M.R., Clarke D.R. Thermal conductivity of yttria-stabilized zirconia–hafnia solid solutions // Acta Mater. 2006. Vol. 54, No. 19. P. 5051–5059.
26. Chase M.W. NIST-JANAF thermochemical tables. 4th ed. Woodbury: American Inst. of Physics, 1998. 1951 p.
27. Глушко В.П. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание. Т. 4. Кн. 2. М.: Наука, 1982. 560 с.

*Статья поступила в редакцию 28 июня 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*