

УДК 546.623-31:666.3

## ОКСИД АЛЮМИНИЯ И АЛЮМООКСИДНАЯ КЕРАМИКА (Обзор). Часть 3. Российские производители алюмооксидной керамики\*

В обзоре рассмотрен оксид алюминия — свойства, связанные с его применением, разновидности промышленных продуктов, способы производства в дисперсном состоянии, в виде поликристаллической керамики и монокристаллических изделий, химические аспекты технологических процессов. В части 3 обзора представлены российские производители алюмооксидной керамики, главным образом плотной технической, а также огнеупоров и дисперсных глиноземов, данные по составу и свойствам продуктов, а также краткий перечень ассортимента изделий. Кроме того, указаны малые предприятия и организации, занимающиеся инновациями, внедрением в производство современной алюмооксидной керамики.

**Ключевые слова:** оксид алюминия, алюмооксидная керамика, композиты, производители.

**В** части 2 обзора [73] рассмотрены ведущие западные производители тонкой керамики на основе  $Al_2O_3$  и свойства керамики производимых ими марок, а также перспективы улучшения механических свойств конструкционной керамики такого типа путем изготовления композитов различного состава, привлечения химических методов, достижения субмикронной и наноразмерной зернистости в микроструктуре, в том числе при использовании нанопорошков в качестве сырья. Часть 3 обзора посвящена отечественным производителям алюмооксидной керамики и смежных продуктов (сырье, огнеупоры и др.)<sup>13</sup>. Информация собрана из Интернета. Источниками в подавляющем большинстве случаев являются сайты самих компаний.

Представленная ниже подборка выполнена по доступной на указанных сайтах информации. Проверка того, насколько информация заявителей соответствует действительному выпуску продукции, не проводилась.

\* Окончание. Части 1 и 2 статьи опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 1 и 2 за 2019 г. соответственно.

<sup>13</sup> При наличии такового даны указания о выпуске керамики, отличной от алюмооксидной.



А. М. Абызов  
E-mail: andabyz@mail.ru

*ОК «Русал»* — <https://rusal.ru>

На заводе «Бокситогорский глинозем» выпускался белый электрокорунд в виде зерен (размеры частиц 2–160 мкм), порошков (40–160 мкм), микропорошков (1–63 мкм), крупки и набивных масс. *ОК «Русал»* производила металлургический глинозем марок ГБТ-2, ЦБ-1, ВКБ и Г-00, неметаллургический глинозем марок ПК-1, ГЭФ и ГСК, гидроксид алюминия марок ГД-8, ГД-12, ГД-15, ГД-18 и ТГД, мелкодисперсный гидроксид алюминия МГД. Выпускались также порошки, пудра, крупка из алюминия и его сплавов. После введенных США в апреле 2018 г. санкций компания переживает реорганизацию.

*ООО «Кералит»* — <http://www.keralit.com>

Производит пластинчатый (табулярный) оксид алюминия спеканием при температуре выше 1800 °С. Продукт содержит 99,5 мас. %  $Al_2O_3$ ,  $\gamma$  3,52 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость  $W$  3,7 %; доступны фракции от мельче 20 мкм до 17–21 мм.

*АО «Монокристалл»* (г. Ставрополь) — <http://monocrystal.ru>

Производит на заводах в России и Китае подложки монокристаллического сапфира толщиной 0,15–1,00 мм и диаметром до 300 мм для светодиодных сборок и другого применения. Параметры пластин: чистота > 99,997 %, плотность дислокаций <100 см<sup>-2</sup>, допуск по ориентации до ±0,05°.

АО «Поликор» (г. Кинешма Ивановской обл.) — <http://www.polikor.net>

Выпускает алюмооксидную керамику для электроники и электротехнического назначения, конструкционную, а также порошковые материалы из оксида алюминия (табл. 17, 18):

- корундовые изолирующие подложки для интегральных схем из материала ВК-100-1 (полупрозрачные, толщиной от 0,15 до 2,0 мм, шероховатость Rz 0,1 мкм, Ra 1,6 мкм);

- электро- и теплоизоляционную вакуумплотную корундовую керамику ВК-100-2 (кольца, изоляторы, трубки, втулки, колодки, гребенки, держатели);

- электро- и теплоизоляционную муллитокорундовую и корундовую техническую керамику;

- огнеупоры (плиты, капсулы, лодочки, обечайки, крышки, поддоны, кирпичи и др.); содержание  $Al_2O_3$  75–98 %,  $W$  22–30 %,  $\sigma_c$  26–59 МПа;

- сопла для аппаратов аргонодуговой сварки;

- корундовые мелющие тела в форме шаров и цилиндров для помола в мельницах (содержание  $Al_2O_3$  не менее 93,5 и 97 % соответственно);

- заполнители для бетонных изделий, масс, смесей, покрытий и мертелей;

- корундовые порошки марок К, КП, КО, П, У.

ООО «Термокерамика» (г. Химки Московской обл.) — <http://termokeramika.com>

Изготавливает в широком ассортименте различные изделия из технической керамики — печную установочную керамику, втулки, пластины, крепеж, трубки, чехлы, соломку, тигли, лодочки, футеровку для облицовки больших поверхностей, футеровку мельниц и мелющие тела, уплотнители и фитинги для трубопроводов и насосов, трубы и колена, поршни, оснастку для экструдирования кирпича, детали для текстильной промышленности, для протяжки проволоки, для целлюлозно-бумажного производства, изоляторы, сопла и мундштуки, нестандартные изделия под заказ. Помимо указанных в табл. 19 материалов, производится керамика с более низким содержанием  $Al_2O_3$  марок МКР (50 %), СКМ-35 (66 %), С530 и С610 по DIN 40685, из кордиерита, а также композиты составов  $Al_2O_3 - 2\% Cr_2O_3$  и  $Al_2O_3 - 8\% ZrO_2$ . Кроме того, выпускаются волокнистая теплоизоляция, алюмосиликатные клеи и обмазки.

ООО «Завод технической керамики» (г. Апрелевка Московской обл.) — <http://www.techceram.ru>

Производит режущий инструмент и износостойкие изделия из алюмооксидной керамики, из ке-

Таблица 17. Вакуумплотная корундовая керамика производства «Поликор»

Марка	$Al_2O_3$ , мас. %	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$W$ , %	$\sigma_f$ , МПа	ТКЛР <sup>1</sup> , ppm/К	$\rho$ , Ом·см	$\epsilon_r^{*2}$	$tg\delta^{*2}$
ВК 100-2	≥99,7	≥3,88	0,02	320	7,9±0,5	10 <sup>14</sup>	10,5	2·10 <sup>-4</sup>
ВК 100-1	≥99,7	≥3,96	0,00	320	8,0	2·10 <sup>14</sup>	9,7±0,25	10 <sup>-4</sup>

<sup>1</sup> При 20–900 °С.  
<sup>2</sup> При 1 ГГц.

Таблица 18. Корундовые порошки производства «Поликор»

Марка	Содержание примеси, мас. %						Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Размер частиц, мкм		Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>
	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F		средний	max	
К	0,20	–	0,08	0,30	0,05	–	0,55–0,75	1,8–2,5	21	0,7–0,9
КП	1,80	1,8	1,80	1,80	0,12	–	0,13–0,21	–	–	–
КО	0,05	–	0,03	0,15	0,03	0,01	–	1,8–2,5	21	0,7–0,9
П	0,07	–	0,03	0,20	0,04	0,01	–	1,8–2,5	21	0,7–0,9
У	0,06	–	0,03	0,15	0,03	0,01	–	2,4–3,0	21	0,8–1,0

Таблица 19. Алюмооксидная керамика производства «Термокерамика»

Марка	$Al_2O_3$ , мас. %	Допант, мас. %	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$W$ , %	$\sigma_f$ , МПа	$\lambda$ , Вт/(м·К)	ТКЛР <sup>1</sup> , ppm/К	$E_{br}$ , кВ/мм	$\epsilon_r^{*2}$	$tg\delta$	$T_{max}$ , °С
КСП 94	94	5 SiO <sub>2</sub>	3,00–3,20	5–8	30–33	1,5–2,0	7	–	–	–	1500
КСП 98	98–99	1–2 SiO <sub>2</sub>	3,00–3,40	5–8	30–35	2–3	7	–	–	–	1600
ВК-94	94,3	4,4 SiO <sub>2</sub>	3,75	0	350	17–28	7,9	50	9,5	3·10 <sup>-4</sup> –4·10 <sup>-4</sup>	1500
ВК-94-1 (22ХС)	94,4	2,76 SiO <sub>2</sub> + 0,49 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2,35 MnO	3,65	0,02	350	–	–	–	9,5	6·10 <sup>-4</sup>	1600
ВК-97	97	3 SiO <sub>2</sub>	3,90	0,02	350	19–27	8,4	34	9,5	1·10 <sup>-4</sup>	1750
КВПТ	99	0,3 SiO <sub>2</sub> + 0,7 TiO <sub>2</sub>	3,90	0,02	200	17–25	8	–	–	–	1700
ВК-100-1	99,7	0,3 MgO	3,95	0	300	25–30	8	30	10,7	1·10 <sup>-4</sup>	1850
ВК-100-2	99,7	0,3 SiO <sub>2</sub>	3,95	0	300	25–30	8	30	10,7	1·10 <sup>-4</sup>	1750
С795 <sup>3</sup>	95	–	3,68	0	280	16–28	7–9	25	–	–	1550
С799 <sup>3</sup>	99,7	–	3,82	0	300	19–30	7–9	17	–	–	1700

<sup>1</sup> При 20–900 °С.

<sup>2</sup> При 1 МГц.

<sup>3</sup> По стандарту DIN 40685, остальные марки — по внутренним ТУ.

рамики на основе диоксида циркония, нитрида кремния, карбида бора, диборида титана, нитрида алюминия, а также из твердого сплава. Номенклатура включает керамические режущие сменные многогранные пластины квадратной, треугольной, круглой и ромбовидной формы, сопла для струйной очистки и гидроабразивной резки, насадки газовых горелок, направляющие, фильеры, волокна, глазки, керамические элементы запорной и регулирующей арматуры, керамические ножи, керамические подшипники скольжения, шары, керамическую футеровку и т. п. Кроме того, выпускаются высокотемпературные изоляторы, трубки, чехлы термодар, керамические бусы, длинномерные стержни, рассекатели пламени, тигли, помольные тела. Инструментальная керамика включает корундовую марок ЦМ-332, ВО-13 и ВО-130; материалы на основе  $Al_2O_3$  с добавками других оксидов ВО-18 и ВО-180; оксидно-карбидную керамику композиционного состава  $Al_2O_3-TiC$  с легирующими добавками тугоплавких соединений ВОК-200<sup>14</sup>; композит на основе оксида алюминия, армированного нитевидными монокристаллами карбида кремния, ТВИН-400. ЦМ-332, ВО-13 и ВО-18 изготавливают холодным прессованием, ВО-130, ВО-180 и ВОК-200 — горячим прессованием. Указаний на выпуск композитной керамики состава  $Al_2O_3-TiN$  типа ОНТ-20 (кортинит) не имеется. Корундовая керамика широко представлена в изделиях другого назначения (сопла,

термопарные чехлы и соломка, гидротехническая арматура, термостойкая посуда и др.). Технические спецификации на материалы производителем не представлены. Физические свойства инструментальной керамики старых марок приведены в табл. 20.

ЗАО «НЭВЗ-Керамикс» (г. Новосибирск) — <http://www.nevz-ceramics.com>

Владеет технологией производства алюмооксидной (табл. 21), стеатитовой и форстеритовой керамики. Основные направления производства:

- керамические изоляторы различного назначения (для вакуумных дугогасительных камер, корпусов силовых полупроводниковых приборов, электронно-оптических преобразователей), керамические трубки и прочие изделия;
- керамические металлизированные и неметаллизированные подложки из оксида алюминия для электронной и электротехнической промышленности;
- керамические детали для запорной арматуры (узлы затвора, вставки в металлический корпус для шаровых кранов и дросселей);
- бронекерамика;
- изделия медицинского назначения из биосовместимой керамики (протезы, имплантаты составов  $Al_2O_3, ZrO_2$  и  $Al_2O_3-ZrO_2$ ).

Выпускает алюмооксидную бронекерамику. Основной серийной номенклатурой является прямоугольная плоская и радиусная бронеплитка размерами 50×50 и 80×80 мм толщиной 4–12 мм, бронеролики диаметром 13,4–29 и высотой

<sup>14</sup> Современный аналог ВОК-60, ВОК-71.

Таблица 20. Инструментальная керамика на основе оксида алюминия [74]

Марка	$Al_2O_3$ , мас. %	Добавка, мас. %	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Средний размер зерен $d$ , мкм	$\sigma_f$ , МПа	$\sigma_c$ , МПа
ЦМ-332	≥99	≤1 MgO	3,85–3,90	4	300–350	–
ВО-13	>99	–	3,92–3,95	3–4	450–500	2700–3000
ВОК-60	≥60	<40 TiC	4,20	2–3	600	–
ВОК-63	≥60	<40 TiC	4,30	2–3	650–700	–

Таблица 21. Алюмооксидная керамика производства «НЭВЗ-Керамикс» [75]

Тип	$Al_2O_3$ , мас. %	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$d$ , мкм	$\sigma_f$ , МПа	$\sigma_c$ , МПа	$E$ , ГПа	$K_{Ic}$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$H$ , ГПа	$\lambda$ , Вт/(м·К)	ТКЛР <sup>1</sup> , ppm/К	$\rho$ , Ом·см	$\epsilon_r$	tgδ
Электроизоляционная, подложки <sup>2</sup>	≥96	≥3,72	–	≥300	2100	330	–	14–15	24,7	8,2	≥10 <sup>14</sup>	9	2·10 <sup>-4</sup>
Электроизоляционная вакуумплотная <sup>3</sup>	–	≥3,67	–	310	–	–	–	–	–	–	10 <sup>13</sup>	10	–
Износостойкая	99,5	≥3,9	–	300–350	3000	350–380	3,5–4,0	17–22	15,5–16,7	8–9	–	–	–
Бронекерамика	≥98,5	≥3,8	–	≥250	–	– <sup>4</sup>	≥3,0	≥16	–	–	–	–	–
Биокерамика	–	–	≤4	–	>3000	–	>4	14,7	–	–	–	–	–
	–	–	≤1,5	–	>2000	–	>9	19,6	–	–	–	–	–

<sup>1</sup> При 25–1000 °С.

<sup>2</sup>  $E_{br} \geq 14$  кВ/мм, значения  $\epsilon_r$  и tgδ указаны при 1 МГц.

<sup>3</sup> Значение  $\rho$  указано при 100 °С,  $\epsilon_r$  при 1 ГГц.

<sup>4</sup> Нормируется связанная с модулем упругости скорость звука  $v \geq 10,3$  км/с.

8–24 мм, шестигранники размерами «под ключ» 20 и 40 мм и высотой 4–20 мм. Бронекерамика применяется в составе керамо-композитных бронепанелей для экипировки личного состава с защитой до класса 6А по ГОСТ Р 50744–95; для навесных бронепанелей наземной, летающей и плавающей техники, применяемых в комбинации с подложкой из ряда конструктивных баллистических материалов для защиты от пуль автоматического стрелкового вооружения калибров 7,62, 12,7 и 14,5 мм. Бронекерамика с интегрированным радиопоглощающим покрытием используется для маскировки объектов в радиолокационном диапазоне (коэффициент отражения 10 дБ в основных диапазонах радиолокации). Разрабатывается бронекерамика из карбида бора и карбида кремния.

Выпускает плотную и пористую корундовую и циркониевую биокерамику. В табл. 21 внесены данные по плотной керамике с нулевой пористостью; конкретный состав ( $Al_2O_3$  или  $Al_2O_3-ZrO_2$ ) производителем не указан.

ООО «Алокс» (Санкт-Петербург) — <http://www.alox-ceramics.ru>

Компания основана специалистами, имеющими опыт работы в НИИ абразивов и шлифования (ВНИИАШ) и НПО «Абразивный завод «Ильич». Разработаны и освоены бронезащитные элементы из корундовой керамики для комплектации бронезащитных моделей 6Б13, 6Б43 и 6Б45 5-го и 6-го классов защиты (ГОСТ 51112–97), принятых на вооружение Российской армии; осуществляются поставки бронезащитных элементов из разработанных корундовых материалов для защиты вертолетов, десантных кораблей. Бронеплиты для защиты личного состава соответствуют ГОСТ Р 50744–95. Плиты используются также в составе радиопрозрачной брони. Пластины могут изготавливаться плоскими квадратной, прямоугольной и трапециевидной формы, а также изогнутыми, размерами до 100×100 и толщиной до 16 мм, бронезащитные элементы

для сборки панелей — в виде шестигранников и роликов.

Кроме того, предлагаются другие изделия из алюмооксидной керамики: футеровочные пластины для различных аппаратов типа дробилок, бункеров и т. п.; штуцеры с дроссельными отверстиями для трубопроводов перекачки жидкостей; узлы водозапорной арматуры; гарнитура для вытяжки волокон; галтовочные тела; сопла струйных аппаратов; насадки абразивного инструмента и др. Технические данные приведены в табл. 22.

ООО «Петербургский абразивный завод «Ильич» (Санкт-Петербург) — <http://www.pazi.ru>

Выпускает по техническим условиям алюмооксидную керамику для футеровки поверхностей, работающих в условиях сильного абразивного и гидроабразивного износа, в абразивных средах, для композитной броневой защиты личного состава и техники (классы Бр5, Бр6 по ГОСТ Р 50744–95). Размер и форма изделий в зависимости от назначения и требований заказчика. Свойства представлены в табл. 23. Помимо этого, в большом ассортименте абразивный инструмент и материалы на основе алмаза и кубического нитрида бора (круги и бруски на металлической, керамической, органической связке, шкурка и паста).

ООО «Вириал» (Санкт-Петербург) — <http://www.virial.ru>

Выпускает широкий ассортимент изделий и материалов:

- износостойкие изделия, в том числе узлы подшипников скольжения, из карбида кремния, карбида бора, диборида титана, вольфрамсодержащих и безвольфрамовых твердых сплавов, композиций на основе оксидов циркония и алюминия, из керамоматричных композитов;
- режущий инструмент и его рабочие части — пластины на основе кубического нитрида бора, керамические (на основе  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $Si_3N_4$  и  $SiAlON$ ), твердосплавные;

Таблица 22. Алюмооксидная керамика производства «Алокс» [76]

Марка	$Al_2O_3$ , мас. %	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_f$ , МПа	$\sigma_c$ , МПа	$E$ , ГПа	$\nu$ , км/с	$K_{Ic}$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$HV$ , ГПа
АЛ1	97,0	3,85	250	1500	340	9,6	3,8	15,0
АЛ2	95,0	3,85	280	1680	350	9,65	4,0	15,5
АЛ3	94,0	3,70	300	1800	310	9,3	4,2	14,2
АЛ1М	95,0	3,91	400	2100	375	9,8	5,6	18,0

Таблица 23. Алюмооксидная керамика производства «ПазИ» (для всех марок  $W = 0$  %)

Марка	$Al_2O_3$ , мас. %	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_f$ , МПа	$\sigma_c$ , МПа	$E$ , ГПа	$\nu$ , км/с	$K_{Ic}$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$HV^*$ , ГПа
Б5	96,2	3,8	≥260	≥1700	≥340	9,3	3,8±0,2	13,2±0,2
Б6	96,0	3,8	≥250	≥1600	≥340	9,4	4,0±0,2	14,0±0,2
БИ9	96,0	3,85	≥270	≥1900	≥350	9,5	3,8±0,2	14,3±0,2
БИ11	96,5	3,80	≥300	≥2100	≥350	9,55	4,0±0,2	14,1±0,2

\* При нагрузке 100 кг.

– продукцию из пироуглерода и пиролитического нитрида бора.

Оксидная керамика включает материалы на основе  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ , частично стабилизированного оксидом иттрия, —  $ZrO_2(Y_2O_3)$ , а также корундоциркониевую композиционную керамику состава  $Al_2O_3-ZrO_2(Y_2O_3)$  (табл. 24).

ООО ПК «Техническая керамика» (г. Саратов) — <http://tehceramica.ru>

Выпускает керамику из оксида алюминия, стеатита, нонатитаната бария, нитрида бора и оксида бериллия. Характеристика алюмооксидной керамики:  $Al_2O_3$  94,0–99,7 %,  $\gamma \geq 3,60-3,96$  г/см<sup>3</sup>,  $W \leq 0,02$  %,  $\sigma_f \geq 310-320$  МПа, ТКЛР 5,7–7,9 ppm/K,  $\rho \geq 10^{13}-10^{14}$  Ом·см,  $E_{br} \geq 20-40$  кВ/мм,  $\epsilon_r \leq 8,6-10,0$  (при 1 ГГц),  $tg\delta 6 \cdot 10^{-4}-10 \cdot 10^{-4}$  (при 1 ГГц). Алюмооксидная керамика изготавливается в виде подложек стандартного размера 60×48 мм толщиной 0,7–5,0 мм, а также в виде изделий различной формы (стержни, трубки и др.). В том числе предлагаются металлизированные изделия с покрытиями Mo, W, Ni.

ООО «Техническая Керамика» (г. Белгород) — <http://техническая-керамика.рф>

Производит техническую и инженерную керамику из оксидов алюминия и циркония, а также из карбидов и боридов, в том числе композиционную. Выпускаются различные детали износостойкой, жаропрочной, высокопрочной, вакуумплотной керамики, включая изделия специального назначения, по условиям (чертежам) заказчика. Вся продукция изготавливается методом холодного изостатического прессования при давлении до 600–2000 МПа с последующим обжигом до 2200 °С. Сырье — импортное (китайское, японское, немецкое) и российское.

ООО ПК «Электрокерамика» (дер. Трошково Раменского района Московской обл.) — <http://www.elker.ru>

Предлагает мелющие и галтовочные тела (шары, цилиндры) из корунда, муллитокорунда, фарфора, керамические насадки (кольца Рашига, Пал-

ля, седловидные), трубки и стержни и другую продукцию из корунда, стеатита, форстерита, кордиерита, фарфора и ультрафарфора, а также керамическую массу.

ОАО «НИИВТ им. С. А. Векшинского» (Москва) — <http://www.niivt.ru>

Выпускает изделия различной формы из вакуумплотной электроизоляционной керамики ВК94-1 (22ХС) и ВК100-2 (КМ). Свойства керамики приведены в табл. 24.

ОАО «Плутон» (Москва) — <http://www.pluton.msk.ru>

Выпускает электровакуумные СВЧ-приборы. Производит вакуумплотную керамику марок ВК94-1 и ВК100-2 (см. табл. 25), а также изделия из вакуумплотной алюмонитридной керамики АН-95 с высокой теплопроводностью — не менее 80 Вт/(м·К), поглотительные керметы АН-35Ж, корундотитановую керамику КТ-30.

ОАО «Плазма» (г. Рязань) — <http://www.plasmalabs.ru>

Выпускает алюмооксидную керамику марок ВК94-1 (см. табл. 24) и АИ-1 (>94 %  $Al_2O_3$ ,  $\gamma$  3,7 г/см<sup>3</sup>), которая может использоваться для электроизоляции, как износостойкая, прочная, огнеупорная (элементы насосов и фильер, насадки пескоструйных аппаратов, керны, лодочки, сопла горелок, в инструментах механической обработки). В том числе предлагаются изделия со шлифованной, полированной и глазурированной поверхностью, с резьбой, металлизированные.

ОАО «Донской завод радиодеталей» (г. Донской Тульской обл.) — <http://www.alund.ru>

Специализируется в области разработки и изготовления деталей из вакуумплотной алюмооксидной керамики (указана марка ВК94-1). Производит керамические, металлокерамические и стеклокерамические корпуса для интегральных схем, силовых полупроводниковых элементов, изоляторы электротехнических изделий и авто-

Таблица 24. Корундоциркониевая керамика производства «Вириал»

Назначение	Состав	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_f$ , МПа	$E$ , ГПа	$K_{Ic}$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$HV$ , ГПа	$\lambda$ , Вт/(м·К)	ТКЛР, ppm/K
Для узлов трения	$Al_2O_3$	3,8–3,9	300–350	370–380	3,0–3,5	19–21	25–30	8,0–9,0
	$Al_2O_3-ZrO_2$	4,5–4,6	550–750	310–340	6,0–8,0	15–17	20–22	8,5–9,5
	$ZrO_2$	6,0–6,5	750–1050	200–210	8,0–10,0	12–13	20–30	10,0–11,0
Для режущего инструмента	$Al_2O_3-ZrO_2$	4,04–4,05	550–700	365–375	4,0–5,0	19–21	27–29	8,0–8,2
	$Al_2O_3-ZrO_2$	4,60–4,65	850–1200	310–340	6,0–8,0	17–18	20–22	8,5–9,5

Таблица 25. Вакуумплотная алюмооксидная керамика ВК94-1 и ВК100-2

Марка	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$W$ , %	$\sigma_f$ , МПа	$\epsilon_r$		$tg\delta$		$\rho$ , Ом·см
				при 1 МГц	при 1–10 ГГц	при 1 МГц	при 1–10 ГГц	
ВК94-1	$\geq 3,65$	$\leq 0,02$	$\geq 320$	$\leq 10,3$	$\leq 10,3$	$\leq 6 \cdot 10^{-4}$	$\leq 15 \cdot 10^{-4}$	$\geq 10^{13}$
ВК100-2	$\geq 3,88$	$\leq 0,02$	$\geq 320$	$\leq 10,5$	$\leq 10,1$	$\leq 2 \cdot 10^{-4}$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$	$\geq 10^{14}$

мобильных свечей зажигания, носители катализаторов.

ООО «Керамика» (Санкт-Петербург) — <http://ceramics.sp.ru>

Фирма была образована на базе Государственного научно-исследовательского института резисторов и конденсаторов «Гириконд», занимается разработкой и производством керамических материалов, элементов, изделий ВЧ- и СВЧ-техники (дielekтрические резонаторы, волноводы, подложки, пластины, порошки для конденсаторов и т. п.). Химический состав конкретных изделий не указывается, но в общем списке керамических материалов для электроники ВЧ- и СВЧ-диапазонов оксид алюминия (корунд) фигурирует наряду с другой керамической составов MgO–SiO<sub>2</sub>, MgO–TiO<sub>2</sub>, BaO–TiO<sub>2</sub>, SrTiO<sub>3</sub> и др.

АО «Подольскогнеупор» (г. Подольск Московской обл.) — <http://www.podolskogneupor.ru>

Производит техническую керамику на основе оксида алюминия (трубки, стержни, ролики, чехлы для термопар, тигли, лодочки, мелющие шары) и карбида кремния преимущественно огнеупорного назначения. Помимо указанной в табл. 26 керамики из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в ассортименте корундовые шары BW-001–BW-004 диаметром 1–60 мм следующего состава, мас. %: > 92 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, < 7 SiO<sub>2</sub>, < 0,1 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, < 2(CaO + MgO); γ 3,7–3,6 г/см<sup>3</sup>, водопоглощение < 0,01 %. Выпускаются также муллитокремнеземистый фарфор марок МКР-50 и МКР-72, ролики ОК969, ОК979, ОК989 и ОК999 с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 72, >76, >81 и > 85 % и другая продукция.

ЗАО НТЦ «Бакор» (Москва) — <http://www.ntcbakor.ru>

Производит огнеупоры различного состава (хромитокорундовые, корундомуллитовые, бадделитокорундовые и др.), огнеупорные мертели и бетоны (состава Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZrO<sub>2</sub>–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), керамические втулки и фасонные изделия (от 90 до 99,5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), корундоциркониевые изделия марок КТЦ (от 70 до 90 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, от 2,5 до 17 % ZrO<sub>2</sub>) в виде плит, брусьев и т. п., корундовые и периклазовые тигли (86–97 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, W до 21 %, σ<sub>c</sub> ≥ 40 МПа).

АО «Боровичский комбинат огнеупоров»

(г. Боровичи Новгородской обл.) — <http://aabko.ru>

Выпускает шамотные, муллитовые, муллитокорундовые и корундовые огнеупоры общего и специального назначения (футеровка, трубы и другие изделия для разлива стали и т. д.) — грубую керамику с 32–95 мас. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, W 12–30 %, σ<sub>c</sub> 13–80 МПа. Кроме того, в ассортименте изделия на основе оксида циркония, оксидоуглеродные и оксидографитовые составы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–C, ZrO<sub>2</sub>–C, легковесные теплоизоляционные. Предлагается широкий перечень неформованных огнеупоров (порошки шамота и огнеупорной глины, наполнители, мертели, набивные массы, сухие смеси для огнеупорных бетонов, в том числе с содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 94 %). Кроме того, выпускается реактивный глинозем ГРТ — микропорошок корунда с удельной поверхностью 0,85 м<sup>2</sup>/г, параметры распределения частиц по размерам D<sub>50</sub> = 2,5 мкм и D<sub>90</sub> = 7,5 мкм, доля примесей, мас. %: SiO<sub>2</sub> ≤ 0,05, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ≤ 0,1, Na<sub>2</sub>O ≤ 0,35.

ООО «Микроинтек» (Екатеринбург) — <https://microintech.ru>

Осуществляет исследования, разработку технологий и производство специальных сортов оксидов и гидроксидов алюминия, является резидентом фонда Сколково (регистрационный номер 1120179). Продукция выпускается под маркой MITALOX. В частности, наиболее мелкодисперсный порошок оксида алюминия MITALOX 5-95 характеризуется гранулометрическим составом D<sub>50</sub> = 5 мкм, имеет удельную поверхность 3 м<sup>2</sup>/г и содержит 92–95 % α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ≤ 0,03 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ≤ 0,015 % SiO<sub>2</sub>, ≤ 0,3 % Na<sub>2</sub>O.

ООО «Нанокорал» (г. Тюмень) — <https://www.nanokoral.com>

Компания является резидентом фонда Сколково (регистрационный номер 1120916). Среди прочих заявлено о следующих проектах:

- Разработка новых видов композиционных броневых керамических материалов. Разработка высокоплотной керамики на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с добавкой нанопорошка 2–4 мас. % эвтектического состава в системе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> позволит обеспечить образование при спекании беспористой монолитной мелкокристаллической

Таблица 26. Корундовые изделия (чехлы термопар, трубки, тигли, лодочки) производства «Подольскогнеупор» (для всех марок W = 0 %)

Марка	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , мас. %	γ, г/см <sup>3</sup>	σ <sub>r</sub> , МПа	σ <sub>c</sub> , МПа	λ, Вт/(м·К)	ТКЛР <sup>1</sup> , ppm/К	ρ, Ом·см	E <sub>br</sub> , кВ/мм	ε <sub>r</sub> <sup>2</sup>	T <sub>max</sub> , °C
МКР-95	≥ 95	≥ 3,70	–	–	–	–	–	12,0	–	1600
МКР-99	≥ 99	≥ 3,85	–	–	–	–	–	15,0	–	1700
–	95	3,60	360	2070	16,0	7,6	> 10 <sup>13</sup>	8,3	9,0	1550
–	99	3,89	550	2600	30,0	7,9	> 10 <sup>14</sup>	8,7	9,7	1700
–	99,7	3,96	550	2600	30,4	8,2	> 10 <sup>14</sup>	8,7	9,7	1800

<sup>1</sup> При 25–1000 °C.

<sup>2</sup> При 1 МГц.

структуры с размерами кристаллов 2–3 мкм;  $\sigma_f$  такой керамики достигает 500 МПа и более,  $K_{Ic}$  6–7 МПа·м<sup>0,5</sup>,  $HV \sim 20$  ГПа. В настоящее время для армирования керамики начинают широко применять углеродные нанотрубки. Имеющиеся опытные данные показывают, что введение небольшого количества нанотрубок (1–5 мас. %) повышает трещиностойкость примерно в 2,5 раза при высокой относительной плотности получаемой корундовой керамики. Если обеспечить сочетание в оксиде алюминия добавок нанопорошка эвтектики системы  $Al_2O_3-ZrO_2-Y_2O_3$  и углеродных нанотрубок, то можно получить новый композиционный материал, превосходящий по своим свойствам существующие. Его  $\gamma$  может быть не выше 4,1 г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_f$  достигать 600 МПа, а  $K_{Ic}$  составлять 8–9 МПа·м<sup>0,5</sup>.

• *Разработка технологии нового наноструктурированного керамоматричного композита на основе  $Al_2O_3$  для электрооптических систем и электроники.* Для изготовления изделий силовой и СВЧ-электроники нового поколения необходимы совершенно беспористые материалы с мелкокристаллической и равнокристаллической структурой, позволяющей после шлифовки и полировки получать высокую чистоту поверхности с  $Rz \sim 0,01$  мкм при полном отсутствии пор и других дефектов. Эту задачу предлагается решать путем разработки технологии, включающей использование новых добавок эвтектического типа для спекания алюмооксидной композиционной керамики с обеспечением равнокристаллической структуры и обладающей оптическими свойствами, как у монокристаллического корунда.

• *Беспористая биокерамика на основе  $Al_2O_3$  чистотой 99,5 %.* Разработана технология получения высокоплотной алюмооксидной керамики для эндопротезов суставов би- и трисоставной конструкции. Составные части выполнены из различных по структуре видов керамики: пористой керамики с биоактивным наноструктурированным керамическим покрытием для элементов, контактирующих с костью, и биоинертной высокопрочной керамики с антиабразивным керамокристаллическим поверхностным слоем для элементов пар трения на основе  $Al_2O_3$  и  $ZrO_2$ . Параметры керамики:  $\gamma$  4,01 г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_f$  400 МПа,  $K_{Ic}$  5 МПа·м<sup>0,5</sup>.

Кроме того, производятся электроизолирующие подложки на основе  $Al_2O_3$  марки НК-А(499) для электроники, которые обладают следующими свойствами: содержание  $Al_2O_3$  99 %, цвет белый прозрачный,  $\gamma$  4,02 г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_f$  600 МПа,  $E$  370 МПа,  $HV$  20,5 ГПа,  $\lambda$  38 Вт/(м·К),  $\rho > 10^{15}$  Ом·см,  $E_{br} > 15$  кВ/мм,  $\epsilon_r$  9,9 (при 1 МГц),  $tg\delta$   $1 \cdot 10^{-4}$  (при 1 МГц), шероховатость поверхности 1 нм.

*Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Москва) — <https://scidbase.muctr.ru>*

Среди представленных научно-прикладных разработок следует отметить проект по высокопрочной керамике из  $Al_2O_3$  и  $Al_2O_3-ZrO_2$  [77]. Добавки эвтектических составов в количестве 1–5 мас. % позволяют снизить температуру спекания в воздушной среде от 1700–1750 до 1300–1550 °С, что дает возможность использовать для обжига наиболее экономичные печи с нагревателями из SiC. Материалы могут быть использованы в качестве элементов запорной арматуры, мелющих тел мельниц, режущего инструмента, износостойких конструкционных деталей различного назначения, вакуумплотной керамики для металлокерамических узлов, инденторов для определения твердости сталей различных марок, электроизоляторов. Исходя из предъявляемых требований и условий применения, заготовки могут формироваться разными способами — полусухим либо горячим прессованием, пластическим формованием, горячим литием.

В качестве исходного алюминийсодержащего сырья используется гидроксид алюминия. Упрочняющим компонентом является частично стабилизированный  $ZrO_2$ , синтезируемый методом гетерофазного химического осаждения. Порошок состоит из агрегатов размера 0,5–1,0 мкм, которые, в свою очередь, представлены частицами размерами 20–40 нм. Для жидкофазного спекания предлагаются эвтектические многокомпонентные добавки типа  $M'O-Al_2O_3-M''O_y$ , где  $M'$  — катион металла модифицирующего оксида;  $M''$  — «кислый» катион ( $M' - Ca^{2+}, Mn^{2+}, Zn^{2+}, Fe^{2+}$  и  $Cu^{2+}$ ;  $M'' - Si^{4+}$ ).

Свойства разработанных материалов: средние размеры кристаллов корунда 3–6 мкм, кристаллов  $ZrO_2$  0,2–1,0 мкм, средняя  $\gamma$  3,75–4,20 г/см<sup>3</sup>, открытая пористость нулевая, закрытая — межкристаллическая, размер пор от менее 1 до 2 мкм, их содержание 1–2 об. %, средний  $\sigma_f$  (трехточечный изгиб) 350–650 МПа,  $K_{Ic}$  8–10 МПа·м<sup>0,5</sup>, микротвердость  $HV$  13–15 ГПа, модуль Вейбулла 15–18.

Заявлены высокие физико-механические свойства керамики при минимальной температуре спекания и введении незначительных количеств модифицирующих добавок. Проведены опытно-промышленные испытания разработанных материалов в ЗАО «Кировстройфарфор» (г. Киров Калужской обл.), ОАО «Дулевский красочный завод» (г. Дулево Московской обл.); на ряд материалов выпущены технические условия.

*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (г. Новосибирск) —*

<http://www.solid.nsc.ru/institut/labs/GrOxideCeramics>

Основными направлениями проводимых исследований являются механохимический синтез порошков оксидов и нитридов металлов, тонкое

и сверхтонкое измельчение неорганических веществ, спекание наноструктурированных материалов. Среди научно-прикладных результатов:

- разработка методик получения плотной корундовой керамики без добавок с размерами зерен 0,1–0,2 мкм при температурах спекания 1200–1250 °С;

- сверхтонкое измельчение  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с получением слабоагрегированных порошков со средним размером частиц от 15 до 60 нм;

- метод получения нанокompозитного порошка Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZrO<sub>2</sub> и его спекание в наноструктурированный материал с  $\sigma_f > 600$  МПа;

- разработка технологии получения корундовой бронекерамики из нанопорошка  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с размером частиц около 100 нм.

В связи с этим представляют интерес результаты, описанные в публикации [78]. Для сопоставления авторами [78] были изготовлены образцы корундовой керамики из коммерчески доступного глинозема марок ГН, ГЭФ, МГ и ГРТ российского производства, из глинозема Almatis 1200 (Германия) и нанопорошка собственного изготовления<sup>15</sup>. Установлено, что керамика с приемлемой плотностью 3,87–3,90 г/см<sup>3</sup> и микротвердостью около 15,5 ГПа (как у образцов из импортного глинозема Almatis) может быть изготовлена из глинозема марок ГН, МГ и ГРТ только после его химической очистки соляной кислотой и механической обработки в мельнице. В отличие от этого спеканием при 1300 °С нанопорошка, состоящего из сферических частиц размерами около 120 нм, была получена наноструктурированная керамика с более высокими плотностью и твердостью ( $\gamma$  3,94 г/см<sup>3</sup>, HV 18,9 ГПа при нагрузке 0,5 кг).

*Научно-образовательный инновационный центр «Наноматериалы и нанотехнологии» Томского политехнического университета* (г. Томск) — <http://portal.tpu.ru/departments/centre/nano/dev>

В центре разработан метод сухого формования нанопорошков (без связок и пластификаторов) в пресс-формах специальной конструкции (коллекторные) или с применением ультразвука для последующего изготовления керамики. Разработанные технологии производства были переданы в ОАО «НЭВЗ-Союз»<sup>16</sup> и используются для изготовления алюмооксидных подложек, кольцевых изоляторов и бронекерамики, корундоциркониевой запорной арматуры [79]. Ведутся разработки керамики разнообразного функционального назначения (прозрачная люминесцентная, прозрачная в видимом и ИК-диапазоне,

<sup>15</sup> Производителем нанопорошка указано ЗАО «Нанокompозит», директором которого является один из авторов статьи Г. Р. Карагедов.

<sup>16</sup> К настоящему времени преобразовано в ЗАО «НЭВЗ-Керамикс».

теплопроводная диэлектрическая, бронезащитная, легкая магнитная, с высокотемпературной сверхпроводимостью, пьезо- и сегнетоэлектрическая) различного состава (ZrO<sub>2</sub>–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nd–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ba(Sr,Ca)TiO<sub>3</sub>, Ba–W–Ti–O и др.).

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН* (г. Томск) —

<http://www.ispms.ru/ru/production/47>

Разработана технология плазмохимического синтеза из нанопорошков на основе ZrO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> высокопрочных и высоковязких керамических материалов с нанокристаллической структурой. Согласно спецификации  $\gamma$  5,9–6,0 г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_f$  1000–1200 МПа,  $K_{Ic}$  8–14 МПа·м<sup>0,5</sup>. Указанная плотность соответствует доминирующей доле ZrO<sub>2</sub> в материале. Приведенные патенты описывают способы получения композитов ZrO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не только с преобладанием ZrO<sub>2</sub>, но и с варьированием содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в широком диапазоне (10–80 мас. %). Предлагаются передача технологии по лицензии, поставки керамических композитов, разработки по техническому заданию.

Оценивая ситуацию с отечественными производителями, следует отметить, что в России осуществляется выпуск корундовой и алюмооксидной керамики, которая соответствует выпускаемой за рубежом. Среди производителей — крупные и средние предприятия, которые занимались выпуском подобной продукции десятилетиями ранее, малые фирмы, в том числе возникшие в рамках программы импортозамещения. Преимущественно выпускается керамика по технологическим разработкам, сделанным или заложенным еще в советское время (марок ВК, ВО, МКР и т. п.). Отчасти это связано с тем, что основной ресурс улучшения свойств собственно корундовой керамики при сохранении ее низкой стоимости, вероятно, исчерпан. Выпускается корундовая керамика высокой чистоты ( $\geq 99,7$  %); сведений о выпуске корундовой керамики чистотой 99,8–99,9 % не имеется. Некоторые предприятия выпускают корундоциркониевую керамику и композиты с оксидом алюминия. Осуществляется выпуск сапфира на мировой рынок. Отдельными организациями заявлено о намерении начать выпуск наукоёмкой инновационной продукции с параметрами на уровне мировых достижений или начат такой выпуск.

\*\*\*

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России № 10.8003.2017/8.9.*

#### Библиографический список

73. **Абызов, А. М.** Оксид алюминия и алюмооксидная керамика (Обзор). Часть 2. Зарубежные производители. Технологии и исследования в области алюмоок-

сидной керамики / А. М. Абызов // Новые огнеупоры. — 2019. — № 2. — С. 13–22.

74. **Жарский, И. М.** Материаловедение / И. М. Жарский, Н. П. Иванова, Н. А. Свидунович. — Минск : Вышэйшая школа, 2015. — С. 220.

75. НЭВЗ-Керамикс // [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.sibsiu.ru/files/news/20150908/НЭВЗ-Союз.pdf>.

76. **Зайцев, Г. П.** Корундовая бронекерамика: опыт производства и применения / Г. П. Зайцев // Экспертный союз. — 2012. — № 3 (24). <http://www.unionexpert.ru/index.php/news/item/287-alumina-bronekeramika-experience-of-production-and-use>.

77. **Лукин, Е. С.** Высокопрочные материалы на основе оксида алюминия и системы  $Al_2O_3-ZrO_2$  с пониженной температурой спекания / Е. С. Лукин, Н. А. Макаров // [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://scidbase.muctr.ru/16-0246/index.htm>.

78. **Мызь, А. Л.** Оценка отечественных глиноземов в качестве сырья для конструкционной керамики / А. Л. Мызь, Г. Р. Карагедов, Н. З. Ляхов // Стекло и керамика. — 2016. — № 2. — С. 34–38.

**Myz', A. L.** Evaluation of domestic alumina as raw material for structural ceramic / A. L. Myz', G. R. Karagedov, N. Z. Lyakhov // Glass and Ceramics. — 2016. — Vol. 73, № 1/2. — P. 66–70. DOI 10.1007/s10717-016-9827-6.

79. **Хасанов, О. Л.** Новые методы компактирования сухих нано- и полидисперсных порошков под ультразвуковым воздействием и коллекторным способом. Консолидация керамических наноматериалов методом SPS / О. Л. Хасанов // [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://lemc-lab.mephi.ru/content/file/news/khasanov.pdf>. ■

Получено 18.02.19  
© А. М. Абызов, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



**HT-CMC/10<sup>th</sup>**  
22–26 сентября 2019 г. Бордо, Франция  
10th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites  
[ht-cmc10.org](http://ht-cmc10.org)

**10-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ КЕРАМИЧЕСКИМ  
МАТРИЧНЫМ КОМПОЗИТАМ (HTCMC)**



**ТЕМАТИКА:**

- Расчетное моделирование, моделирование и проектирование новых материалов и процессов
- Волокна и преформы
- Интерфейсы и межфазные связи
- Инновационный дизайн, передовые технологии обработки и производства HTCMC
- Перспективные технологии производства HTCMC: трехмерная печать, лазерное спекание и др.
- Материалы для экстремальных условий:
  - сверхвысокотемпературная керамика (УНТС)
  - нанонаполненные тернарные карбиды и нитриды (МАХ-фазы)
- Термические и экологические барьерные покрытия
- Полимерная керамика и композиты (включая армированные пены)
- Углерод / углеродные композиты
- Термомеханическое поведение и производительность HTCMC
- Неразрушающий контроль и мониторинг качества керамических композитов
- Применение HTCMC
- Передовые материалы для устойчивой энергетики (включая ядерное деление и слияние, промышленные газовые турбины)



