

06

## Высокоскоростное электроимпульсное плазменное спекание мелкозернистых керамик $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiC}$ . Исследование микроструктуры и механических свойств

© М.С. Болдин,<sup>1</sup> А.А. Попов,<sup>1</sup> А.А. Мурашов,<sup>1</sup> Н.В. Сахаров,<sup>1</sup> С.В. Шотин,<sup>1</sup> А.В. Нохрин,<sup>1</sup>  
В.Н. Чувильдеев,<sup>1</sup> К.Е. Сметанина,<sup>1</sup> Н.Ю. Табачкова<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 603022 Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> НИТУ „МИСИС“, 119049 Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия  
e-mail: boldin@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 12 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 3 июля 2022 г.

Принято к публикации 5 июля 2022 г.

Исследованы особенности высокоскоростного спекания субмикронных порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с различным содержанием (0, 0.5, 1.5, 5 vol.%) наночастиц  $\beta\text{-SiC}$ . Изучена микроструктура и твердость керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5 \text{ vol.}\% \text{SiC}$ , полученных путем спекания порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с частицами  $\beta\text{-SiC}$  различного типа (наночастицы, субмикронные частицы, волокна). Спекание осуществлялось со скоростями нагрева ( $V_h$ ) от 10 до  $700^\circ\text{C}/\text{min}$ . Процесс спекания керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$  с малыми скоростями нагрева ( $V_h = 10\text{--}50^\circ\text{C}/\text{min}$ ) носит сложный трехстадийный характер, с пологим участком в интервале температур  $1200\text{--}1300^\circ\text{C}$ . При высоких скоростях нагрева ( $V_h > 250^\circ\text{C}/\text{min}$ ) наблюдается обычный трехстадийный характер спекания. Анализ температурных зависимостей уплотнения проведен с использованием модели Янга–Катлера; установлено, что кинетика спекания порошков лимитируется интенсивностью зернограничной диффузии. Показано, что зависимость твердости керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$  от  $V_h$  имеет немонотонный характер с максимумом. В случае чистого оксида алюминия увеличение  $V_h$  приводит к монотонному снижению твердости.

**Ключевые слова:** оксид алюминия, карбид кремния, относительная плотность, диффузия, твердость.

DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53249.95-22

### Введение

Керамика  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiC}$  широко используется в промышленности в качестве износостойких пар трения, режущего инструмента, элементов керамической защиты и др. [1–3]. Частицы SiC позволяют повысить механические свойства оксида алюминия за счет торможения миграции границ зерен и формирования сжимающих внутренних полей напряжений, изменяющих характер разрушения керамики [4–9].

В настоящее время механизмы жидкофазного спекания керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiC}$  при температурах плавления легкоплавкой эвтектики  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2\text{—SiC}$  хорошо исследованы [10,11]. Отмечено, что плавление оксида кремния, присутствующего на поверхности частиц SiC, сопровождается ускорением спекания, но в ряде случаев приводит к аномальному росту зерен [12]. Для дальнейшего повышения механических свойств керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiC}$  перспективным является применение технологий высокоскоростного нагрева, позволяющих минимизировать аномальный рост зерен за счет спекания в твердофазной области [4,8].

Электроимпульсное („искровое“) плазменное спекание (ЭИПС) является одним из перспективных мето-

дов получения керамик с ультрамелкозернистой (УМЗ) микроструктурой [13]. Суть технологии ЭИПС состоит в высокоскоростном (до  $2500^\circ\text{C}/\text{min}$ ) нагреве за счет пропускания миллисекундных импульсов тока большой мощности через графитовую пресс-форму с помещенным внутри нее порошком [13]. Спекание осуществляется в вакууме или в инертной среде в условиях приложения давления. Преимуществом технологии ЭИПС, представляющей собой метод высокоскоростного горячего прессования, является возможность снижения скорости миграции границ зерен. Это позволяет обеспечивать повышенные механические свойства керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiC}$  [14,15]. Анализ литературы показывает, что работ, посвященных ЭИПС керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiC}$ , достаточно много [4,8,14,15], но внимание исследователей сосредоточено на влиянии температуры ЭИПС на параметры микроструктуры и механические свойства керамик. Подробного исследования влияния скорости нагрева на параметры микроструктуры и твердость керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiC}$  не проводилось.

Целью настоящей работы является исследование влияния скорости нагрева на кинетику спекания и рост зерен в керамиках  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ . Чистый оксид алюминия используется в качестве объекта сравнения.

## 1. Материалы и методики

Объектами исследований являлись субмикронные порошки  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  („Taimei Chemicals Co., Ltd“, торговая марка TM-DAR). Для получения композиций  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$  использовали порошки SiC („Alfa Aesar — A Johnson Matthey Company“)  $\beta$ -фазы различной морфологии: нанодисперсных частиц, которые далее будут обозначаться как  $\beta$ - $\text{SiC}_n$ , субмикронных частиц ( $\beta$ - $\text{SiC}_m$ ), а также волокон ( $\beta$ - $\text{SiC}_w$ ). Объектами исследования являлись композиции на основе субмикронного порошка  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (порошок серии № 1), с добавкой 0.5 vol.% (серия № 2), 1.5 vol.% (серия № 3) и 5 vol.%  $\beta$ -SiC (серия № 4).

Исследование влияния типа частиц  $\beta$ -SiC (наночастицы, субмикронные частицы, волокна) проводилось на примере композиции  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5 \text{ vol.}\% \beta$ -SiC. Исследование влияния содержания  $\beta$ -SiC (0, 0.5, 1.5, 5 vol.%) проводилось с использованием нанопорошков  $\beta$ -SiC<sub>n</sub>.

Перемешивание проводилось в планетарной мельнице „FRITSCHE — Pulverisette 6“ в аммиачной воде с добавлением дисперсанта Dolapix CE 64. Перемешивание порошков проводилось в течение 24 h мелющими телами из  $\text{ZrO}_2$ . Частота вращения размольного стакана составляла 200 rev/min. Удаление воды проводилось в печи ЭКПС-10 (70°C, 12 h).

ЭИПС образцов диаметром 12 mm и высотой 3 mm проводилось с помощью установки Dr. Sinter model SPS-625 в графитовых пресс-формах. Величина приложенного одноосного напряжения составляла  $\sigma = 70 \text{ MPa}$ . Спекание проводилось в вакууме. Нагрев осуществляли в двухстадийном режиме — нагрев до температуры 600°C со скоростью  $V_h = 100^\circ\text{C}/\text{min}$ , дальнейший нагрев до температуры спекания  $T_s$  со скоростью 10, 50, 100, 250, 350 или 700°C/min. Температура спекания  $T_s$  была меньше температуры начала аномального роста зерен в керамиках  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \beta$ -SiC вследствие реакции оксида кремния, присутствующего на поверхности частиц  $\beta$ -SiC, с оксидом алюминия [10–12,15]. Выдержка при температуре спекания отсутствовала ( $t_s = 0 \text{ min}$ ). Охлаждение образцов происходило вместе с установкой. Для удаления остатков графита образцы после спекания отжигались в воздушной печи ЭКПС-10, при температуре 750°C, 1 h.

Температура ( $T_1$ ) измерялась с помощью оптического пирометра CHINO IR-AH2, сфокусированного на поверхности графитовой пресс-формы. На основании сопоставления показаний пирометра ( $T_1$ ) и термодары, прикрепленной к поверхности образца, значения  $T_1$  пересчитывались в температуру образца ( $T_2$ ) с использованием эмпирического соотношения:  $T_2 = A \cdot T_1 - B$ , где A и B — константы, зависящие от  $V_h$ .

В процессе ЭИПС измерялась зависимость усадки от температуры нагрева  $L(T)$ . Вклад теплового расширения в  $L(T)$  учитывался в соответствии с методикой [16]. Скорость усадки рассчитывалась в линейном приближении:

$S = \Delta L / \Delta t$ . Пересчет  $L(T)$  в температурную зависимость уплотнения ( $\rho / \rho_{th}$ ) проводился в соответствии с [16].

Плотность керамик ( $\rho$ ) измерялась методом гидростатического взвешивания при комнатной температуре с помощью весов Sartorius CPA. Точность измерения  $\rho$  составляла  $\pm 0.005 \text{ g}/\text{cm}^3$ . Теоретическая плотность ( $\rho_{th}$ )  $\text{Al}_2\text{O}_3$  принята равной  $4.001 \text{ g}/\text{cm}^3$ , а керамик с добавкой 0.5, 1.5 и 5% SiC — 3.997, 3.989 и  $3.961 \text{ g}/\text{cm}^3$  соответственно.

Микротвердость ( $H_v$ ) измерялась на твердомере „Struers Duramin-5“ (нагрузка 2 kg). Значение минимального коэффициента трещиностойкости  $K_{IC}$  рассчитывалось по методу Палмквиста по длине максимальной радиальной трещины. Точность измерений величин  $H_v$  и  $K_{IC}$  составляла  $\pm 1 \text{ GPa}$  и  $\pm 0.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  соответственно.

Микроструктура изучалась при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ) Jeol JSM-6490 и просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) Jeol JEM-2100. Размер частиц ( $R$ ) и зерен ( $d$ ) измерялся методом хорд. Рентгеновский фазовый анализ (РФА) проводился на дифрактометре Shimadzu XRD-7000.

## 2. Экспериментальные результаты

### 2.1. Аттестация порошков

Порошок оксида алюминия имеет однородный гранулометрический состав, средний размер частиц составляет  $\sim 0.1 \mu\text{m}$  (рис. 1, a). Согласно результатам РФА, порошок оксида алюминия является однофазным, 100%  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 2). На поверхности наночастиц  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  присутствует аморфный слой толщиной  $\sim 10 \text{ nm}$  (рис. 1, b).

Нанопорошки карбида кремния являются трехфазными, на рентгенограммах порошка  $\beta$ -SiC<sub>n</sub> отчетливо видны пики кубических фаз 98.6 wt.% 3C-SiC (PDF 00-029-1129) и 1.4 wt.% RS-SiC (PDF 00-049-1623), а также гексагональной фазы 6H-SiC (PDF 01-075-8314). Порошки  $\beta$ -SiC<sub>m</sub> и  $\beta$ -SiC<sub>w</sub> являются двухфазными — на их дифрактограммах видны пики 6H-SiC и 3C-SiC (рис. 2). Точное содержание фазы 6H-SiC в порошках  $\beta$ -SiC<sub>n</sub> и  $\beta$ -SiC<sub>w</sub> установить нельзя — на дифрактограммах присутствует только один пик 101 6H-SiC при угле дифракции  $\sim 34^\circ$ , который сливается с более интенсивным пиком 111 фазы 3C-SiC. Содержание фазы 6H-SiC в порошке  $\beta$ -SiC<sub>m</sub> составляет 4.1 wt.%. Пиков, соответствующих оксиду кремния SiO<sub>2</sub> (PDF 00-052-0784, 00-042-1401, 01-077-8669), не обнаружено — вероятно, SiO<sub>2</sub> находится в рентгеноаморфном состоянии. Средний размер частиц  $\beta$ -SiC<sub>n</sub> и  $\beta$ -SiC<sub>m</sub> составляет  $\sim 50 \text{ nm}$  и  $\sim 0.8\text{--}1 \mu\text{m}$  соответственно. Длина волокон  $\beta$ -SiC<sub>w</sub> достигает  $50 \mu\text{m}$ , а их диаметр — 200 nm.

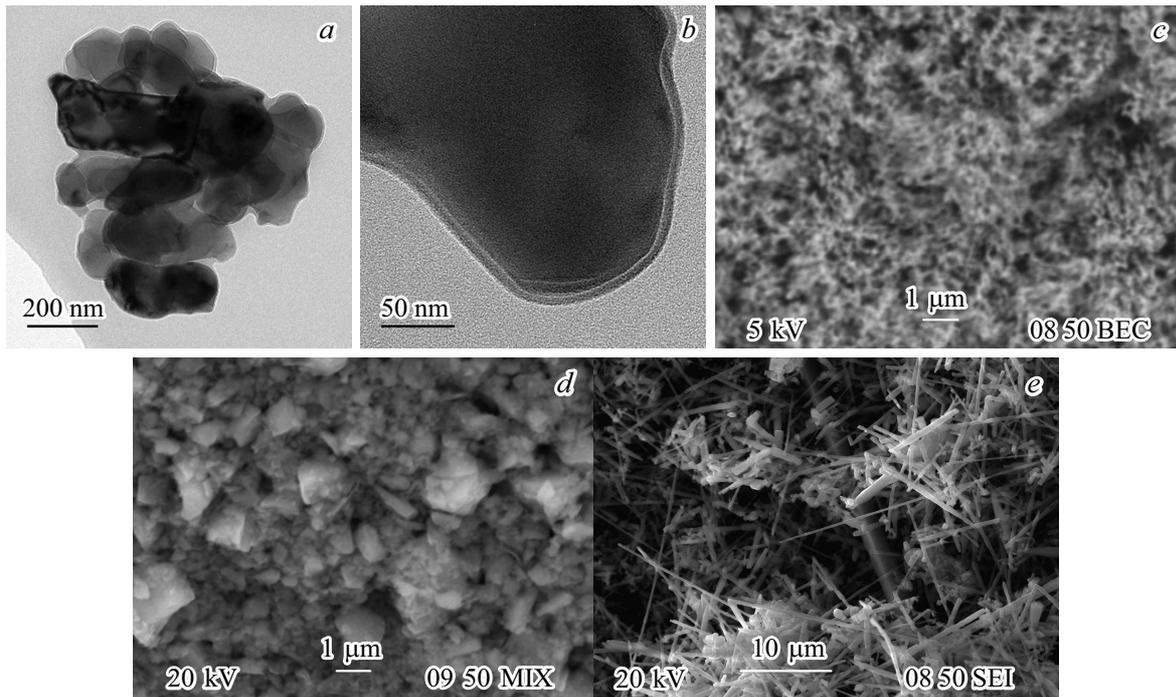


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение исходных порошков  $\alpha-Al_2O_3$  (a, b), наночастиц  $\beta-SiC_n$  (c), субмикронных частиц  $\beta-SiC_m$  (d) и волокон  $\beta-SiC_w$  (e).

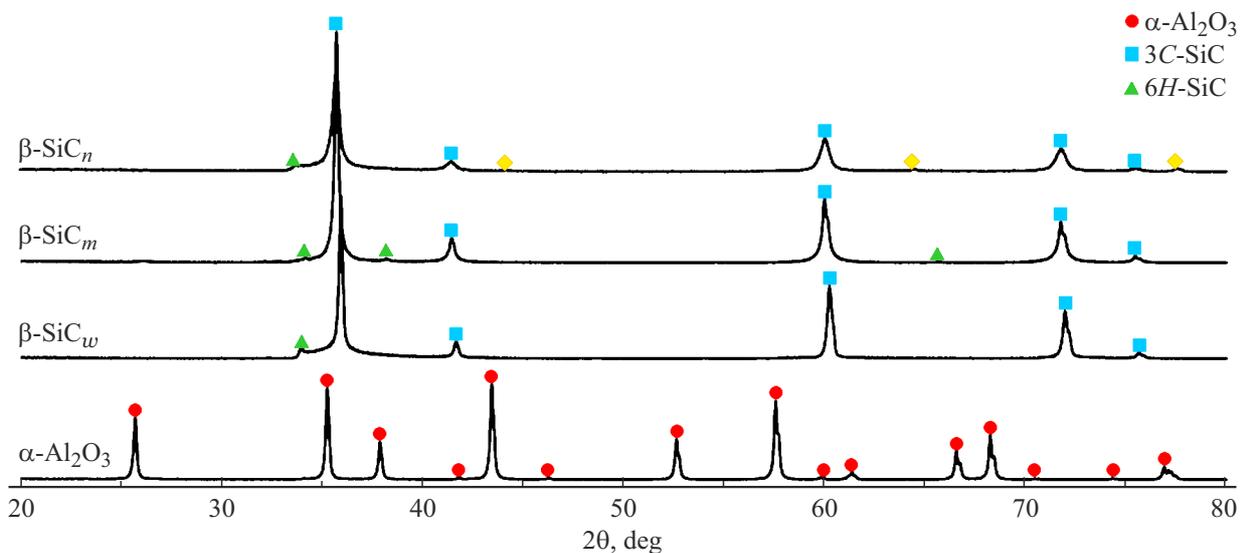


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы исходных порошков.

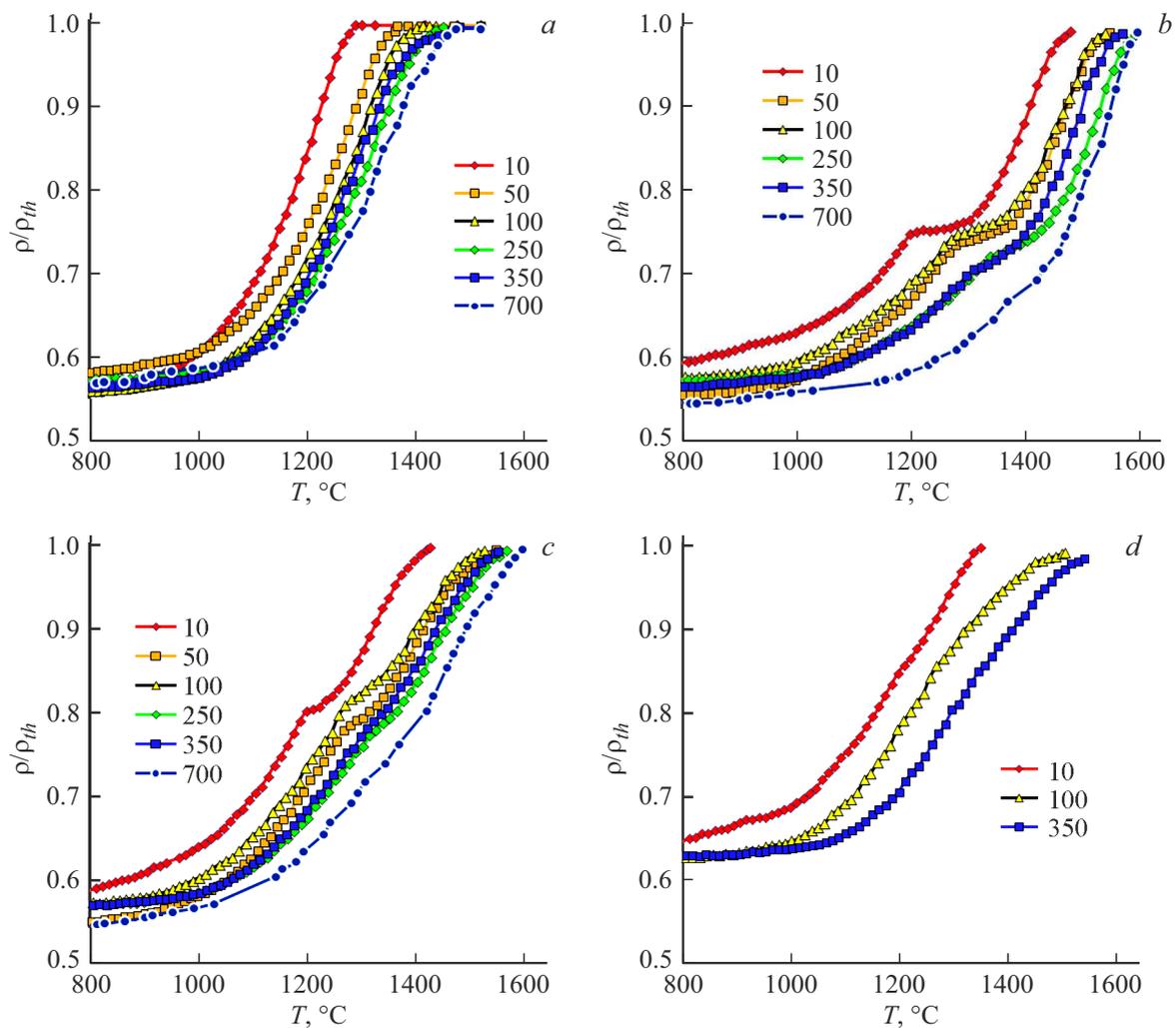
## 2.2. Спекание керамик с различным типом частиц $\beta-SiC$

На рис. 3 представлены температурные зависимости уплотнения  $\rho/\rho_{th}(T)$  для порошков  $Al_2O_3 + 5\% \beta-SiC$  с различным типом частиц карбида кремния. Зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$  для порошков  $Al_2O_3$  имеют классический трехстадийный характер (см. [16,17]).

При увеличении  $V_h$  от 10 до  $700^\circ C/min$  наблюдается смещение зависимостей  $\rho/\rho_{th}(T)$  в область боль-

ших температур нагрева. Температура  $T_{90}$ , при которой относительная плотность керамики достигает  $\rho/\rho_{th}(T) = 90\%$ , при увеличении  $V_h$  от 10 до  $700^\circ C/min$  повышается от  $1220-1230$  до  $1380^\circ C$ . Относительная плотность  $Al_2O_3$  при этом уменьшается от  $99.72$  до  $99.28\%$  ( $\rho/\rho_{th}(T) = 0.44$ ) (табл. 1).

Зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$  керамик  $Al_2O_3 + 5\% \beta-SiC_n$  и  $Al_2O_3 + 5\% \beta-SiC_m$  имеют более сложный характер (рис. 3, b, c) — при малых скоростях нагрева ( $10^\circ C/min$ ) на зависимостях  $\rho/\rho_{th}(T)$ , в интервале



**Рис. 3.** Графики уплотнения при различных скоростях нагрева порошков  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (a),  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_n$  (b),  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_m$  (c),  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_w$  (d). Скорости нагрева указаны на графиках.

температур  $\sim 1200\text{--}1300^\circ\text{C}$  наблюдается участок, на котором относительная плотность изменяется слабо. При увеличении  $V_h$  наблюдается уменьшение интервала температур, соответствующее слабому изменению  $\rho/\rho_{th}(T) \sim 70\text{--}75\%$ . При  $V_h \geq 250^\circ\text{C}/\text{min}$  зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$  имеют классический трехстадийный характер.

Температура  $T_{90}$  в керамике  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_n$  при  $V_h = 10$  и  $700^\circ\text{C}/\text{min}$  составляет  $1410$  и  $1540^\circ\text{C}$ , а в керамике  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_m$  —  $1320$  и  $1490^\circ\text{C}$ . Таким образом, добавка частиц  $5\%\beta\text{-SiC}$  приводит к смещению интервала интенсивной усадки порошков в область более высоких температур нагрева, причем введение наночастиц  $\beta\text{-SiC}_n$  оказывает более существенное влияние на температуру  $T_{90}$ , чем добавка субмикронных частиц  $\beta\text{-SiC}_m$ . При увеличении  $V_h$  от  $10$  до  $700^\circ\text{C}/\text{min}$  относительная плотность керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_n$  снижается от  $99.17$  до  $98.96\%$ , а керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_m$  — от  $99.45$  до  $98.92\%$ .

Кривые спекания  $\rho/\rho_{th}(T)$  керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_w$  (рис. 3, d) схожи с кривыми уплотнения для

чистого  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 3, a); значения температуры  $T_{90}$  при скоростях нагрева  $10\text{--}350^\circ\text{C}/\text{min}$  близки к значениям  $T_{90}$  для  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при тех же  $V_h$ . При  $V_h 10$  и  $350^\circ\text{C}/\text{min}$  относительная плотность керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_w$  составляет  $99.59$  и  $98.28\%$  соответственно (табл. 1). Отметим, что при  $T_s = 1520^\circ\text{C}$  относительная плотность керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}$  ниже относительной плотности оксида алюминия во всем диапазоне  $V_h$ . Следует также подчеркнуть, что с увеличением  $V_h$  снижение относительной плотности керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}$ , спеченных при  $T_s = 1520^\circ\text{C}$ , более выражено, чем для чистого  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (табл. 1).

Как видно из табл. 1, введение  $0.5\%\beta\text{-SiC}$  позволяет уменьшить средний размер зерна  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , при этом масштаб снижения  $d$  с увеличением  $V_h$  зависит от формы и размера частиц. При увеличении  $V_h$  от  $10$  до  $350^\circ\text{C}/\text{min}$  величина  $d$  для чистого  $\text{Al}_2\text{O}_3$  снижается от  $5$  до  $1.8\ \mu\text{m}$  (рис. 4, a, b), а керамик с  $5\%\beta\text{-SiC}_n$  и  $\beta\text{-SiC}_w$  — от  $0.65$  до  $0.4\ \mu\text{m}$  и от  $1.9$  до  $0.9\ \mu\text{m}$  соответственно. Размер зерна керамики с  $5\%\beta\text{-SiC}_m$  не

изменяется ( $d = 0.65 \mu m$ ). Таким образом, наночастицы  $\beta-SiC_n$  оказывают более сильное влияние на стабилизацию микроструктуры оксида алюминия, чем частицы  $\beta-SiC_m$ ; при этом субмикронные частицы, оказывают более сильное влияние, чем волокна  $\beta-SiC_w$ .

Исследования микроструктуры керамики  $Al_2O_3 + 5\% \beta-SiC_n$  показывают, что наночастицы  $\beta-SiC_n$

**Таблица 1.** Свойства керамик на основе оксида алюминия с добавкой 5%  $\beta-SiC$  различного типа

Керамика	$T_s$ , °C	$V_h$ , °C/min	$d$ , $\mu m$	$\rho/\rho_{th}$ , %	$H_v$ , GPa	$K_{IC}$ , MPa · m <sup>1/2</sup>
$Al_2O_3$	1520	10	5.1	99.72	18.6	2.5
		50	3	99.67	18.2	2.3
		100	2.8	99.60	17.9	2.5
		250	2	99.47	17.8	2.4
		350	1.9	99.47	17.2	2.1
		700	1.8	99.28	16.9	2.4
$Al_2O_3 + 5\% SiC_n$	1520	10	0.45	98.53	21.4	2.5
		100	0.2	96.50	21.4	2.6
		350	0.2	94.81	19.9	2.6
	1570	10	0.65	99.17	20.1	3.0
		50	0.4	99.09	21.5	2.5
		100	0.4	99.03	—	—
		250	0.4	98.88	22.0	2.6
		350	0.4	98.96	22.1	2.5
$Al_2O_3 + 5\% SiC_m$	1520	10	0.6	99.05	20.5	2.8
		100	0.55	97.83	20.3	2.7
		350	0.45	97.54	20.2	2.7
	1570	10	0.65	99.45	19.6	2.6
		50	0.65	99.18	20.3	2.5
		100	0.65	99.08	20.5	2.2
		250	0.65	99.14	20.4	2.1
		350	0.65	99.05	20.0	2.1
		700	0.65	98.92	19.8	2.1
$Al_2O_3 + 5\% SiC_w$	1520	10	0.9	99.04	19.4	2.3
		100	0.7	98.08	19.5	2.2
		350	0.6	97.12	17.8	2.2
	1570	10	1.9	99.59	19.0	2.6
		100	0.9	99.00	18.9	2.2
		350	0.9	98.28	18.9	2.2

распределены равномерно в объеме и границах зерен  $Al_2O_3$  (рис. 4, c). В большинстве случаев несколько частиц  $\beta-SiC_n$  расположены вместе (рис. 4, c, d), что свидетельствует об их повышенной склонности к агломерированию, которую не удалось преодолеть путем перемешивания порошков.

Из рис. 4, e видно, что в процессе перемешивания произошла частичная фрагментация волокон — некоторые частицы имеют длину 2–3  $\mu m$ . Вытянутые частицы  $\beta-SiC_w$  расположены преимущественно по границам зерен (рис. 4, f). Следов плавления эвтектики на межфазных границах  $Al_2O_3 - (\beta-SiC)$  не обнаружено.

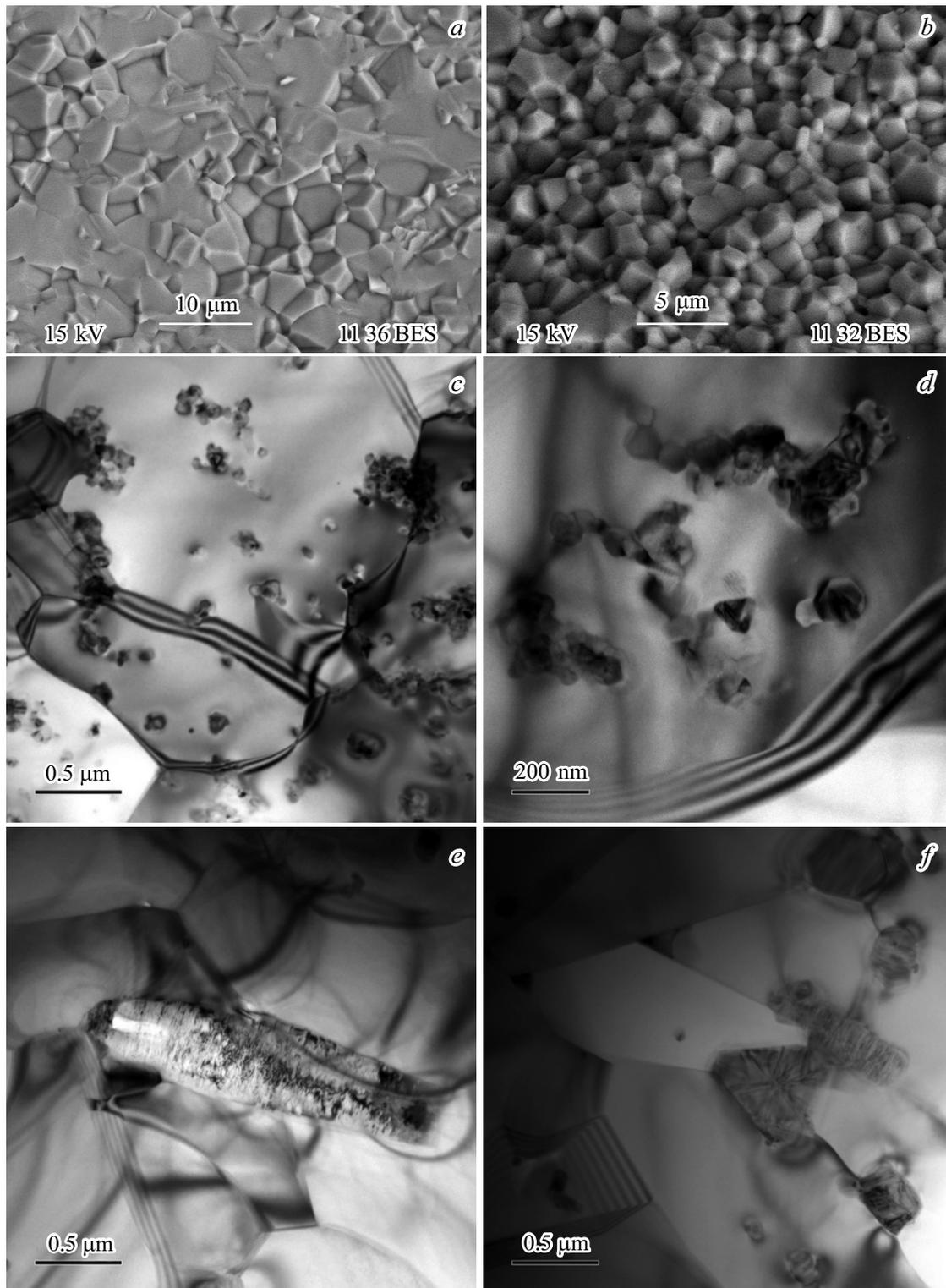
Как видно из табл. 1, введение частиц и волокон  $\beta-SiC$  повышает твердость керамик. Упрочнение наночастицами  $\beta-SiC_n$  позволяет получить керамику с твердостью  $\sim 22$  GPa, частицами  $\beta-SiC_m$  — керамику с твердостью  $\sim 20$  GPa, а волокнами  $\beta-SiC$  — керамику с твердостью  $H_v \sim 19$  GPa. Твердость чистого оксида алюминия лежит в интервале  $\sim 17-19$  GPa. Увеличение  $V_h$  не оказывает заметного влияния на коэффициент трещиностойкости. Для всех исследуемых керамик средним является значение  $K_{IC} \sim 2.5 \pm 0.3$  MPa · m<sup>1/2</sup>.

Важно отметить характер влияния  $V_h$  на  $H_v$  керамик. Как видно из табл. 1, увеличение  $V_h$  от 10 до 700 °C/min приводит к снижению  $H_v$  оксида алюминия от 18.6 до 16.9 GPa. Зависимость  $H_v(V_h)$  для керамик  $Al_2O_3 + 5\% \beta-SiC$  носит немонотонный характер, с максимумом. Скорость нагрева, при которой достигается максимальное значение  $H_v$ , зависит от температуры спекания и типа частиц  $\beta-SiC$  (табл. 1).

### 2.3. Спекание керамик с различным содержанием $\beta-SiC$

На рис. 3, b и 5 представлены зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$  для порошков  $Al_2O_3$  с различным содержанием наночастиц  $\beta-SiC_n$ . Из сравнения рисунков видно, что при  $V_h = 10^\circ C/min$  повышение объемной доли частиц  $\beta-SiC_n$  приводит к увеличению интервала температур, в котором наблюдается немонотонный характер зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$ , уменьшению относительной плотности керамики, при которой наблюдается пологий участок кривой  $\rho/\rho_{th}(T)$ . Отметим также, что увеличение содержания  $\beta-SiC_n$  от 1.5 до 5 vol.% приводит к увеличению температуры  $T_{90}$  от 1250 до 1410 °C при  $V_h = 10^\circ C/min$  и от 1450 до 1540 °C при  $V_h = 700^\circ C/min$  (рис. 3, b, 5, a). Относительная плотность керамики, спеченной при  $T_s = 1520^\circ C$ , при этом снижается от 98.78 до 98.53% при  $V_h = 10^\circ C/min$  и от 98.61 до 94.81% при  $V_h = 700^\circ C/min$  (табл. 1, 2). Таким образом, увеличение содержания частиц  $\beta-SiC_n$  приводит к смещению зависимостей  $\rho/\rho_{th}(T)$  в область больших температур и снижению относительной плотности керамики.

Как видно из табл. 2, добавка 0.5%  $\beta-SiC$  позволяет снизить средний размер зерна керамики ( $T_s = 1520^\circ C$ ) более чем в 2 раза и сформировать УМЗ микроструктуру в оксиде алюминия. В керамике  $Al_2O_3 + 5 vol.\%$



**Рис. 4.** Микроструктура керамик  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (*a, b*),  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\% \beta\text{-SiC}_n$  (*c, d*) и  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\% \beta\text{-SiC}_w$  (*e, f*), полученных путем нагрева до  $T_s = 1570^\circ\text{C}$  со скоростью 10 (*a, c, d*) и  $700^\circ\text{C}/\text{min}$  (*b, e, f*).

$\beta\text{-SiC}_n$ , спеченной при скоростях нагрева 10 и  $700^\circ\text{C}/\text{min}$  ( $T_s = 1570^\circ\text{C}$ ), средний размер зерна составляет 0.65 и  $0.4 \mu\text{m}$  соответственно. Таким образом, в соответствии с уравнением Зинера [9], увеличение объемной доли

наночастиц  $\beta\text{-SiC}_n$  приводит к уменьшению среднего размера зерна керамики.

Как видно из табл. 1 и 2, введение  $\beta\text{-SiC}_n$  приводит к повышению микротвердости керамик во всем интервале

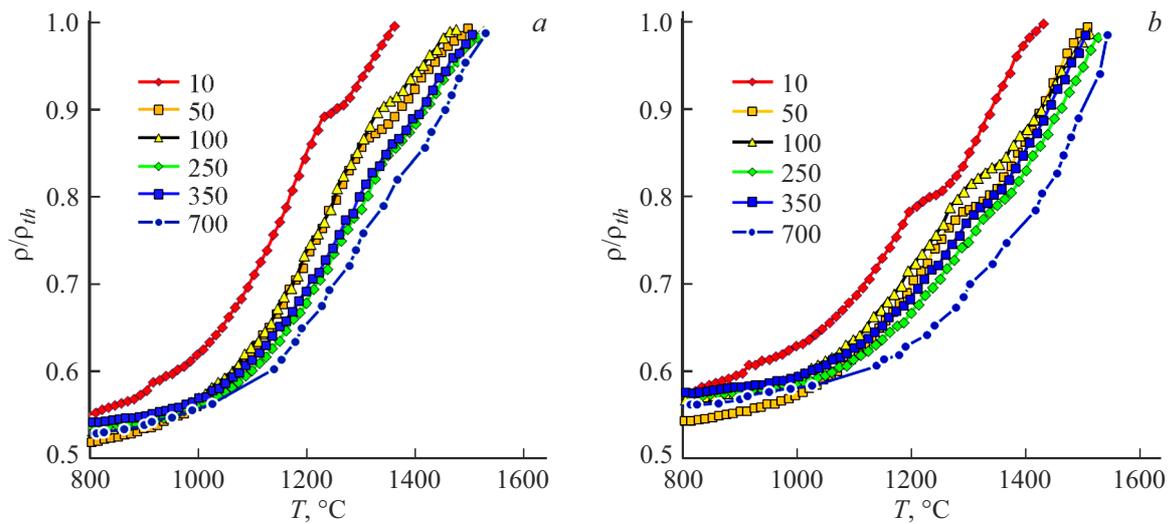


Рис. 5. Графики уплотнения порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с добавкой 0.5 (а) и 1.5%  $\beta\text{-SiC}_n$  (b) при различных  $V_h$ .

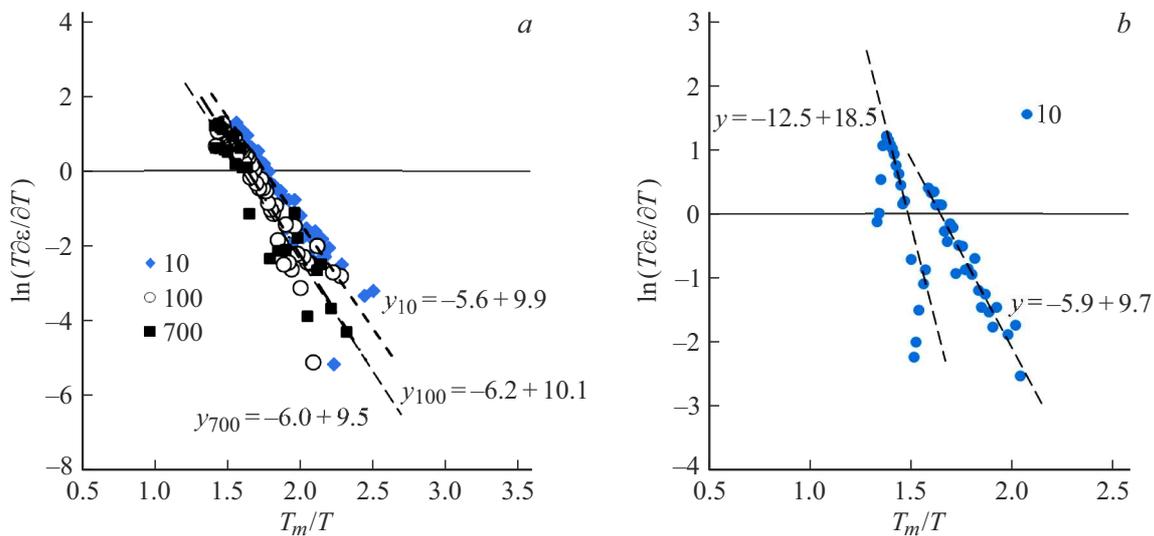


Рис. 6. Температурные зависимости усадки в координатах  $\ln(T\partial\varepsilon/\partial T) - T_m/T$ :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (а);  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_n$  (b). Скорости нагрева указаны на графиках.

исследуемых скоростей нагрева, при этом коэффициент трещиностойкости изменяется незначительно. Ведение добавки 0.5%vol. $\beta\text{-SiC}_n$  повышает  $H_v$  керамики от 17 до  $\sim 21$  ГПа. Аналогичное значение твердости наблюдается в керамике  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 1.5\%\beta\text{-SiC}_n$  (табл. 2). Снижение твердости керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\%\beta\text{-SiC}_n$  обусловлено, по нашему мнению, уменьшением ее относительной плотности (табл. 1). Коэффициент трещиностойкости исследуемых керамик изменяется незначительно и лежит в интервале  $2.5\text{--}3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ .

### 3. Обобщение и анализ результатов

Для анализа кинетики ЭИПС порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \beta\text{-SiC}$  используем модель Янга–Катлера [18], которая описыва-

ет процесс неизотермического спекания сферических частиц в условиях одновременного протекания процессов объемной и зернограничной диффузии, а также пластической деформации (ползучести). В соответствии с [18] угол наклона температурной зависимости относительной усадки ( $\varepsilon$ ) в координатах  $\ln(T\partial\varepsilon/\partial T) - T_m/T$  соответствует эффективной энергии активации спекания  $mQ_s$ , где  $T_m = 2326 \text{ K}$  — температура плавления  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $m$  — коэффициент, зависящий от доминирующего механизма спекания ( $m = 1/3$  — для случая зернограничной диффузии,  $m = 1/2$  — для объемной диффузии,  $m = 1$  для вязкого течения материала (ползучести)). В случае ЭИПС субмикронных порошков величину коэффициента  $m$  можно принять равной  $1/3$  [19].

Величина эффективной энергии активации  $mQ_s$  при ЭИПС субмикронных порошков  $\text{Al}_2\text{O}_3$  лежит в ин-

**Таблица 2.** Параметры микроструктуры и механические свойства керамик с различным содержанием наночастиц  $\beta$ -SiC<sub>n</sub>

$\beta$ -SiC <sub>n</sub> , %	$T_s$ , °C	$V_h$ , °C/min	$d$ , $\mu$ m	$\rho/\rho_{th}$ , %	$H_v$ , GPa	$K_{IC}$ , МПа · м <sup>1/2</sup>
0.5	1520	10	0.99	99.66	19.7	2.7
		50	0.89	99.37	20.8	2.4
		100	0.84	99.29	20.6	2.4
		250	0.70	99.05	20.8	2.3
		350	0.67	98.78	21	2.4
		700	0.62	98.61	20.6	2.4
1.5	1520	10	0.72	99.71	20	3.0
		50	0.62	99.35	20.9	2.6
		100	0.57	98.73	21	2.6
		250	0.45	98.40	21	2.4
		350	0.45	98.40	21.3	2.3
		700	0.26	98.21	21.1	2.2

тервале от  $\sim 5.6$  до  $6.2 kT_m$  и практически не зависит от скорости нагрева  $V_h$  (рис. 6, а). При  $m = 1/3$  величина энергии активации ЭИПС порошков Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляет  $\sim 16.8-18.0 kT_m$  ( $\sim 325-360$  kJ/mol). Полученное значение близко к энергии активации зернограничной диффузии кислорода в оксиде алюминия ( $Q_b \sim 380$  kJ/mol  $\sim 19.7 kT_m$  [20]). Аналогичный характер имеют зависимости  $\ln(T\partial\varepsilon/\partial T) - T_m/T$  для керамик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 5%  $\beta$ -SiC<sub>w</sub>, угол наклона которых соответствует эффективной энергии активации  $mQ_s \sim 4.6-5.8 kT_m$ . Таким образом, можно сделать вывод, что кинетика спекания мелкозернистых порошков чистого Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 5 vol.%  $\beta$ -SiC лимитируется интенсивностью зернограничной диффузии.

Как видно из рис. 3, b, c, зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$  для керамик с добавкой нано- и микронных порошков  $\beta$ -SiC имеют более сложный характер — при малых скоростях нагрева в интервале температур  $\sim 1200-1300^\circ\text{C}$  наблюдается немонотонное изменение относительной плотности. Причиной этого является, по нашему мнению, начало полиморфного превращения в карбиде кремния, которое приводит к увеличению периода решетки  $\beta$ -SiC, и, как следствие, к увеличению занимаемого материалом объема. Данный вывод частично подтверждается результатами РФА, свидетельствующими об увеличении объемной доли фазы RS-SiC в УМЗ керамике Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 5%  $\beta$ -SiC<sub>n</sub>.

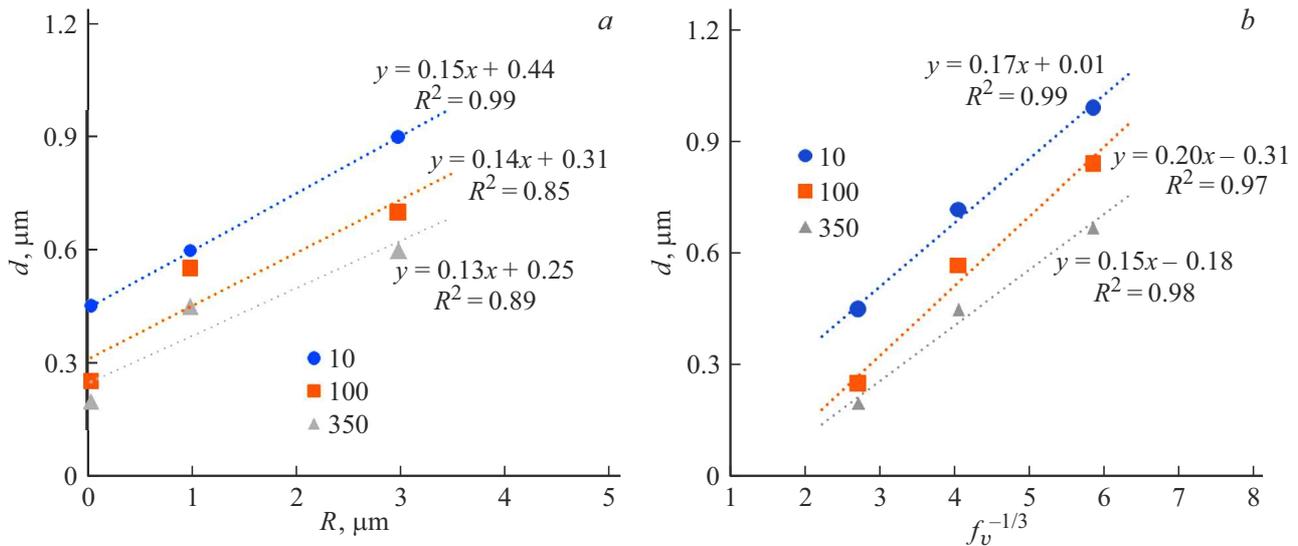
Отметим, что в случае нанопорошков  $\beta$ -SiC, имеющих большую площадь свободной поверхности, пологий участок зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$  в интервале температур  $\sim 1200-1300^\circ\text{C}$  наиболее выражен (рис. 6, b). Уменьшение площади свободной поверхности (увеличение разме-

ра частиц  $\beta$ -SiC) приводит к снижению протяженности полого участка на зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$  (рис. 6, c). В случае волокон  $\beta$ -SiC<sub>w</sub> на зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$  этот участок практически не заметен (рис. 6, d). Поскольку объемная доля частиц  $\beta$ -SiC<sub>n</sub>,  $\beta$ -SiC<sub>m</sub> и  $\beta$ -SiC<sub>w</sub> одинакова (5 vol.%), это позволяет предположить, что существенное влияние на интенсивность процесса полиморфного превращения оказывает фазовый состав порошка карбида кремния, а также концентрация атомов кислорода, адсорбированного на поверхности частиц  $\beta$ -SiC. Обобщение результатов РФА показывает, что в составе нанопорошка  $\beta$ -SiC<sub>n</sub> присутствует кубическая фаза RS-SiC (PDF 00-049-1623), которая отсутствует в порошках  $\beta$ -SiC<sub>m</sub> и  $\beta$ -SiC<sub>w</sub>.

Для керамик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $\beta$ -SiC<sub>n</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $\beta$ -SiC<sub>m</sub> зависимость  $\ln(T\partial\varepsilon/\partial T) - T_m/T$  может быть интерполирована двумя прямыми линиями с различными углами наклона (рис. 6, b). Отметим, что эффективная энергия активации ЭИПС в „низкотемпературной“ области близка к энергии активации ЭИПС чистого оксида алюминия (рис. 6, a), а при более высоких температурах нагрева достигает  $mQ_s \sim 11-13 kT_m$ . В настоящее время точные причины повышения энергии активации ЭИПС порошков оксида алюминия с добавкой наночастиц SiC не определены.

По нашему мнению, одной из причин может быть наличие повышенной концентрации адсорбированного кислорода и/или оксида кремния на поверхности наночастиц  $\beta$ -SiC<sub>n</sub>. Присутствие кислорода на поверхности наночастиц карбидов может оказывать существенное влияние на кинетику ЭИПС [17,21] и механические свойства [21,22] мелкозернистых керамик. В работе [11] отмечено, что при температуре ниже  $1600^\circ\text{C}$  фаза  $\beta$ -SiC может реагировать с поверхностным слоем SiO<sub>2</sub> с образованием SiO и CO. Образование газообразных продуктов реакции может затруднять процесс спекания порошков оксида алюминия и являться одной из причин повышения энергии активации ЭИПС. Отметим, что увеличение скорости нагрева должно приводить к снижению интенсивности реакции в системе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> - SiC и, как следствие, к исчезновению пологого участка на зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$ , что хорошо соответствует экспериментальным данным (рис. 3, b, c).

Проанализируем особенности роста зерен в мелкозернистых керамиках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $\beta$ -SiC. Как видно из табл. 1 и 2, частицы  $\beta$ -SiC препятствуют росту зерен оксида алюминия и позволяют формировать в керамике УМЗ микроструктуру. Анализ представленных в табл. 1 результатов исследований микроструктуры показывает, что зависимость  $d(R)$  с хорошей точностью может быть описана прямыми линиями (рис. 7). Наиболее высокие значения коэффициента достоверности линейной аппроксимации ( $R^2$ ) достигаются в случае нагрева с малыми скоростями ( $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ). В условиях высокоскоростного нагрева, приводящего к снижению относительной плотности керамики (табл. 1, 2), величина коэффициента  $R^2$  снижается. По нашему мнению, это обусловлено



**Рис. 7.** Зависимость среднего размера зерна ( $d$ ) оксида алюминия от размера ( $R$ ) (а) и объемной доли ( $f_v$ ) частиц  $\beta$ -SiC (b).  $T_s = 1520^{\circ}C$ . Скорости нагрева (10, 100, 350  $^{\circ}C/min$ ) указаны на рисунках.

наличием пор, также препятствующих миграции границ зерен [17].

С использованием данных, представленных в табл. 1 и 2, был проведен анализ влияния объемной доли наночастиц  $\beta$ -SiC (0, 0.5, 1.5, 5 vol.%) на средний размер зерна ( $d$ ) оксида алюминия. Наиболее высокие значения коэффициента  $R^2 = 0.97-0.99$  достигнуты в случае линейной интерполяции зависимости  $d(f_v)$  в координатах  $d-f_v^{-1/3}$  (рис. 7, b). Это свидетельствует о том, что соотношение Хиллerta–Хелмана (Hillert–Hellman) ( $d/R = 3.6f_v^{-1/3}$ ) [23] более корректно описывает полученные экспериментальные результаты по сравнению с обычным соотношением Зинера  $d/R = 4/(3f_v)$  [9,23]. Средняя величина коэффициента  $R^2$  в координатах зависимости  $d(f_v)$  в координатах  $d-1/f_v$  составляет  $R^2 = 0.94$ .

Проанализируем теперь влияние размера зерна и частиц  $\beta$ -SiC на твердость керамик.

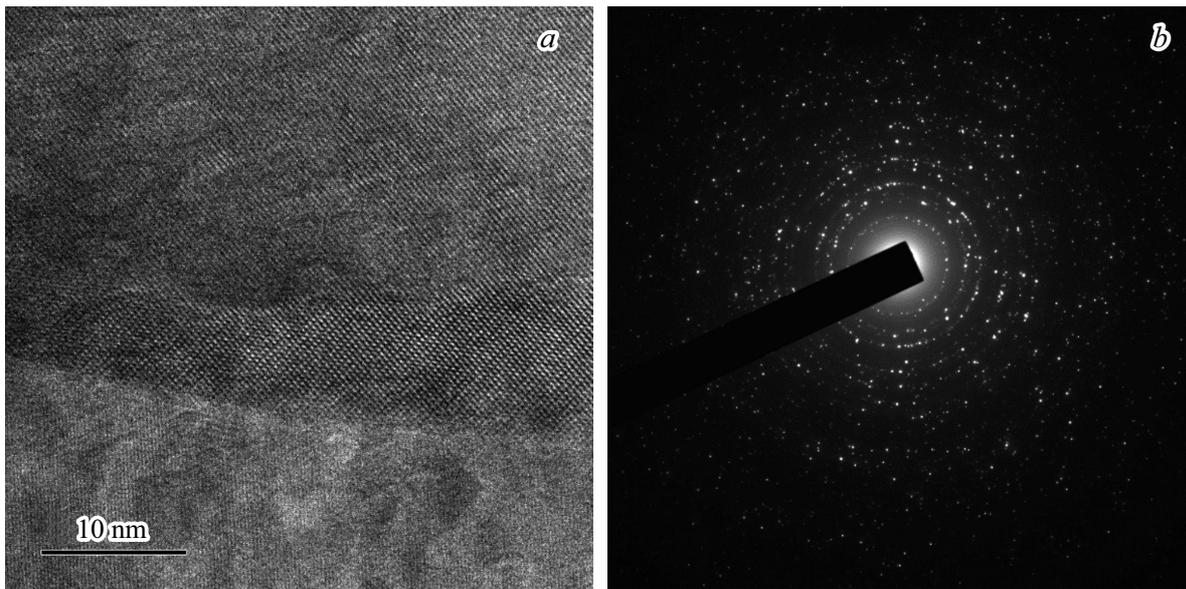
Предварительно следует отметить, что пористость и состояние границ зерен также оказывает значительное влияние на механические свойства керамик. Наиболее наглядно это видно на примере чистого оксида алюминия. Как видно из табл. 1, увеличение скорости нагрева от 10 до 700  $^{\circ}C/min$  приводит к уменьшению относительной плотности от 99.72 до 99.28% и, как следствие, к уменьшению твердости от 18.6 до 16.9 GPa. Таким образом, сравнительно небольшое уменьшение относительной плотности ( $\rho/\rho_{th} = 0.44\%$ ) приводит к снижению твердости оксида алюминия на 1.7 GPa. Полученный результат является достаточно неожиданным, поскольку при увеличении  $V_h$ , одновременно со снижением относительной плотности  $\rho/\rho_{th}$ , наблюдается уменьшение  $d$  от 5.1 до 1.8  $\mu m$ . Тем не менее фактор снижения относительной плотности оказывается более

существенным для твердости оксида алюминия, чем уменьшение  $d$  в  $\sim 2.8$  раза.

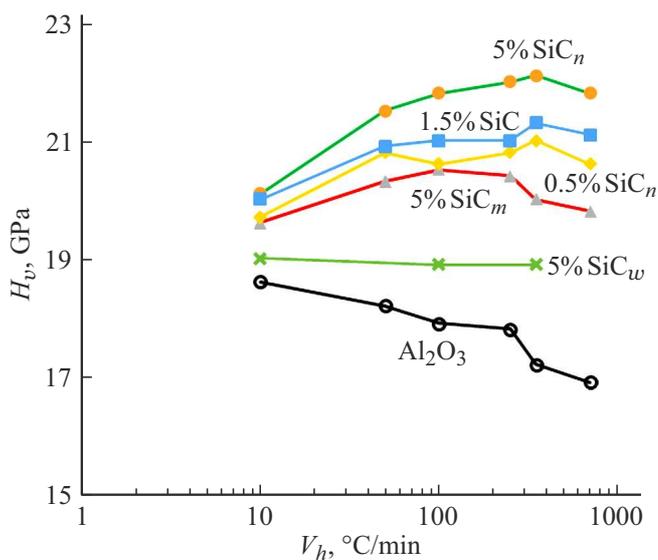
По нашему мнению, косвенное влияние на снижение твердости оксида алюминия с малым размером зерна оказывает особое неравновесное состояние границ зерен. Как видно из рис. 1, b, на поверхности субмикронных частиц  $Al_2O_3$  присутствует аморфный слой, который кристаллизуется при ЭИПС и трансформируется в границы зерен керамики (рис. 8). Результаты электронно-микроскопических исследований не выявили на границах зерен оксида алюминия присутствия аморфной фазы.

Аморфная фаза содержит избыточный свободный объем [24], и при ее кристаллизации могут возникать дефекты вакансионного и дислокационного типа [25]. Это может приводить к увеличению объемной доли неравновесных границ зерен, содержащих избыточный свободный объем [25,26]. Высокоскоростной нагрев приводит к уменьшению общей продолжительности процесса спекания и, как следствие, уменьшает степень релаксации неравновесной структуры границ зерен. Наличие дефектов на границах зерен может оказывать существенное влияние на твердость оксида алюминия и являться одной из причин, оказывающей влияние на снижение относительной плотности образцов, полученных с высокими скоростями нагрева.

Одновременное уменьшение относительной плотности и размера зерна при увеличении скорости нагрева позволяет объяснить немонотонный, с максимумом, характер зависимости  $H_v(V_h)$  для керамик  $Al_2O_3 + \beta$ -SiC (рис. 9). Добавление наночастиц  $\beta$ -SiC<sub>n</sub> позволяет уменьшить размер зерна и повысить твердость оксида алюминия. При увеличении  $V_h$  уменьшение среднего размера зерна приводит к повышению  $H_v$ . Снижение твердости при больших  $V_h$  обусловлено одновременным



**Рис. 8.** Электронно-микроскопическое изображение границы зерна в керамике Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (a) и кольцевая электронограмма (b), соответствующая данному участку микроструктуры. Режимы ЭИПС:  $V_h = 350^\circ\text{C}/\text{min}$ ,  $T_s = 1520^\circ\text{C}$ ,  $t_s = 0 \text{ min}$ .



**Рис. 9.** Зависимость твердости оксида алюминия и керамик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $\beta$ -SiC от скорости нагрева.

снижением относительной плотности керамики и повышенной плотностью дефектов на границе зерен оксида алюминия.

Таким образом, с практической точки зрения, для обеспечения высоких характеристик твердости оксида алюминия необходимо использовать промежуточные скорости нагрева ЭИПС ( $V_h = 100\text{--}350^\circ\text{C}/\text{min}$ ), при которых фактор уменьшения размера зерна будет доминировать над отрицательным влиянием пониженной относительной плотности керамики.

## Заключение

1. Характер температурной зависимости уплотнения  $\rho/\rho_{th}(T)$  порошков Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $\beta$ -SiC определяется скоростью нагрева  $V_h$  и дисперсностью частиц  $\beta$ -SiC. При малых скоростях нагрева (10–50°С/min) порошков оксида алюминия с добавкой нано- и микрочастиц  $\beta$ -SiC зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$  имеют немонотонный характер с пологим участком в интервале температур 1200–1300°С. При больших скоростях нагрева ( $V_h > 250^\circ\text{C}/\text{min}$ ) зависимости  $\rho/\rho_{th}(T)$  имеют обычный трехстадийный характер.

2. Увеличение скорости нагрева приводит к уменьшению среднего размера зерна оксида алюминия и керамик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $\beta$ -SiC. Зависимость среднего размера зерна ( $d$ ) от объемной доли ( $f_v$ ) и размера ( $R$ ) частиц карбида кремния с хорошей точностью описывается уравнением Хилерта–Хелмана:  $d/R = 3.6f_v^{-1/3}$ .

3. Зависимость твердости от скорости нагрева керамик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $\beta$ -SiC имеет немонотонный характер, с максимумом. Максимальные значения твердости керамик Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> +  $\beta$ -SiC достигаются при  $V_h = 100\text{--}350^\circ\text{C}/\text{min}$ . Немонотонность зависимости  $H_v(V_h)$  обусловлена уменьшением среднего размера зерна, снижением относительной плотности керамики и формированием неравновесного состояния границ зерен при увеличении скорости нагрева  $V_h$ .

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-73-10113).

Исследование методом просвечивающей электронной микроскопии выполнено на оборудовании ЦКП „Материаловедение и металлургия“ НИТУ „МИСИС“ (проект Минобрнауки России № 075-15-2021-696).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Z. Yin, S. Yan, J. Ye, Z. Zhu, J. Yuan. *Ceramics Int.*, **45** (13), 16113 (2019). DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.05.128
- [2] E. Gevorkyan, A. Mamalis, R. Vovk, Z. Semiatkowski, D. Morozow, V. Nerubatskiy, O. Morozova. *JINST*, **16**, P10015 (2021). DOI: 10.1088/1748-0221/16/10/P10015
- [3] M.S. Boldin, N.N. Berendeev, N.V. Melekhin, A.A. Popov, A.V. Nokhrin, V.N. Chuvil'deev. *Ceramics Int.*, **47** (18), 25201 (2021). DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.06.066
- [4] J.H. Chae, K.H. Kim, Y.H. Choa, J. Matsushita, J.-W. Yoon, K.B. Shim. *J. Alloys Compd.*, **413**(1–2), 259 (2006). DOI: 10.1016/j.jallcom.2005.05.049
- [5] I. Monohjimoh, M.A. Hussein, N. Al-Aqeeli. *Nanomaterials*, **9** (1), 86 (2019). DOI: 10.3390/nano9010086
- [6] X.L. Shi, F.M. Xu, Z.J. Zhang, Y.L. Dong, Y. Tan, L. Wang, J.M. Yang. *Mater. Sci. Eng. A.*, **527**(18–19), 4646 (2010). DOI: 10.1016/j.msea.2010.03.035
- [7] Y.L. Dong, F.M. Xu, X.L. Shi, C. Zhang, Z.J. Zhang, J.M. Yang, Y. Tan. *Mater. Sci. Eng. A.*, **504**(1–2), 49 (2009). DOI: 10.1016/j.msea.2008.10.021
- [8] J. Liu, Z. Li, H. Yan, K. Jiang. *Adv. Eng. Mater.*, **16** (9), 1111 (2014). DOI: 10.1002/adem.201300536
- [9] Y. Xu, A. Zangvil, A. Kerber. *J. Eur. Cer. Soc.*, **17** (7), 921 (1997). DOI: 10.1016/S0955-2219(96)00164-1
- [10] S. Gustafsson, L.K.L. Falk, E. Lidén, E. Carlström. *Ceramics Int.*, **34** (7), 1609 (2008). DOI: 10.1016/j.ceramint.2007.05.005
- [11] D. Galusek, R. Klement, J. Sedláček, M. Balog, C. Fasel, J. Zhang, M.A. Crimp, R. Riedel. *J. Eur. Cer. Soc.*, **31** (1–2), 111 (2011). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.09.013
- [12] C.C. Anya, S.G. Roberts. *J. Eur. Cer. Soc.*, **17** (4), 565 (1997). DOI: 10.1016/S0955-2219(96)00092-1
- [13] M. Tokita. *Ceramics*, **4** (2), 160 (2021). DOI: 10.3390/ceramics4020014
- [14] L. Gao, H.Z. Wang, J.S. Hong, H. Miyamoto, K. Miyamoto, Y. Nishikawa, S.D.D.L. Torre. *J. Eur. Cer. Soc.*, **19** (5), 609 (1999). DOI: 10.1016/S0955-2219(98)00232-5
- [15] I. Álvarez, R. Torrecillas, W. Solis, P. Peretyagin, A. Fernández. *Ceramics Int.*, **42** (15), 17248 (2016). DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.08.019
- [16] В.Н. Чувильдеев, М.С. Болдин, Я.Г. Дятлова, В.И. Румянцев, С.С. Орданьян. *ЖНХ*, **60** (8), 1088 (2015). [V.N. Chuvil'deev, M.S. Boldin, Ya.G. Dyatlova, V.I. Rumyantsev, S.S. Ordan'yan. *Rus. J. Inorg. Chem.*, **60** (8), 987 (2015). DOI: 10.1134/S0036023615080057]
- [17] M.N. Rahaman. *Ceramic Processing and Sintering* (Marcel Dekker Inc., NY., 2003)
- [18] W.S. Young, I.B. Culter. *J. Am. Ceramic Soc.*, **53** (12), 659 (1970). DOI: 10.1111/j.1151-2916.1970.tb12036.x
- [19] M.S. Boldin, A.A. Popov, E.A. Lantsev, A.V. Nokhrin, V.N. Chuvil'deev. *Materials*, **15** (6), 2167 (2022). DOI: 10.3390/ma15062167
- [20] Г.Дж. Фрост, М.Ф. Эшби. *Карты механизмов деформации* (Металлургия, Челябинск, 1989) [H.J. Frost, M.F. Ashby. *Deformation Mechanism Maps: The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics* (Pergamon Press, Oxford, 1982)]
- [21] Е.А. Ланцев, Н.В. Малехонова, Ю.В. Цветков, Ю.В. Благовещенский, В.Н. Чувильдеев, А.В. Нохрин, М.С. Болдин, П.В. Андреев, К.Е. Сметанина, Н.В. Исаева. *ФХОМ*, **6**, 23 (2020). [E.A. Lantsev, N.V. Malekhonova, Y.V. Tsvetkov, Y.V. Blagoveshchensky, V.N. Chuvil'deev, A.V. Nokhrin, M.S. Boldin, P.V. Andreev, K.E. Smetanina, N.V. Isaeva. *Inorganic Mater.: Appl. Res.*, **12** (3), 650 (2021). DOI: 10.1134/S2075113321030242]
- [22] A. Bokov, A. Shelyug, A. Kurlov. *J. Eur. Cer. Soc.*, **41** (12), 5801 (2021). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.05.007
- [23] D. Fan, L.-Q. Chen, S.-P.P. Chen. *J. Am. Ceramic Soc.*, **81** (3) 526 (1998). DOI: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02370.x
- [24] В.И. Бетехтин, А.М. Глезер, А.Г. Кадомцев, А.Ю. Кипяткова. *ФТТ*, **40** (1) 85 (1998). [V.I. Betekhtin, A.G. Kadomtsev, A.Yu. Kipyatkova, A.M. Glezer. *Phys. Solid State*, **40** (1), 74 (1998). DOI: 10.1134/1.1130237]
- [25] В.Н. Чувильдеев. *Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения* (Физматлит, М., 2004)
- [26] А.В. Mazitov, A.R. Oganov. *Записки Российского Минералогического общества*, **150** (5), 92 (2021). DOI: 10.31857/S086960552105004X [A.B. Mazitov, A.R. Oganov. *Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva* (Proceedings of the Russian Mineralogical Society), **150** (5), 92 (2021). DOI: 10.31857/S086960552105004X]