

УДК 666.3:546.281'261.017:539.52

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТКЛР МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

Представлены сведения о температурном коэффициенте линейного расширения (ТКЛР) материалов на основе карбида кремния. Показано, что разные полиморфы 3С (кубической модификации) и 4Н, 6Н (гексагональной модификации) характеризуются разным тепловым расширением, причем разница между его значениями увеличивается при повышении температуры. Определен ТКЛР реакционно-спеченного, жидкофазно-спеченного и горячепрессованного карбидкремниевых материалов в интервале 20–1800 °С.

Ключевые слова: температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), карбид кремния, реакционное спекание, жидкофазное спекание, горячее прессование.

ВВЕДЕНИЕ

Последние достижения в области машиностроения, авиационной и космической промышленности вызвали повышенный интерес к высокотемпературным материалам. Предлагаемое использование этих материалов в конструкциях, работающих при температурах выше 1800 °С, создает необходимость подробного изучения теплофизических свойств. Одно из важнейших высокотемпературных свойств, которые необходимо учитывать при проектировании новых конструкций, — температурный коэффициент линейного расширения материалов в широком диапазоне (20–1800 °С).

Карбид кремния отличается высокой твердостью, малой плотностью, а также значительной прочностью и низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР). Карбид кремния более хрупкий материал, чем Al_2O_3 , нитрид кремния и ZrO_2 , при этом он достаточно устойчив к окислению, поэтому может использоваться для футеровки высокотемпературных агрегатов [1]. Благодаря отличным теплофизическим свойствам материалы на основе карбида кремния применяют в доменных, муфельных, проходных, роторных и шахтных печах, для обжига технической керамики и фарфора, в радиотехнике и электронике в качестве поглотителя волн, в двигателестроении в качестве защитных

покрытий на поршни, в качестве теплообменников, роторов агрегатов турбонаддува и др. [2, 3]. Изучение теплофизических характеристик керамических композиционных материалов является важной задачей, определяющей уровень и высокотемпературные возможности работы изделий.

Ряд работ [4–7] посвящен исследованию ТКЛР карбидкремниевых материалов, однако эти исследования соответствуют в основном узкому температурному диапазону или температуре, близкой к комнатной. Важными факторами, влияющими на тепловое расширение карбидкремниевых материалов, являются различие структур и полиморфов (кубической 3С, гексагональной 2Н, 4Н, 6Н и ромбоэдрической 15R, 21R, 33R кристаллических решеток) и анизотропия при высокой температуре, влияющая на ТКЛР композиционных материалов [8–11].

Цель настоящей работы — изучение факторов, влияющих на тепловое расширение материалов на основе карбида кремния, полученных разными методами.

ТКЛР МОНО- И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО SiC

Согласно модели Дебая, тепловые колебания кристаллической решетки рассматриваются как гармоничные смещения атомов относительно среднего (равновесного) положения. При таком потенциале тело не должно менять свои размеры (длину, объем) с изменением температуры, поскольку колебания атомов симметричны относительно равновесного положения и, следовательно, межатомные расстояния должны быть неизменными. Однако реальные тела, как правило, увеличивают свои размеры с ростом температуры.



С. Н. Перевислов
E-mail: perevislov@mail.ru

Тепловое расширение твердых тел хорошо изучено и объяснено с фундаментальной точки зрения ангармоничностью воздействия на расстояния равновесных связей [12], а тепловое расширение отдельных структурных координационных многогранников рассмотрено и полностью объяснено в публикации [13]. Некоторые соединения представлены обычными структурами, характеризующимися тепловым расширением катионных и анионных связей. Необычная структурная особенность характерна для SiC, который существует в множественных кристаллических модификациях и поли типах, схожих по своим базовым структурным принципам и тесно связанных посредством последовательно упакованных слоев. Результаты измерений ТКЛР трех основных поли типов карбида кремния (3С, 4Н и 6Н [8–11]) позволяют проанализировать влияние структурных эффектов SiC на его тепловое расширение.

Структура SiC состоит из тетраэдрически скоординированных многогранных единиц, которые образуют базовые плоскости слоев и последовательно либо параллельно укладываются относительно разных плоскостей, образуя таким образом поли типы. Тепловое расширение кубического 3С [10] и гексагональных 4Н [9] и 6Н [8] поли типов SiC в интервале 20–1000 °С рассчитано с учетом определения параметров кристаллической решетки (табл. 1) методом рентгеновской дифракции и последующего составления поли номов зависимости ТКЛР от температуры.

Главные осевые ТКЛР (α) выражаются поли номами второго порядка:

$$\alpha_{3C} = 3,19 \cdot 10^{-6} + 3,60 \cdot 10^{-9} T - 1,68 \cdot 10^{-12} T^2,$$

$$\alpha_{4H} = 3,21 \cdot 10^{-6} + 3,56 \cdot 10^{-9} T - 1,62 \cdot 10^{-12} T^2,$$

$$\alpha_{6H} = 3,27 \cdot 10^{-6} + 3,25 \cdot 10^{-9} T - 1,36 \cdot 10^{-12} T^2$$

вдоль оси X и

$$\alpha_{3C} = 3,19 \cdot 10^{-6} + 3,60 \cdot 10^{-9} T - 1,68 \cdot 10^{-12} T^2,$$

$$\alpha_{4H} = 3,09 \cdot 10^{-6} + 2,63 \cdot 10^{-9} T - 1,08 \cdot 10^{-12} T^2,$$

$$\alpha_{6H} = 3,18 \cdot 10^{-6} + 2,48 \cdot 10^{-9} T - 8,51 \cdot 10^{-13} T^2,$$

вдоль оси Y.

Значения ТКЛР кристаллов SiC поли типов 3С, 4Н и 6Н вдоль оси X практически не отличаются друг от друга во всем диапазоне от 20 до 1000 °С, в то время как вдоль оси Y разница тепловых расширений разных поли типов при высокой температуре существенна.

ТКЛР поли типа 3С, как и других поли типов SiC, непрерывно растет от $3,26 \cdot 10^{-6}$ 1/°С при комнатной температуре до $5,11 \cdot 10^{-6}$ 1/°С при 1000 °С [10]. ТКЛР поли типа 4Н при комнатной температуре составляет $3,28 \cdot 10^{-6}$ 1/°С, при 1000 °С $5,15 \cdot 10^{-6}$ 1/°С (вдоль оси X) и, соответственно, $3,14 \cdot 10^{-6}$ и $4,64 \cdot 10^{-6}$ 1/°С (вдоль оси Y) [9]. Для поли типа 6Н соответствующие показатели равны $3,33 \cdot 10^{-6}$ и $5,16 \cdot 10^{-6}$ 1/°С (вдоль оси X), $3,23 \cdot 10^{-6}$ и $4,81 \cdot 10^{-6}$ 1/°С (вдоль оси Y) [8].

Главная особенность монокристаллов кубической модификации β -SiC, а также гексагональных поли типов 2Н, 4Н и 6Н — наличие анизотропии теплового расширения при изменении температуры [9]. При комнатной температуре тепловое расширение поли типа 4Н почти изотропно, однако с повышением температуры анизотропия теплового расширения быстро возрастает. Повышение температуры приводит к увеличению параметра кристаллической решетки с у α -SiC при неизменном параметре а, что, несомненно, приводит к анизотропии теплового расширения. В направлении оси X анизотропии теплового расширения разных поли типов SiC практически не наблюдается, а в направлении оси Y она становится заметна с ростом температуры. Для поли кристаллических композиционных материалов на основе SiC при спекании осуществляется фазовый переход карбида кремния 3С → 2Н → 4Н → 6Н [14].

Политип 4Н α -SiC проявляет большую анизотропию теплового расширения, чем политип 6Н [15], у которого заметно ослабление анизотропии теплового расширения. При комнатной температуре политип 6Н SiC является лишь слегка анизотропным по тепловому расширению. Однако при повышении температуры от 20 до 1000 °С анизотропия теплового расширения непрерывно увеличивается.

ТКЛР МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ SiC

ТКЛР является важной характеристикой, отражающей прочность межатомных связей в монокристаллах, а в поли кристаллических материалах определяет их устойчивость при переменной тепловой нагрузке.

Характер теплового расширения поли кристаллических материалов на основе SiC определяется в первую очередь их фазовым составом. В табл. 2 приведены значения ТКЛР карбид-кремниевых материалов до 2000 °С [16, 17]. Пока-

Таблица 1. Кристаллические характеристики разных поли типов карбида кремния

Модификация	Политип	Кристаллическая решетка	Степень гексагональности, %	Параметр решетки		
				a, Å	c, Å	c/a
β -SiC	3С	Кубическая	0	4,3596	—	—
α -SiC	2Н	Гексагональная	100	3,0760	5,0780	1,6508
	4Н	»	50	3,0800	10,0810	3,2731
	6Н	»	33,3	3,0806	15,1173	4,9073
	8Н	»	25	3,0790	20,1470	6,5433
	15R*	Ромбоэдрическая	40	3,0800	37,8170	12,2782

* Параметры кристаллической решетки указаны в пересчете на гексагональную упаковку.

Таблица 2. Значения ТКЛР SiC-материалов

Материал	Температура, °C	ТКЛР, 10^{-6} 1/°C
Монокристалл α -SiC	25–1000	5,12
	25–1500	5,48
	25–2000	5,77
Монокристалл β -SiC	200	3,8
	400	4,3
	600	4,8
	800	5,2
	1000	5,8
	1400–1800	5,5
SiC:		
реакционно-спеченный	90–1200	4,1–4,3
SiC на связке:		
кремнеземистой	20–1400	4,0–5,2
высокоглиноземистой	20–1300	4,8–5,3
нитридокремниевой	20–1300	3,8–4,9
Пиролитический SiC, содержащий:		
0 % углерода	25	3,5
	500	4,5
	1000	5,5
11,6 % углерода	25	3,2
	500	4,1
	1000	5,1
33,4 % углерода	25	3,0
	500	4,0
	1000	4,9
1 об. % кремния	25	4,3
	500	5,1
	1000	5,8
	1500	5,3
	2000	5,2

зано, что поликристаллический SiC, полученный реакционным спеканием, наряду с материалами на нитридокремниевой связке обладает наиболее низким тепловым расширением.

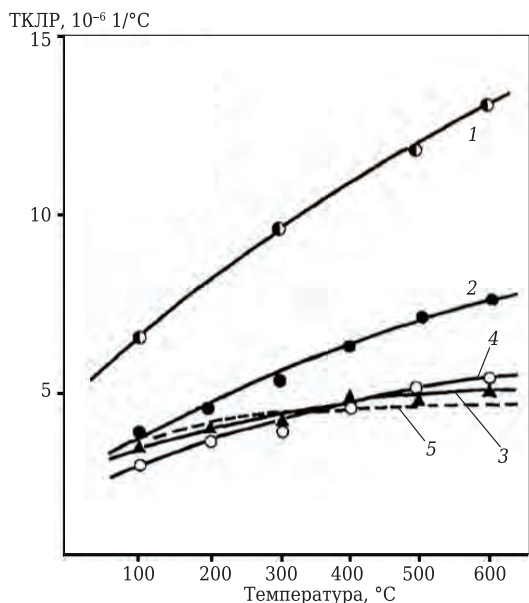


Рис. 1. Температурные зависимости ТКЛР карбидкремниевых материалов: 1 — SiC-Al₂O₃; 2 — SiC-B₄C; 3 — реакционно-спеченный SiC; 4 — SiC-BeO; 5 — монокристалл SiC

Особенности теплового расширения SiC могут быть связаны с незначительным количеством структурных примесей. В пиролитических карбидкремниевых материалах, содержащих свободный углерод, увеличение его количества до 33,4 % при равной температуре приводит к снижению теплового расширения, а при дальнейшем увеличении содержания углерода, вероятнее всего, к возрастанию теплового расширения (см. табл. 2). Содержание около 1 об. % свободного кремния в составе пиролитического SiC обеспечивает значительное увеличение теплового расширения в интервале 20–2000 °C (см. табл. 2). Небольшое снижение теплового расширения связано с плавлением кремния (при 1410 °C) и, как следствие, с уменьшением объема материала [18].

Авторы статьи [7] исследовали влияние пористости и спекающих добавок (1,5 мас. % BeO, 0,5 мас. % B + 1 % C, 2 мас. % Al₂O₃) на тепловое расширение SiC-керамики. В процессе спекания пространство между частицами SiC заполняет связующая фаза, поэтому тепловое расширение композиционного материала определяется ТКЛР матрицы (частиц SiC) и связующей фазы. Значения ТКЛР монокристаллического образца [19] и поликристаллических образцов на основе SiC с наибольшим содержанием добавок [7] близки. Добавка Al₂O₃ существенно увеличивает тепловое расширение керамики на основе SiC [5], что объясняется высокими значениями ТКЛР Al₂O₃ ($7,8 \cdot 10^{-6}$ 1/°C при комнатной температуре и $11,0 \cdot 10^{-6}$ 1/°C при 1800 °C), повышающего тепловое расширение композиционного материала (рис. 1). Согласно данным [6], Al₂O₃ на границах зерен SiC образует аморфную фазу с оксидом кремния, т. е. силы свя-

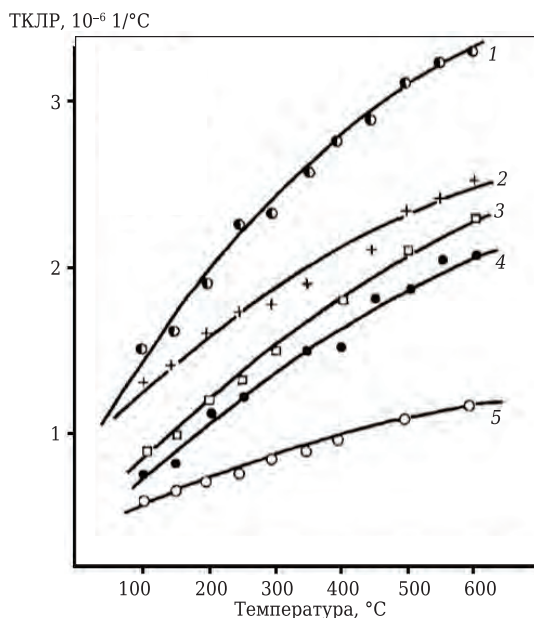


Рис. 2. Температурные зависимости ТКЛР керамики SiC-B₄C пористостью 20 (1), 25 (2), 29 (3), 36 (4) и 41,2 % (5)

Таблица 3. Температурные зависимости ТКЛР разных материалов

Температура, °C	ТКЛР, 10 ⁻⁶ 1/°C						
	B ₄ C* ² [21]	AlN* ¹ [22]	Si ₃ N ₄ * ² [22]	BN* ² [22]	TiC _{0,96} * ¹ [23]	TiN* ¹ [23]	TiB ₂ * ¹ [24]
25	3,9	4,8	2,7	0,8	7,4	8,7	4,5
300	4,1	4,9	2,9	–	7,6	8,9	4,6
500	4,8	5,0	3,0	–	7,7	9,1	4,7
1000	5,3	5,1	3,2	–	7,9	9,4	4,9
1400	4,9	–	–	–	–	–	5,2

*¹ Материалы на основе AlN, TiC_{0,96}, TiN, TiB₂ для определения ТКЛР получены спеканием.

*² Материалы на основе B₄C, Si₃N₄, BN для определения ТКЛР получены горячим прессованием.

зи на границе оксидная фаза – SiC ослабляются, что приводит к дополнительному росту ТКЛР.

Одним из самых интересных свойств, наблюдаемых в карбиде кремния, является возможность получения отрицательного ТКЛР [20], что указывает на сжатие тетраэдрически скоординированной решетки при нагревании; отрицательные значения ТКЛР наблюдаются при низких температурах (<120 K) [20].

Тепловое расширение реальных поликристаллических материалов на основе SiC определяется следующими основными факторами: концентрацией примесей и дефектов, наличием и видом спекающих добавок, присутствием вторичных фаз в составе материала, характеризующихся высоким тепловым расширением, а также пористостью (рис. 2) и др. Температурные зависимости ТКЛР разных бескислородных соединений приведены в табл. 3.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения реакционно-спеченных SiC-материалов (SiSiC-материалов) использовали порошки α-SiC марки M40 с размером частиц $d_{0,5} = 28,9$ мкм и марки M5 с $d_{0,5} = 3,7$ мкм; технического углерода марки K-354 и технического кремния марки Kp00. Соотношение порошков SiC марок M40 и M5 для всех составов 2:1. Технологический процесс получения материалов включал перемешивание компонентов в барабанном смесителе; пластифицирование шихты 2 %-ным водным раствором полиэтиленгликоля; гранулирование; полусухое прессование образцов диаметром 5 и высотой 25 мм; сушку и высокотемпературную пропитку расплавом кремния при 1600 °C в вакууме [25, 26]. Составы материалов приведены в табл. 4.

Искусственная пористость материалов создается путем увеличения количества углерода в исходной шихте и снижения исходного количества кремния.

Жидкофазно-спеченные SiC-материалы (LPSSiC-материалы) получали по технологии, описанной в публикациях [27–29]. В качестве исходного сырья использовали α-SiC марки M5, измельченный в планетарной мельнице до размера частиц $d_{0,5} = 0,8$ мкм, в качестве оксидной добавки — смесь порошков Y₂O₃ и Al₂O₃ в соотношении 3 : 5, образующих на стадии спекания алюмоиттриевый гранат (YAG) [30]. Технологический процесс полу-

Таблица 4. Исходные составы и свойства SiSiC-материалов

Концентрация компонента, мас. %		Плотность (ρ±0,02), г/см ³	Пористость (П±0,1), %
α-SiC (M40 + M5)	углерод		
90	10	3,11	0
90	10	3,04	1,0
90	10	3,00	2,0
88	12	2,90	5,0
86	14	2,85	8,0
85	15	2,80	10,0
82	18	2,75	12,0

Таблица 5. Исходные составы и свойства LPSSiC-материалов

Концентрация компонента, мас. %		Плотность (ρ±0,02), г/см ³	Пористость (П±0,1), %
SiC	3Y ₂ O ₃ ·5Al ₂ O ₃		
80	20	3,33	0,8
85	15	3,29	1,4
90	10	3,23	2,8
95	5	3,18	3,8

чения LPSSiC-материалов включал перемешивание компонентов в барабанном смесителе; пластифицирование шихты 2 %-ным водным раствором полиэтиленгликоля; гранулирование; полусухое прессование образцов диаметром 6 и высотой 30 мм; сушку и высокотемпературное спекание при 1930 °C в течение 1 ч в атмосфере аргона [31]. Составы материалов приведены в табл. 5.

Горячепрессованный карбид кремния (HPSiC) получали из измельченного порошка α-SiC ($d_{0,5} = 0,8$ мкм), в качестве спекающей добавки использовали 5 мас. % YAG. Термообработку в установке горячего прессования осуществляли при температуре 1850 °C и давлении 30 МПа в течение 15 мин в атмосфере аргона [32]. Образец в виде таблетки разрезали алмазным диском на части размерами 5×5×25 мм для проведения термических испытаний. Полученная керамика обладает следующими свойствами: ρ = 3,24 г/см³, П = 1,0 %. Плотность и пористость образцов определяли методом гидростатического взвешивания, ТКЛР — на dilatометре DIL 402 C в интервале 20–1800 °C в атмосфере аргона. Образцы помещали в горизонтальный графитовый держатель, оснащенный графитовым толкателем с высокоточным преобразователем смещения. Нагревание осуществляли до 1800 °C

(для LPSSiC- и HPSiC-материалов) и до 1400 °C (для SiSiC-материалов).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Пористость существенно влияет на тепловое расширение материалов (рис. 3). Стандартные SiSiC-материалы получают пористостью, близкой к нулю. ТКЛР таких материалов имеет максимальные значения во всем температурном интервале (см. рис. 3). При пористости 12 % ТКЛР SiSiC-материалов снижается до $3,8 \cdot 10^{-6}$ 1/°C (при 1400 °C). Тепловое расширение SiSiC-материалов зависит от дисперсного состава исходных порошков SiC, количества и вида вводимого углеродного компонента (углерод, графит, нефтяной кокс и др.), количества кремния и метода пропитки кремнием пористой заготовки, температуры и длительности процесса силицирования. При изменении параметров реакционного спекания можно получать SiC-материалы разной пористости (см. табл. 4) с разными значениями ТКЛР (см. рис. 3). При увеличении пористости SiSiC-материалов их ТКЛР снижается, однако такие материалы характеризуются низким уровнем механических свойств [25].

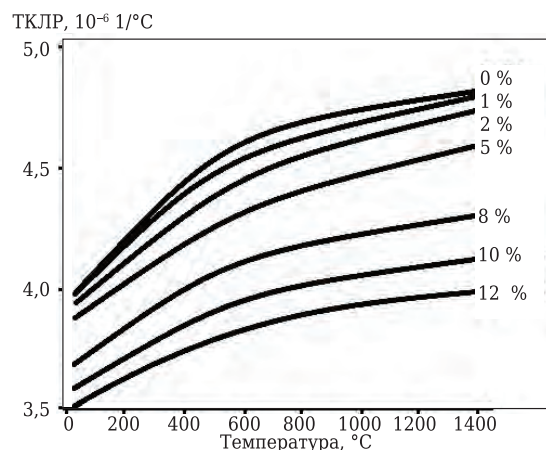


Рис. 3. Температурные зависимости ТКЛР SiSiC-материалов разной пористости (указана на кривых)

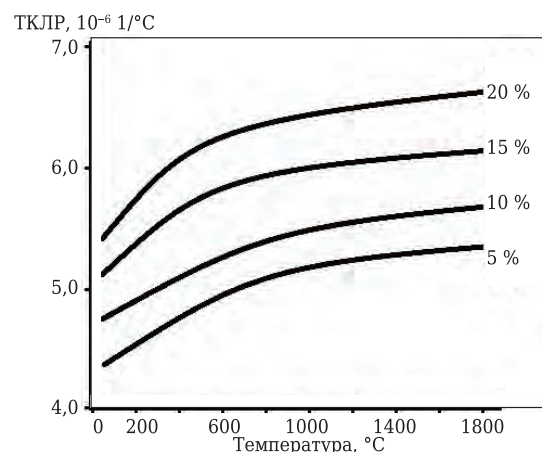


Рис. 4. Температурные зависимости ТКЛР LPSSiC-материалов при разном содержании в них YAG (указано на кривых)

При реакционном спекании SiC-материалов между первичными частицами α -SiC формируется фаза вторичного β -SiC [25]; в материале присутствует также до 5 об. % Si как свободного, так и в виде твердого раствора Si в β -SiC. Все фазовые составляющие имеют равное или близкое с карбидом кремния тепловое расширение, поэтому беспористый SiSiC-материал характеризуется меньшим тепловым расширением во всем температурном интервале, чем LPSSiC-материал (рис. 3–5). Высокопористый материал ($P = 12$ %) характеризуется меньшим изменением теплового расширения в интервале 20–1400 °C по сравнению с беспористым SiSiC-материалом.

Тепловое расширение оксидов значительно выше, чем у карбида кремния, поэтому LPSSiC-материалы с высоким содержанием YAG (20 мас. %) имеют более высокий ТКЛР, чем материалы с 5 мас. % YAG (см. рис. 4), однако из-за их высокой пористости они характеризуются низким уровнем механических свойств.

Сравнивая HPSiC- и LPSSiC-материалы с равным количеством оксидных добавок (5 мас. %), можно отметить преимущества HPSiC-материалов (см. рис. 5) из-за низкой пористости. Тепловое расширение HPSiC-материала ниже, чем беспористого SiSiC-материала, однако можно предположить, что при увеличении содержания оксидов (>5 мас. %) ТКЛР HPSiC-материала будет выше, чем у SiSiC-керамики.

Путем изменения пористости и правильного выбора спекающих добавок можно получить SiC-материалы с разными значениями ТКЛР, отвечающие требованиям конкретных областей применения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены ТКЛР керамики на основе SiC, полученной реакционным и жидкофазным спеканием, горячим прессованием. При увеличении пористо-

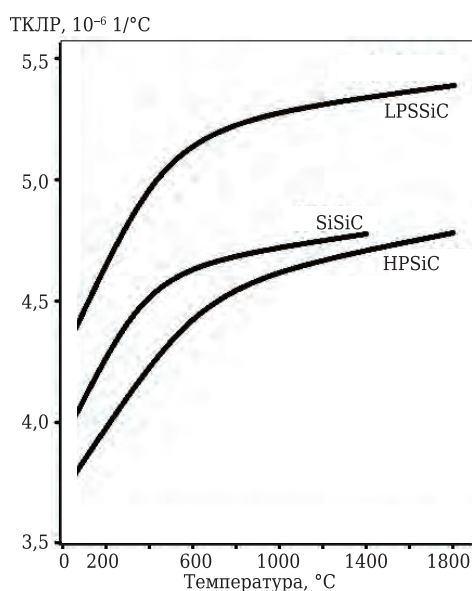


Рис. 5. Температурные зависимости ТКЛР керамики на основе SiC

сти реакционно-спеченных материалов их тепловое расширение уменьшается. Поскольку оксиды характеризуются более высоким тепловым расширением, чем SiC, то у жидкофазно-спеченного SiC-материала при увеличении содержания в нем оксидов ТКЛР растёт. Наиболее низкое значение ТКЛР наблюдается у горячепрессованного SiC-материала при малом содержании в нем оксидов (5 мас. %).

Библиографический список

1. **Briggs, J.** Engineering ceramics in Europe and the USA / J. Briggs. — Enceram : Menith Wood. UK, Worcester, 2011. — 331 p.
2. **Гаршин, А. П.** Реакционно-спеченные карбидокремниевые материалы конструкционного назначения. Физико-механические и триботехнические свойства / А. П. Гаршин, С. Г. Чулкин. — СПб. : изд-во Политехн. ун-та, 2006. — 84 с.
3. **Гаршин, А. П.** Карбид кремния. Монокристаллы, порошки и изделия на их основе / А. П. Гаршин. — СПб. : изд-во Политехн. ун-та, 2006. — 124 с.
4. **Кржижановский, Р. Е.** Теплофизические свойства неметаллических материалов. Окислы : справочная книга / Р. Е. Кржижановский, З. Ю. Штерн. — Л. : Энергия, 1973. — 118 с.
5. **Bortz, S. A.** Properties of structural ceramics / S. A. Bortz, D. C. Larsen // Camp. J. Jan. — 1981. — № 2. — P. 16–31.
6. **Hikata, A.** Ultrasonic study of sintered SiC at low temperatures / A. Hikata, C. Elbaum, Y. Inomata [et al.] // Mater. Res. Bull. — 1985. — Vol. 20, № 7. — P. 823–828.
7. **Palchae, D. K.** Thermal expansion of silicon carbide materials / D. K. Palchae, Z. K. Murlieva, K. S. Palchae // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. — 1994. — Vol. 66, № 6. — P. 660–662.
8. **Li, Z.** Thermal expansion of the hexagonal (6H) polytype of silicon carbide / Z. Li, R. C. Bradt // J. Am. Ceram. Soc. — 1986. — Vol. 69, № 12. — P. 863–866.
9. **Li, Z.** Thermal expansion of the hexagonal (4H) polytype of SiC / Z. Li, R. C. Bradt // J. Appl. Phys. — 1986. — Vol. 60, № 2. — P. 612–614.
10. **Li, Z.** Thermal expansion of the cubic (3C) polytype of SiC / Z. Li, R. C. Bradt // J. Mater. Sci. — 1986. — Vol. 21, № 12. — P. 4366–4368.
11. **Li, Z.** Thermal expansion and thermal expansion anisotropy of SiC polytypes / Z. Li, R. C. Bradt // J. Am. Ceram. Soc. — 1987. — Vol. 70, № 7. — P. 445–448.
12. **Touloukian, Y. S.** Thermal conductivity-metallic elements and alloys / Y. S. Touloukian, R. K. Kirby, R. E. Taylor [et al.] // Thermophysical Properties of Matter. — 1970. — Vol. 1. — P. 873–878.
13. **Hazen, R. M.** Comparative crystal chemistry. Temperature, pressure, composition and the variation of crystal structure / R. M. Hazen, L. M. Finge // Conference Proceedings of University of Tokyo Hongo, Tokyo, Japan, 1982. — P. 115.
14. **Perevislov, S. N.** Microstructure and mechanical properties of SiC-materials sintered in the liquid phase with the addition of a finely dispersed agent / S. N. Perevislov, I. B. Panteleev, A. P. Shevchik [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2018. — Vol. 58, № 5. — P. 577–582.
15. **Перевислов, С. Н.** Микроструктура и механические свойства LPSSiC-материалов с высокодисперсной спекающей добавкой / С. Н. Перевислов, И. Б. Пантелеев, А. П. Шевчик [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 10. — С. 42–47.
15. **Wyckoff, R. W. G.** Crystal Structure / R. W. G. Wyckoff. — New York : Liter science, 1963. — 111 p.

16. **Гнесин, Г. Г.** Карбидокремниевые материалы / Г. Г. Гнесин. — М. : Metallurgy, 1977. — 216 с.
17. **Гнесин, Г. Г.** Бескислородные керамические материалы / Г. Г. Гнесин. — Киев : Техника, 1987. — 159 с.
18. **Хениш, Г.** Карбид кремния / Г. Хениш, Р. Рой. — М. : Мир, 1972. — 349 с.
19. **Новикова, С. И.** Термическое расширение твердого тела / С. И. Новикова. — М. : Наука, 1974. — 293 с.
20. **Talwar, D. N.** Thermal expansion coefficient of 3C-SiC / D. N. Talwar, J. C. Sherbondy // Applied Physics Letters. — 1995. — Vol. 67, № 22. — P. 3301–3303.
21. **Tsagareishvili, G. V.** Thermal expansion of boron and boron carbide / G. V. Tsagareishvili, T. G. Nakashidze, J. S. Jobava [et al.] // Journal of the Less Common Metals. — 1986. — Vol. 117, № 1/2. — P. 159–161.
22. **Косолапова, Т. Я.** Неметаллические тугоплавкие соединения / Т. Я. Косолапова, Т. В. Андреева, Т. С. Бартыцкая [и др.]. — М. : Metallurgy, 1985. — 224 с.
23. **Косолапова, Т. Я.** Свойства, получение и применение тугоплавких соединений / Т. Я. Косолапова. — М. : Metallurgy, 1986. — 928 с.
24. **Самсонов, Г. В.** Борицы / Г. В. Самсонов, Т. И. Сербрякова, В. А. Геронов. — М. : Атомиздат, 1975. — 376 с.
25. **Nesmelov, D. D.** Reaction sintered materials based on boron carbide and silicon carbide / D. D. Nesmelov, S. N. Perevislov // Glass and Ceramics. — 2015. — Vol. 71, № 9/10. — P. 313–319.
26. **Perevislov, S. N.** Materials based on boron carbide obtained by reaction sintering / S. N. Perevislov, A. S. Lysenkov, D. D. Titov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing. — 2019. — Vol. 525, № 1. — P. 012074.
27. **Markov, M. A.** Preparation of MoSi₂-SiC-ZrB₂ structural ceramics by free sintering / M. A. Markov, S. S. Ordan'yan, S. V. Vikhman [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 60, № 4. — P. 385–388.
28. **Марков, М. А.** Получение конструкционной керамики в системе MoSi₂-SiC-ZrB₂ свободным спеканием / М. А. Марков, С. С. Орданьян, С. В. Вихман [и др.] // Новые огнеупоры. — 2019. — № 8. — С. 34–37.
28. **Perevislov, S. N.** Evaluation of the crack resistance of reactive sintered composite boron carbide-based materials / S. N. Perevislov // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 60, № 3. — P. 168–173.
29. **Перевислов, С. Н.** Оценка трещиностойкости реакционно-спеченных композиционных материалов на основе карбида бора / С. Н. Перевислов // Новые огнеупоры. — 2019. — № 3. — С. 49–54.
29. **Frolova, M. G.** Molding features of silicon carbide products by the method of hot slip casting / M. G. Frolova, A. V. Leonov, Y. F. Kargin [et al.] // Inorg. Mater. : Applied Research. — 2018. — Vol. 9, № 4. — P. 675–678.
30. **Lysenkov, A. S.** Composite material Si₃N₄/SiC with calcium aluminate additive / A. S. Lysenkov, K. A. Kim, D. D. Titov [et al.] // Journal of Physics : conference series. — 2018. — Vol. 1134, № 1. — P. 012036.
31. **Perevislov, S. N.** Production of ceramic materials based on SiC with low-melting oxide additives / S. N. Perevislov, A. S. Lysenkov, D. D. Titov [et al.] // Glass and Ceramics. — 2019. — Vol. 75, № 9/10. — P. 400–407.
32. **Perevislov, S. N.** Hot-pressed ceramic SiC-YAG materials / S. N. Perevislov, A. S. Lysenkov, D. D. Titov [et al.] // Inorg. Mater. — 2017. — Vol. 53, № 2. — P. 220–225. ■

Получено 05.04.20
© С. Н. Перевислов, 2020 г.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

- В статье следует сообщить цель проведения работы, привести фактические данные, их анализ и дать заключение (выводы). Текст статьи должен быть дополнен кратким рефератом и ключевыми словами. Для оформления рукописи используйте 12-й размер шрифта через 1,5 интервала. Рекомендованное максимальное число страниц рукописи (A4) — 15. Формулы, оформляемые отдельной строкой, должны набираться с использованием редактора формул (Equation). Библиографический список следует оформлять в соответствии с ГОСТ 7.1–2003. Использование в библиографическом списке DOI обязательно. Рисунки должны быть четкими, упрощенными и не загроможденными надписями. На графики желательно не наносить масштабную сетку (за исключением номограмм).
- В статье должны быть указаны ученая степень, адрес и телефон каждого автора. Также следует указать контактное лицо, чей E-mail будет указан при публикации. Все материалы редакция просит предоставлять в электронном виде.
- Если статья отправлена по E-mail, допускается оформление изображений в виде отдельных файлов формата TIF (цветные и тоновые — 300 dpi, штриховые — 600 dpi), JPEG, EPS. Изображения (за исключением диаграмм Excel), внедренные в файлы формата DOC, в качестве оригиналов не принимаются, как не обеспечивающие стандартного качества полиграфического исполнения.
- Представляя рукопись в редакцию, авторы передают издателю авторское право на публикацию ее в журнале. В качестве гонорара авторы могут получить оттиск своей статьи в формате PDF, который высылается первому автору или любому другому (по указанию авторов). Направление в редакцию работ, опубликованных или посланных для напечатания в редакции других журналов, не допускается.
- Статья, пришедшая в редакцию от зарубежных авторов, вначале отдается на рецензирование, редактируется, переводится на русский язык и публикуется в журнале «Новые огнеупоры». Затем статья отправляется на публикацию в журнал «Refractories and Industrial Ceramics» вместе с английской версией, присланной автором. Таким образом, конечный вариант статьи, опубликованной в журнале «Refractories and Industrial Ceramics», может немного отличаться от первоначального, присланного авторами.

RULES OF DRAWING UP OF ARTICLES

- It is necessary to state in the article the aim of the research work, to cite factual data, to give their analysis and conclusions. The text of the article should be supplemented with a short abstract and key words. To make out the manuscript, use the 12th font size in 1.5 intervals. The recommended maximum number of pages of the manuscript (A4) is 15. Formulas formed by an individual line should be typed using the Equation Editor. Please use the DOI number in the bibliographic list. Don't make references to sources which are difficult of access. Figures should be distinct, simplified and not overloaded with inscriptions. It is desirable not to scribe a graticule on the diagrams (with the exceptions of nomograms).
- Scientific degree, address and telephone of every author should be given in the article. All the materials of the articles are required to be present to the editorial board in electronic form.
- If the article is sent by e-mail it is required to draw up the images only in the form of separate files in format TIF (tone images — 300 dpi, stroke images — 600 dpi), JPEG, EPS. Images (with the exception of Excel diagrams), introduced into files of format DOC are not accepted as originals because they don't ensure the required standard polygraphic quality.
- Providing the article to Editorial office the authors thereby convey the copyright of publication to the publisher. The authors get either one copy of the article in format PDF. It is not allowed offering the Editorial office an article which has been published by other journals or was sent to other publishing houses.
- The article sent to the Editorial office by foreign author is refereed firstly by an independent reviewer. Then it is edited and red-penciled, then it is translated into Russian and published in the journal «Novye Ogneupory». Further both the article and the original author's article are sent off to be published in the journal «Refractories and Industrial Ceramics». Thus the final article published in the journal «Refractories and Industrial Ceramics» can vary slightly from the original variant sent by the author.

- Журнал приветствует, если авторы, в тех случаях, когда это возможно и применимо, помещают данные, подтверждающие результаты их исследований, на общедоступных ресурсах (репозиториях). Авторам и редакторам, которые не располагают предпочитаемыми репозиториями, рекомендуется ознакомиться со списком таких ресурсов, представленным издательством «Springer Nature», а также с политикой издательства в отношении исследовательских данных.

- Список ресурсов

<http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/repositories>

- Политика в отношении исследовательских данных

<http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/faq>

Общие репозитории, такие как figshare и Dryad, также могут быть использованы. Массивы данных, которым репозитории присваивают DOI (идентификаторы цифровых объектов), могут приводиться в списках цитируемых источников. Ссылки на данные должны включать минимум информации, рекомендованной DataCite: авторы, название, издатель (название репозитория), идентификатор.

- DataCite <https://www.datacite.org/>

«Springer Nature» предоставляет службу поддержки в отношении исследовательских данных для редакторов и авторов, с которой можно связаться по адресу researchdata@springernature.com. Эта служба дает рекомендации по соответствию политике в области исследовательских данных и поиску ресурсов для их размещения. Она независима от редакций журналов, книг и конференций и не дает советов по рукописям.

- The journal encourages authors, where possible and applicable, to deposit data that support the findings of their research in a public repository. Authors and editors who do not have a preferred repository should consult «Springer Nature's» list of repositories and research data policy.

• List of Repositories

<http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/repositories>

• Research Data Policy

<http://www.springernature.com/gp/group/data-policy/faq>

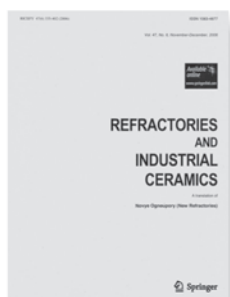
General repositories — for all types of research data — such as figshare and Dryad may also be used.

Datasets that are assigned digital object identifiers (DOIs) by a data repository may be cited in the reference list. Data citations should include the minimum information recommended by DataCite: authors, title, publisher (repository name), identifier.

• DataCite <https://www.datacite.org/>

«Springer Nature» provides a research data policy support service for authors and editors, which can be contacted at researchdata@springernature.com. This service provides advice on research data policy compliance and on finding research data repositories. It is independent of journal, book and conference proceedings editorial offices and does not advise on specific manuscripts.

ВНИМАНИЕ!



Просим в библиографическом списке статей, опубликованных в журнале «Новые огнеупоры», после русской версии дополнительно приводить библиографическое описание статьи в английской версии из журнала «**Refractories and Industrial Ceramics**» (информационно-издательский консорциум «Springer»), если она была в нем опубликована.

Содержание журнала «Refractories and Industrial Ceramics» с указанием авторов, названия статьи, года издания, номера выпуска, страниц, номера журнала публикуется в Интернете:

<http://link.springer.com/journal/11148>

Редакция