

УДК 546.623-31:666.3

ОКСИД АЛЮМИНИЯ И АЛЮМООКСИДНАЯ КЕРАМИКА (Обзор). Часть 2. Зарубежные производители алюмооксидной керамики. Технологии и исследования в области алюмооксидной керамики*

Представлена информация о западных производителях алюмооксидной керамики, преимущественно тонкой технической. Приведены данные по механическим, теплофизическим, диэлектрическим свойствам продуктов, выпускаемых разными фирмами. Применительно к перспективам промышленного выпуска рассмотрены некоторые методы получения керамики на основе Al_2O_3 .

Ключевые слова: оксид алюминия, алюмооксидная керамика, производители алюмооксидной керамики.

ПРОИЗВОДИТЕЛИ АЛЮМООКСИДНОЙ КЕРАМИКИ. ТЕХНОЛОГИИ И ИССЛЕДОВАНИЯ

В части 1 обзора [29] описаны свойства Al_2O_3 и алюмооксидной керамики безотносительно конкретных изготовителей, разновидности промышленно выпускаемого дисперсного Al_2O_3 . В части 2 обзора рассмотрены коммерчески доступные марки тонкой технической керамики на основе Al_2O_3 .

В справочнике [30] представлены данные о западных и других производителях технической керамики (главным образом из США, Великобритании, Германии, Франции, Японии) и их продукции по состоянию на 1998 г. Данных по российским и китайским производителям (за исключением малочисленных филиалов западных компаний) не имеется. Ниже приведен список компаний, выпускающих алюмооксидную керамику и монокристаллический Al_2O_3 , а также порошки Al_2O_3 [30].

Производители керамики и монокристаллического Al_2O_3 (1998 г.): ACC-AC Cerama, Alberox (Morgan), Aremco Products Inc., Astro Met Inc., BCE Special Ceramics GmbH,

Ceradyne Inc., CeramTec (Hoechst), Ceram-Tek, Ceratec, Coors Ceramics, CTI — Ceramica Technica Industrial, Degussa (Friatec), Du-Co Ceramics, Dynamic Ceramic, Fairey Industrial Ceramics, Gimex, Goodfellow, A. G. Hackney, Haldenwanger, Lone Peak, Engineering, Maret, MarkeTech Int., Megaceram, Meller Optics, Moh-9, Morgan Matroc, NeoCeram, NGK, Performance Ceramics Co., Sanwa Tsusho, Saphikon, Saxonburg Ceramics, Seagoe, Toshiba Ceramics, TKT, Ukrainian Res. Inst., Valley Design Corp., Vesuvius McDanel Co., Vesuvius Zyalons, VZS, Wesgo.

Производители порошкообразного Al_2O_3 (1998 г.): Alcan Chemicals Europe, Norton, Pechiney, Pechiney Electrometallurgie, Sumitomo Chemical.

По первой категории (компактные изделия из Al_2O_3) приведены свойства продуктов, которые могут быть кратко обобщены для алюмооксидной керамики (не рассматривая сапфир⁵) следующим образом. Все свойства, кроме ТКЛР, указаны при комнатной температуре: кажущаяся плотность γ обычно 3,7–3,9 г/см³ для тонкой корундовой керамики⁶ (до 3,96 г/см³ для корундовой керамики высокой чистоты от 99,8 % и до 4,3 г/см³ для оксида алюминия, упрочненного оксидом циркония (ZTA)); предел прочности при изгибе σ_f в основном 250–400 МПа, иногда ниже

* Продолжение. Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 1 за 2019 г.



А. М. Абызов
E-mail: andabyz@mail.ru

⁵ В качестве производителей сапфира были указаны Ceratec, Goodfellow, Maret, MellerOptics, Saphikon.

⁶ Обычно под корундовой керамикой подразумевается керамика с содержанием Al_2O_3 95 % и выше.

или выше (до 500–600 МПа для корундовой керамики высокой чистоты $\geq 99,8\%$); предел прочности при сжатии σ_c в широких пределах, обычно 2000–4000 МПа; модуль Юнга E обычно 250–400 МПа; твердость по Виккерсу, Кнупу HV, HK обычно 15–23 ГПа; трещиностойкость K_{Ic} обычно 3,5–4,5 МПа·м^{0,5}, иногда до 5–6 МПа·м^{0,5} (до 7 МПа·м^{0,5} для ZTA); теплопроводность λ обычно 20–30 Вт/(м·К), реже ниже или выше (до 40 Вт/(м·К)); ТКЛР (среднее значение в интервале 20–1000 °С) в основном 6–8,5 ppm/К, иногда ниже или выше (до 9,4 ppm/К); удельное объемное электрическое сопротивление ρ обычно около 10^{14} Ом·см (диапазон 10^{12} – 10^{16} Ом·см), иногда ниже или выше ($> 10^{16}$ Ом·см).

Корундовую керамику высокой чистоты ($\geq 99,8\%$) уже выпускали: *BCE Special Ceramics GmbH*, *Ceradyne*, *Ceratec*, *Coors Ceramics*, *MarkeTech*, *Morgan Matroc*, *Sanwa Tsusho*, *Toshiba Ceramics*, *TKT-Metoxit*, *Vesuvius McDanel Co.*, *Vesuvius Zyalons*. Изготовителями ZTA числились *Coors Ceramics*, *Degussa (Friatec)*, *MarkeTech*, *Moh-9*, *Morgan Matroc*, *Toshiba Ceramics*, *VZS*.

В настоящее время информация о производителях алюмооксидной керамики и технических характеристиках их продукции доступна в Интернете на сайтах этих компаний. Ниже представлена такая подборка по результатам проведенного поиска⁷. В табл. 7–14 приведена техническая спецификация продуктов из рекламных проспектов, главным образом тех, в которых имеются данные о размере зерен керамики d . Все свойства указаны для комнатной температуры 20 или 25 °С, если в сносках не указано иное. Составы возможных добавок и технология изготовления керамики в рекламных проспектах производителями, как правило, не раскрываются. Косвенно о составе керамики можно судить по ее плотности, которая всегда присутствует в спецификациях. Сам список фирм изменился: часть фирм поменяла название; появился ряд новых компаний; некоторые перестали существовать (например, широко известная *Degussa*), вошли в состав или были приобретены другими компаниями (так, *Norton* вошла в группу *Saint-Gobain*, *Ceradyne* стала дочерней компанией *3М*).

Некоторые зарубежные производители алюмооксидной керамики (2018 г.): *Accuratus Corp.* (США) — <http://accuratus.com>; *Aremco* (США) — <https://www.aremco.com>; *BCE Special Ceramics GmbH* (Германия) — <http://www.bce-special-ceramics.com>; *CeramTec* (Германия)

— <https://www.ceramtec.com>; *CoorsTek* (США) — <https://www.coorstec.com>; *Dynamic Ceramic Inc.* (Великобритания) — <http://www.dynacer.com>; *H. C. Starck Ceramics* (Германия) — <https://www.hcstarck.com/en/home.html>; *Hangzhou JW Technology* (Китай) — <http://www.ceramic-metal-partss.com>; *HT-Ceram Group* (Италия) — <http://ht-ceramgroup.com>; *International Syalons* (Великобритания) — <http://www.syalons.com>; *Japan Fine Ceramics* (Япония) — <https://www.japan-fc.co.jp/en>; *Kyocera* (Япония) — <https://global.kyocera.com>; *Materion* (США) — <https://materion.com>; *Morgan Advanced Materials* (Великобритания) — <http://www.morganadvancedmaterials.com>; *Ortech Advanced Ceramics* (США) — <http://www.ortechceramics.com>; *Schunk Ingenieurkeramik* (Германия) — <https://www.schunk-group.com/en>; *Superior Technical Ceramics* (США) — <http://www.ceramics.net>.

Некоторые зарубежные производители порошков оксидов и гидроксидов алюминия, алюмооксидных зернистых абразивов (2018 г.): *Advanced Abrasives* (США) — <http://www.advancedabrasives.com>; *Almatis* (Германия) — <http://www.almatis.com>; *AluChem* (США) — <http://aluchem.com>; *Dadco Alumina and Chemicals* (Великобритания) — <http://www.dadcoalumina.com>; *Imerys Fused Minerals* (Франция) — <http://www.imerys-fusedminerals.com>; *Inframat* (США) — <http://www.inframat.com/advancedmaterials.htm>; *3М* (США) — <https://www.3m.com>; *MAL Hungarian Aluminium* (Венгрия) — <http://english.mal.hu/Engine.aspx>; *Nabaltec* (Германия) — <http://www.nabaltec.de>; *Saint-Gobain Ceramic Materials* (Франция) — <https://www.abrasivematerials.saint-gobain.com>; *Xi'an Chembor* (Китай) — <http://alumina-boron-oxide.com>.

Кроме монолитных изделий и дисперсных материалов (зерна, порошки) Al_2O_3 доступен в виде волокон. Компания *3М* (США) выпускает корундовое волокно Nextel 610 (> 99 мас. % Al_2O_3) наряду с алюмосиликатным волокном Nextel 720 (> 85 мас. % Al_2O_3) и алюмоборосиликатными волокнами Nextel 312 и Nextel 440 (62,5 и 70 мас. % Al_2O_3) [45]. Диаметр филаментов этих волокон 8–14 мкм, размер кристаллитов менее 0,5 мкм, диаметр самих волокон доли миллиметра, плотность волокон 1,5–20 тыс. денье⁹. Волокно Nextel 610 имеет γ 3,9 г/см³, предел прочности при растяжении σ_t филамента 2800 МПа, E 370 МПа. Волокна выпускаются в виде непрерывных нитей, плетеных тканей или резаными. Подробную информацию о волокнах на основе Al_2O_3 различных производителей, выпускав-

⁷ Более полный список можно найти, например, на сайтах Немецкого и Американского керамических обществ в разделе «Корпоративные члены» (https://www.dkg.de/en/members/companies/technical_ceramics, <http://ceramics.org/acers-community/corporate-members-2>).

⁸ Фирма приобретена частным турецким пенсионным фондом *Oyak* в 2015 г., подробная техническая информация о продуктах на сайте отсутствует.

⁹ Линейная плотность, грамм на 9 км длины.

шихся с 1970-х годов, можно найти в публикации [46]. Разновидности, способы изготовления, структура и свойства алюмооксидных волокон, композиты на их основе, некоторые рыночные аспекты рассмотрены в публикации [47].

К данным, представленным в табл. 7–14, необходимо сделать следующие комментарии. Непосредственное сравнение параметров различных продуктов не всегда возможно, так как измеряе-

мые при тестировании величины часто зависят от метода и условий измерения. В спецификациях производители не всегда указывают метод измерения и его условия либо условия измерений меняются от продукта к продукту. Это замечание относится к температурному диапазону, в котором измерялся ТКЛР, к нагрузке при измерении твердости, к толщине материала при определении пробойного напряжения, к частоте, при

Таблица 7. Алюмооксидная и корундоциркониевая керамика CoorsTek [31]

Марка	Al ₂ O ₃ , мас. %	γ, г/см ³	d, мкм	σ _f ^{*1} , МПа	σ _t , МПа	σ _c , МПа	E ^{*2} , ГПа	K _{IC} ^{*3} , МПа·м ^{0,5}	HK ^{*4} , ГПа	λ, Вт/(м·К)	ТКЛР ^{*5} , ppm/K	E _{br} ^{*6} , кВ/мм	ε _r ^{*7}	tgδ ^{*7}
AD-85	85	3,42	6	296	155	1930	221	3–4	9,4	16,0	7,2	9,4	8,2	9·10 ⁻⁴
AD-90	90	3,60	4	338	221	2482	276	3–4	10,4	16,7	8,1	8,3	8,8	4·10 ⁻⁴
AD-94	94	3,70	8	352	193	2103	303	4–5	11,5	22,4	8,2	8,3	9,1	4·10 ⁻⁴
AD-96	96	3,72	6	358	221	2068	303	4–5	11,5	24,7	8,2	8,3	9,0	2·10 ⁻⁴
FG-995	98,5	3,80	6	375	248	2500	350	4–5	13,7	27,5	8,2	8,7	9,6	2·10 ⁻⁴
AD-995	99,5	3,90	6	379	262	2600	370	4–5	14,1	30,0	8,2	8,7	9,7	1·10 ⁻⁴
PLASMAPURE AD-998	≥99,8	3,92	6	390	272	2650	380	4–5	14,1	31,0	8,2	8,7	9,8	<1·10 ⁻⁴
PLASMAPURE -UC ALUMINA ^{*8}	≥99,9	3,92	3	400	283	2700	386	4–5	14,5	33,0	8,2	8,7	9,8	<1·10 ⁻⁴
ZTA	ZTA	4,01	2	450	290	2900	360	5–6	14,4	27,0	8,3	9,0	10,6	5·10 ⁻⁴
AZ-67 ^{*9}	ZTA	4,40	–	1000	–	–	340	7	16,0	20,0	9,0	–	–	–
AZ-93 ^{*9}	ZTA	4,80	–	1200	–	–	295	7	16,0	12,0	8,5	–	–	–

*1 Трехточечный изгиб.

*2 Измерен методом акустического резонанса.

*3 Измерена на образцах с односторонним надрезом (метод SEVNB).

*4 При нагрузке 1 кг.

*5 При 25–1000 °С.

*6 При толщине 6,35 мм для переменного тока.

*7 При 1 МГц.

*8 ρ > 10¹⁵ Ом·см, ρ > 10¹⁴ Ом·см для всех остальных марок (кроме AZ-67 и AZ-93).

*9 Значения водопоглощения W и ρ не указаны, для всех остальных марок W = 0 %.

Таблица 8. Алюмооксидная и корундоциркониевая керамика Morgan Advanced Materials [32] (для всех марок W = 0 %)

Марка	Al ₂ O ₃ , мас. %	γ, г/см ³	d, мкм	σ _f ^{*1} , МПа	σ _c , МПа	E, ГПа	K _{IC} , МПа·м ^{0,5}	HV ^{*2} , ГПа	λ, Вт/(м·К)	ТКЛР ^{*3} , ppm/K	ρ ^{*4} , Ом·см	E _{br} , кВ/мм	ε _r ^{*5}	tgδ ^{*5}
Hilox 882	84,0	3,50	2,5	270	–	243	4,0	–	15,0	8,6	>10 ¹⁴	28,0	8,8	1,8·10 ⁻³
Hilox 961	96,0	3,89	3,5	325	–	358	4,5	–	20,7	9,0	>10 ¹⁴	28,0	8,8	1,8·10 ⁻³
Sintox FA Ballistic	96,0	3,74	4,0	350	2000	320	4,6 ^{*6}	12,5	–	–	–	–	9,9	1,5·10 ⁻³
Sintox CL	98,6	3,89	4,0	410	2000	380	3,5 ^{*6}	17,0	25,0	8,0	–	–	9,8	3,0·10 ⁻⁴
Deranox 970	97,0	3,74	14,0	280	2000	330	3,5	12,8	24,0	8,1	>10 ¹⁵	30,6	9,2	4,1·10 ⁻⁴
Deranox 975	97,5	3,80	4,0	350	2500	340	3,6	15,0	24,0	8,1	>10 ¹⁶	20,0	9,1	1,0·10 ⁻³
Deranox 995	99,5	3,89	10,0	330	2500	370	–	14,3	30,8	7,8	3·10 ¹⁵	–	9,6	1,9·10 ⁻⁴
Deranox 999	99,9	3,95	2,5	500	2500	400	–	18,5	30,0	8,9	>10 ¹⁵	–	9,5	4,3·10 ⁻⁴
Vitox AMC	ZTA ^{*7}	4,26	0,67/0,16	700 ^{*8} , 400 ^{*9}	–	370	4,5 ^{*6} , 5,7 ^{*10}	17,0	–	–	–	–	9,97	9,1·10 ⁻⁴
													9,88	1,1·10 ⁻³
													10,1	8,0·10 ⁻⁴
													10,0	1,0·10 ⁻³

*1 Трехточечный изгиб для всех марок, кроме Vitox AMC.

*2 Для Deranox 999 и Vitox AMC при нагрузке 1 кг, для остальных марок — при нагрузке 0,5 кг.

*3 При 20–1000, 20–800 или 0–800 °С.

*4 Для Hilox 882 и Hilox 961 измерено при 100 °С.

*5 Первое значение — при 1 МГц, второе — при 10 ГГц.

*6 Измерена для образцов с односторонним надрезом (метод SEVNB).

*7 Состоит из Al₂O₃ чистотой 99,9 % и PSZ (3 % мол. Y₂O₃).

*8 Четырехточечный изгиб.

*9 Испытания двухосевым методом.

*10 Метод индентирования.

Таблица 9. Корундовая и корундоциркониевая керамика *CeramTec* [33–36] (для всех марок $W = 0 \%$)

Марка	Al ₂ O ₃ , мас. %	γ, г/см ³	d, мкм	σ _f , МПа	σ _t , МПа	σ _c , МПа	E, ГПа	K _{Ic} ^{*1} , МПа·м ^{0,5}	HV ^{*2} , ГПа	λ, Вт/(м·К)	ТКЛР ^{*3} , ppm/К	ρ, Ом·см	E _{br} ^{*4} , кВ/мм	ε _r ^{*5}	tgδ ^{*6}
AT 79	99,2	3,95	–	470	–	4000	390	4,0	20,7	30	–	5·10 ¹⁴	18,0	9,0	5·10 ^{–3}
V679	99,7	3,90	–	300	–	2500	390	5,4	17,2	30	8,5	1·10 ¹⁴	30,0	9,0	1·10 ^{–3}
RK87	99,8	3,96	–	630	–	4000	406	4,3	19,6	30	8,5	5·10 ¹⁴	19,0	9,0	5·10 ^{–3}
433	99,9	4,00	–	414	240	2700	400	4,2	19,6	37	8,2	1·10 ¹⁴	–	10,0	–
Rubalit 708S	96,0	3,78	3-5	400 ^{*7}	–	–	340	–	–	24	8,0	1·10 ¹³	15,0	9,8	3·10 ^{–4}
				500 ^{*8}	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	2·10 ^{–4}
Rubalit 710	99,6	3,90	2	400 ^{*7}	–	–	350	–	–	28	8,5	1·10 ¹³	10,0	10,1	–
977	ZTA	4,07	2-3	470	–	–	–	4,4	15,2	–	–	–	–	–	–
965	ZTA	4,20	–	550	450	3590	344	7,2	14,2	21	8,0	–	–	–	–
950	ZTA	4,40	–	680	410	2890	289	6,0	14,7	15	8,3	–	–	–	–
DC25	ZTA ^{*9}	4,37	0,54	1390 ^{*7}	–	4700	357	6,4	17,3	17	–	2·10 ¹³	16,5	–	–
BIOLOX delta	ZTA ^{*10}	–	0,87/0,45	–	–	–	361	5,7	17,7	–	–	–	–	–	–

^{*1} Измерена для образцов с односторонним надрезом (метод SEVNB), для марок 977 и 965 метод измерения не указан.

^{*2} При 1 кг для марок V679, RK87, DC25 и BIOLOX delta, при 0,5 кг для марок 433, 977 и 965.

^{*3} При 20–1000 °C.

^{*4} При толщине 1 мм для марок Rubalit 708S и Rubalit 710, для остальных марок толщина не указана.

^{*5} При 1 МГц.

^{*6} При 1 МГц для марок Rubalit 708S и Rubalit 710, при 9 ГГц для марок V679 и RK87.

^{*7} Четырехточечный изгиб.

^{*8} Испытания методом двух коаксиальных колец для образцов-подложек.

^{*9} Состав, мас. %: 74 Al₂O₃, 0,30 Cr₂O₃, 24 ZrO₂, 0,60 Y₂O₃.

^{*10} Состав, об. %: 80 Al₂O₃, 17 ZrO₂ (2 мас. % HfO₂), 3 SrZrO₃. Содержит YCrO₃ (в пересчете на оксид хрома 0,33 мас. % Cr₂O₃).

Таблица 10. Аллюмооксидная керамика и сапфир *Kyocera* [37, 38] (для всех марок $W = 0 \%$)

Марка	Al ₂ O ₃ , мас. %	γ, г/см ³	σ _f ^{*1} , МПа	σ _c , МПа	E ^{*2} , ГПа	K _{Ic} ^{*3} , МПа·м ^{0,5}	HV ^{*4} , ГПа	λ, Вт/(м·К)	ТКЛР ^{*5} , ppm/К	E _{br} , кВ/мм	ε _r ^{*6}	tgδ ^{*6}
A-445 ^{*7}	90,0	3,80	320	–	320	–	12,7	12	8,1	12	9,8	2·10 ^{–3}
A-471	92,0	3,60	390	–	280	–	11,8	16	7,9	16	8,9	6·10 ^{–4}
A-484	92,0	3,60	370	–	280	–	12,3	17	7,7	14	8,9	9·10 ^{–4}
A-476	96,0	3,70	350	–	320	–	13,7	24	8,0	15	9,4	4·10 ^{–4}
A-479	99,0	3,80	310	2160	360	3–4	15,2	29	8,0	15	9,9	2·10 ^{–4}
A-479M	99,5	3,90	370	–	370	–	15,7	32	8,0	15	9,9	1·10 ^{–4}
A-479G												
A-480S	99,7	3,90	380	–	380	–	17,2	32	8,0	15	9,9	1·10 ^{–4}
A-601D	99,9	3,90	400	–	380	5–6	17,5	34	8,0	15	9,9	1·10 ^{–4}
A-601L												
Сапфир	99,99	3,97	690	2940	470	–	22,5	41	7,7 ^{*8} 7,0 ^{*9}	48	11,5 ^{*8} 9,3 ^{*9}	>1·10 ^{–4}

^{*1} Трехточечный изгиб.

^{*2} Измерено методом импульсной ультразвуковой эхолокации.

^{*3} Измерено на образцах с предварительно нанесенной с одной стороны трещиной (SEPB).

^{*4} При нагрузке 0,5 кг.

^{*5} При 40–800 °C.

^{*6} При 1 МГц.

^{*7} ρ = 10¹¹ Ом·см, для всех остальных марок ρ > 10¹⁴ Ом·см.

^{*8} Лс.

^{*9} ||с.

Таблица 11. Аллюмооксидная и корундоциркониевая керамика *Dynamic Ceramic Inc.* [39] (для всех марок ρ > 10¹⁴ Ом·см)

Марка	Al ₂ O ₃ , мас. %	γ, г/см ³	σ _f , МПа	σ _c , МПа	E, ГПа	K _{Ic} , МПа·м ^{0,5}	HV [*] , ГПа	λ, Вт/(м·К)	ТКЛР, ppm/К	T _{max} , °C
Dynalox 96	96,0	3,67	360	2100	275	3,5	15,6	25	7,8	1700
Dynalox 100	99,7	3,89	330	2100	330	4,0	15,7	29	8,4	1800
Dynalox HP	99,9	3,92	350	2500	350	4,5	16,6	28	8,5	1800
Dynalox Z	ZTA	4,60	900	2500	330	7,3	16,1	17	8,0	1500

* При нагрузке 0,3 кг.

которой измеряли диэлектрические потери, и т. п. Прочностные свойства могут сильно зависеть от метода измерения. Так, для ZTA марки Vitox AMC производитель (*Morgan Advanced Materials*) указывает σ_f 700 МПа для четырехточечного изгиба и 400 МПа для двухосевого, тогда как для всей

остальной аллюмооксидной керамики дает значения σ_f при трехточечном изгибе (см. табл. 8). Кроме того, большинство производителей снабжает свои технические спецификации примечаниями типа «Предназначено для иллюстрации типичных свойств. Значения свойств варьируют-

Таблица 12. Корундовая керамика высокой чистоты и корундоциркониевая керамика *Superior Technical Ceramics* [40–42] (для всех марок $\rho > 10^{14}$ Ом·см, $W = 0$ %)

Марка	Al ₂ O ₃ , мас. %	γ , г/см ³	d , мкм	σ_f^{*1} , МПа	σ_t , МПа	σ_c , МПа	E^{*2} , ГПа	K_{Ic}^{*3} , МПа·м ^{0,5}	HV^{*4} , ГПа	λ , Вт/(м·К)	ТКЛР ^{*5} , ppm/К	E_{br}^{*6} , кВ/мм	ϵ_r^{*7}	$tg\delta^{*7}$	T_{max} , °C
AL 9980	99,80	3,91	6	379	–	2240	379	4–5	15,0	30	8,1	11,4	9,8	$<1 \cdot 10^{-4}$	1675
AL 9996	99,96	3,93	1	421	–	2413	393	5–6	19,6	35	8,2	15,7	9,9	$<1 \cdot 10^{-4}$	1700
ZTA-02	ZTA ^{*8}	3,96	<2	448	259	2413	358	5	14,0	27	8,3	9,1	10,5	$3 \cdot 10^{-4}$	1500
ZTA-14	ZTA ^{*9}	4,17	6	586	344	2758	338	6	14,5	24	7,1	9,8	12,5	$6 \cdot 10^{-4}$	1500
ZTA-20	ZTA ^{*10}	4,30	3	621	350	2758	338	6	14,4	24	7,1	9,8	12,5	$6 \cdot 10^{-4}$	1500

^{*1} Трехточечный изгиб.
^{*2} Измерено методом акустического резонанса.
^{*3} Измерено для образцов с односторонним надрезом (метод SEVNB).
^{*4} При нагрузке 0,5 кг.
^{*5} При 25–600 °C.
^{*6} При толщине 3,2 мм.
^{*7} При 1 МГц.
^{*8} Содержит 2 об. % ZrO₂.
^{*9} Содержит 14 об. % ZrO₂.
^{*10} Содержит 20 об. % ZrO₂.

Таблица 13. Корундовая керамика *Ortech* [43] (для всех марок $W = 0$ %)

Al ₂ O ₃ , мас. %	γ , г/см ³	d , мкм	σ_f , МПа	σ_t , МПа	σ_c , МПа	E , ГПа	K_{Ic} , МПа·м ^{0,5}	H , ГПа	λ , Вт/(м·К)	ТКЛР ^{*1} , ppm/К	E_{br}^{*2} , кВ/мм	ϵ_r^{*3}	$tg\delta^{*3}$	T_{max} , °C
96,0	3,72	6	358	221	2068	303	4–5	11,5	24,7	8,2	8,3	9,0	$2 \cdot 10^{-4}$	1700
99,5	3,90	6	379	262	2600	370	4–5	14,1	30,0	8,2	8,7	9,7	$1 \cdot 10^{-4}$	1750
99,8	3,92	6	375	248	2500	370	4–5	14,1	30,0	8,2	8,7	9,8	$<1 \cdot 10^{-4}$	1750

^{*1} При 25–1000 °C.
^{*2} При толщине 6,35 мм для переменного тока.
^{*3} При 1 МГц.

Таблица 14. Корундовая керамика *Materion* [44] (для всех марок $\rho > 10^{15}$ Ом·см, $W = 0$ %)

Марка	Al ₂ O ₃ , мас. %	γ , г/см ³	d , мкм	σ_f , МПа	σ_t , МПа	σ_c , МПа	E , ГПа	K_{Ic} , МПа·м ^{0,5}	λ , Вт/(м·К)	ТКЛР ^{*1} , ppm/К	E_{br}^{*2} , кВ/мм	ϵ_r^{*3}	$tg\delta^{*3}$
Durox 98	97,6	3,83	2	380	150	2400	350	4	27	7,5	8,7	9,0	$1 \cdot 10^{-4}$
Durox AL	99,8	3,94	2	380	280	2400	360	4	30	8,0	8,7	9,7	$1 \cdot 10^{-4}$
Durox UHP	99,9	3,95	1	380	280	2400	375	4	35	8,0	8,7	9,8	$1 \cdot 10^{-4}$

^{*1} При 25–1000 °C.
^{*2} При толщине 6,35 мм для переменного тока.
^{*3} При 1 МГц.

ся в зависимости от способа изготовления, размера и формы изделия. Данные, содержащиеся в настоящем документе, не должны толковаться как абсолютные и не представляют собой гарантии, за которые производитель принимает на себя юридическую ответственность». Химические свойства — скорость травления в растворах HNO₃, H₂SO₄, NaOH — указаны в спецификациях только фирмой *Kyocera* (в табл. 10 не включены). Материалы состава ZrO₂–Al₂O₃, в которых доминирующим компонентом является ZrO₂, здесь не рассмотрены.

Сравнение характеристик выпускаемых в настоящее время продуктов (см. табл. 7–14) с корундовой керамикой, выпускавшейся 20 лет назад [30], показывает, что каких-то заметных изменений в свойствах продукции этого сектора не произошло. В основном это связано с достижением предельных характеристик по плотности, механическим, тепловым и диэлектрическим свойствам или с близостью к таковым. В части применения новых добавок для легирования корунда при спекании также трудно ожи-

дать каких-то прорывов, поскольку за истекшие десятилетия в исследовательских работах перепробовано множество всевозможных одно-, двух-, трех- и многокомпонентных добавок такого назначения [48].

Как следует из табл. 7–14, тонкая техническая корундовая керамика имеет вариации по характеристикам, если сравнивать марки одного или разных изготовителей с близким содержанием Al₂O₃ (основного вещества). О причинах этого трудно судить, не имея информации о детальном составе и способе изготовления продуктов. В целом продукция ведущих западных производителей примерно соответствует одному уровню. В качестве реперных показателей при сравнении различной керамики можно использовать свойства монокристаллического Al₂O₃–сапфира. Наиболее надежные сведения по сапфиру из справочника [49] следующие: $\gamma = 3,97 \div 3,99$ г/см³, $\sigma_f = 450 \div 895$ МПа, $\sigma_t = 275 \div 400$ МПа, $\sigma_c = 2000$ МПа, $E = 322 \div 494$ ГПа, $K_{Ic} = 2,3 \div 5,8$ МПа·м^{0,5} (в зависимости от состояния и дополнительной обработки поверхности, способа выращивания

кристалла), $H = 19,40 \div 23,15$ ГПа, $\lambda = 30,3 \div 46,1$ Вт/(м·К), ТКЛР = $5,0 \div 6,6$ ppm/K, $\rho = 5 \cdot 10^{18} \div 2 \cdot 10^{19}$ Ом·см, $\varepsilon_r = 9,3 \div 11,5$ (при 1 кГц – 1 ГГц), $\tan \delta = 1 \cdot 10^{-4}$ (при 1 кГц – 1 ГГц), $\tan \delta = 3,0 \cdot 10^{-5} \div 8,6 \cdot 10^{-5}$ (при 10 ГГц). Здесь интервал значений соответствует различным ориентациям кристалла или данным разных первоисточников. Сапфир превосходит корундовую керамику по электроизоляционным свойствам (ρ , E_{br}). Что касается других свойств, то корундовая керамика высокой чистоты сопоставима с сапфиром или приближается к нему по многим характеристикам (σ_c , E , K_{Ic} , H , λ и др.). В табл. 7–14 отсутствует корундовая керамика с максимальным σ_f , составляющим 700–750 МПа, которая может быть получена методами горячего прессования или в газостате из высокодисперсных порошков [50]. Очевидно, вследствие сложности технологии и высокой цены такая керамика массово не выпускается. Наивысшее значение σ_f , которое удалось найти среди спецификаций производителей корундовой керамики (исключая композиты и инструментальную керамику), составляет 660 МПа для керамических подложек *Japan Fine Ceramics* из Al_2O_3 чистой 99,9 % ($E = 390$ ГПа, $\lambda = 33$ Вт/(м·К), $\rho = 10^{15}$ Ом·см, шероховатость Ra 0,03 мкм). Выдающиеся значения σ_f 700 и 750 МПа заявлены для алюмооксидной инструментальной керамики марок HC1 и HW2 компании NTK (табл. 15). Следует отметить, что, судя по плотности, по крайней мере, керамика HW2 ($\gamma = 4,1$ г/см³) содержит заметное количество добавки.

Наблюдаемый прогресс можно связать с развитием производства композитной, в частности корундоциркониевой, керамики. Так, в 1998 г., по данным [30], σ_f коммерчески доступного ZTA составлял 450–750 МПа. Из табл. 7, 9 и 11 видно, что появились марки ZTA с σ_f 900–1400 МПа. О текущих трендах свидетельствует появление статьи [36], авторами которой являются сотрудники фирмы *CeramTec*. Эта статья представляет собой отчет об исследовании микроструктуры и механических свойств ZTA марки BIOLOX delta медицинского назначения. Приводится статистика данных по размеру кристаллитов (зерен), плотности, трещиностойкости, твердости, модулю Юнга; описаны состав и способ изготовления образцов, которые соответствуют применяемой промышленной технологии.

Композиты с Al_2O_3 используются в основном для изготовления режущих керамических пластин (для токарной, фрезерной обработки). В этом классе инструментальной керамики известны оксид-оксидные и оксид-карбидные композиты (Al_2O_3 – ZrO_2 , Al_2O_3 –TiC), а также оксид алюминия, армированный усами карбида кремния Al_2O_3 –SiC_(w) [51, 52]. Следует отметить, что из указанных в [53] производителей инструментальной керамики более не существуют *Feldmühle*, *Hertel* (приобретен фирмой *Kennametal*), *Valenite* (приобретен фирмой *Sandvik*), *Dias*. В адресованной потребителю информации обычно можно найти только указания, к какому классу относится та или иная марка без дальнейшей детализации (см. [54–56]). В табл. 15 можно ознакомиться с более представительными данными из каталога NTK по алюмооксидной и смешанной (композитной) керамике для режущего инструмента. Видно, что прочность композитов марок HC и WA существенно выше, чем у другой технической керамики (см. табл. 7–14). В 1990-е годы были получены композиты Al_2O_3 –SiC_(w) с $\sigma_f \sim 700$ МПа и с K_{Ic} до 8 МПа·м^{0,5} [52]. Как видно из табл. 15, в настоящее время σ_f композитов WA1 и WA5 с наполнителем из усов карбида кремния и алюмооксидной матрицей достигает 1200 МПа. Известны и другие композиты, например *Ceralloy 7712* (*Ceradyne*) состава Al_2O_3 – 60 % SiC ($\gamma = 3,36$ г/см³, $\sigma_f = 530$ МПа) [33], который применялся как бронекерамика.

Сравнивая уровни промышленного производства и исследований, следует отметить, что в исследовательских работах получен ZTA с прочностными характеристиками выше, чем у продуктов, представленных в табл. 7–14. Уже в пионерских работах (Claussen и др., 1976–1977 гг.) была достигнута K_{Ic} 10 МПа·м^{0,5} при введении в Al_2O_3 субмикронных или микронных частиц ZrO_2 [57]. При этом были продемонстрированы сильная зависимость с экстремумом значения K_{Ic} от объемной доли ZrO_2 в ZTA, быстрое снижение прочности после превышения критической объемной доли ZrO_2 , соответствующей этому экстремуму, а также зависимость K_{Ic} от размера частиц ZrO_2 (возможность увеличения трещиностойкости при уменьшении этого размера). В работе [58] из синтезированных авторами нанопорошков Al_2O_3 – ZrO_2 путем горячего изоста-

Таблица 15. Инструментальная керамика NTK [51]

Марка	Состав	γ , г/см ³	σ_f^* , МПа	E , ГПа	λ , Вт/(м·К)	ТКЛР, ppm/K
HC1	Al_2O_3	4,0	700	400	17	7,8
HW2	Al_2O_3	4,1	750	390	19	7,8
HC2	Al_2O_3 + TiC	4,3	800	420	21	7,9
HC4	Al_2O_3 + TiC	4,6	1000	420	25	7,8
HC7	Al_2O_3 + TiC	4,6	1100	420	23	7,9
HC6	TiC + Al_2O_3	4,7	800	450	29	7,6
WA1	Al_2O_3 + SiC _(w)	3,7	1200	400	35	7,6
WA5	Al_2O_3 + SiC _(w)	3,8	1200	400	35	7,7

* Трехточечный изгиб (разъяснение в ответ на запрос в компанию).

тического прессования при 1200 °С был получен наноструктурированный ZTA, содержащий 10 об. % ZrO_2 (тетрагональный и моноклинный) зернистостью $d < 100$ нм, с $K_{Ic} = 8,4$ МПа·м^{0,5}, $HV = 4,4$ ГПа (при нагрузке 20 кг). Керамика в системе Al_2O_3 – ZrO_2 , близкая к эвтектическому составу и содержащая 30 % частично стабилизированного ZrO_2 , изготовленная методом гетерофазного осаждения из растворов солей с последующим горячим прессованием, имела σ_f 1200–1500 МПа и $K_{Ic} \sim 15$ МПа·м^{0,5} [50]. Как видно из табл. 7–14, такие характеристики не реализованы для коммерчески доступного ZTA.

Размер зерен d является важнейшей структурной характеристикой керамики, которая во многом определяет ее физические свойства. В частности, уменьшение зерна способствует повышению σ_f и σ_t , K_{Ic} . Следует отметить, что для коммерчески доступной алюмооксидной керамики субмикронная зернистость является редкостью. Такими примерами может служить корундоциркониевая керамика марок Vitox AMC (*Morgan Advanced Materials*), d Al_2O_3 которой составляет 0,67 мкм, а d PSZ — 0,16 мкм (см. табл. 8); BIOLOX delta (*CeramTec*) с d Al_2O_3 0,87 мкм и PSZ 0,45 мкм (см. табл. 9), DC 25 (*CeramTec*) со средним d 0,54 мкм (см. табл. 9). У остальной алюмооксидной керамики, для которой в табл. 7–14 представлены значения d , размер зерен составляет от 1 мкм и выше. Керамику с меньшим размером зерен можно в принципе изготовить, используя в качестве сырья нанопорошки. Однако кроме полезных характеристик, таких как предельно малый размер первичных частиц, пониженная температура спекания, высокая реакционная способность и др., нанопорошки имеют ряд свойств, ограничивающих их применение. А именно, они склонны к агрегированию, сорбции примесей, плохо компактируются, неудобны в обращении из-за пыления, имеют более высокую стоимость по сравнению с микропорошками. Проблемы уплотнения при спекании, связанные с неоднородностью упаковки частиц в порошковых компактах, и способы их решения рассмотрены в статьях [59, 60]. Отсутствие на рынке корундовой керамики субмикронной зернистости трудно объяснить только технологическими трудностями, поскольку способы ее изготовления разработаны и сырье — нанопорошки оксида алюминия — имеются в продаже. Так, Фраунгоферовский институт керамических технологий и систем (Германия) предлагает для внедрения в производство, в частности, высокопрочную корундовую керамику субмикронной структуры, прозрачную и непрозрачную, со следующими параметрами: $\gamma = 3,9 \div 3,98$ г/см³, $d \geq 0,2$ мкм, $R_a = 1 \div 2$ нм (после полировки), $\sigma_f = 600 \div 900$ МПа (при свободном спекании), $E = 380 \div 395$ ГПа, $K_{Ic} = 3,5 \div 4,0$ МПа·м^{0,5}, $HV = 19,6 \div 23,5$ ГПа (при нагрузке 10 кг), $\lambda = 25$ Вт/(м·К)

— для различного применения (режущий инструмент, спеченные абразивы, броня, костные имплантаты, резьбовой крепеж, уплотнения, подложки) при широком выборе используемых методов (свободное спекание, холодное изостатическое прессование, фильтрация под давлением, литье геля) [61]. Очевидно, отсутствие промышленного выпуска такой керамики обусловлено в основном причинами экономическими, юридическими и т. п.

На практике спекание нанопорошков с получением керамики ультратонкой микроструктуры (субмикронной зернистости) осуществлялось в исследовательских работах прежде всего методами горячего прессования, электроискрового спекания (spark plasma sintering, electric current sintering). Показано, что плотная керамика субмикронной зернистости может быть получена, не прибегая к таким аппаратурно-сложным методам, путем обычного свободного спекания (без приложения давления) за счет подбора неординарного температурного режима спекания [62]. Таким способом была получена, например, корундовая керамика со средним d 0,52–0,72 мкм при относительной плотности 91,0–96,6 %. При дополнительном введении ZrO_2 в количестве 5 об. % была получена корундоциркониевая керамика со средним d 0,41–0,55 мкм при относительной плотности 99,0–99,7 %. В качестве исходного материала использовали нанопорошки Al_2O_3 и ZrO_2 (средний размер первичных частиц $Al_2O_3 \sim 120$ нм).

Традиционная технология изготовления керамики, в том числе алюмооксидной, подразумевает измельчение Al_2O_3 до мелкодисперсного состояния (как стадию изготовления сырья), а также возможный помол с добавками и временной связкой для гомогенизации порошковых смесей. Предельно достижимая при промышленном измельчении дисперсность соответствует d 0,3–0,5 мкм и удельной поверхности около 6 м²/г [53]. В табл. 16 приведены типичные промышленно выпускаемые глиноземы тонкого помола. У марок AC16RG, AC-13-325 и AC-300-325SG наблюдаются более высокие удельная поверхность и размер частиц, что соответствует шероховатым частицам, состоящим из агрегированных кристаллов. С применением специальных мер по стабилизации наночастиц механохимической обработкой получены нанопорошки α - Al_2O_3 с d около 0,02 мкм [64].

Обычная технология помола – спекание может быть модифицирована с применением мокрых химических методов, когда либо исходные порошки для спекания получают каким-либо жидкофазным методом, либо готовые продукты изготавливают удалением растворителя из реакционного объема с последующим отжигом, не выделяя синтез порошка в отдельную стадию

Таблица 16. Наиболее мелкодисперсные глиноземы производства *AluChem* [63]

Марка	Состав, мас. %				Удельная поверхность, м ² /г	Медианный размер частиц, мкм	Размер кристаллов, мкм
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O			
AC2800 ^{*1}	99,8	0,05	0,02	0,3	8	0,5	–
AC16RG ^{*1}	≥99,3	0,03	0,02	<0,1	13–16	1–3	–
AC-13-325 ^{*2}	99,2	0,02	0,02	0,2	10–14	3	<1
AC-300-325SG ^{*3}	99,4	0,02	0,01	0,2	9–13	2	<1

^{*1} Активный (для спекания).
^{*2} Кальцинированный молотый.
^{*3} Абразивный (для полировки).

[65]. Основным среди таких методов является золь-гель метод. Он давно нашел промышленное применение для производства алюмооксидных абразивов. Соответствующие продукты выпускаются фирмами 3M и Norton с 1988 г. под торговыми марками Cubitron и SG. Так, доступны порошки Cubitron 321 зернистостью F16 – F220 (*d* от ~60 мкм до ~1,4 мм), состоящие из алюмомагнезиальной шпинели, алюмината редкоземельного металла и базового α-Al₂O₃ [66]. Особенностью этих материалов является субмикронный размер кристаллитов (< 1 мкм) в отличие от обычного электрокорунда, частицы которого состоят из кристаллитов размерами 5–20 мкм [67]. Золь-гель метод может быть хорошо адаптирован для получения не только дисперсных, но и волокнистых материалов, пленок, покрытий и пористой керамики. Достоинствами золь-гель метода являются снижение температуры обжига, примерно одинаковые размеры и близкая к сферической форма частиц в геле, что обеспечивает получение однородной мелкозернистой керамики; кроме того, имеется возможность равномерно смешивать различные компоненты в золе [53]. Известно, что золь-гель методом можно получать керамические матрицы армированных волокнами композитов, хотя при этом может требоваться неоднократное повторение цикла заполнения гелем – отжиг [68]. Однако изготовление непосредственно монолитных керамических изделий золь-гель методом затруднительно. Причинами этому являются очень большая усадка¹⁰, необходимость утилизации значительного количества отходов (жидких или газобразных), особенно в случае неводного растворителя, удорожание продукта из-за заметной стоимости исходных реагентов. Другие известные методы синтеза ультрадисперсных порошков как прекурсоров и активационного воздействия при спекании оксидной керамики включают химическое осаждение и соосаждение из растворов, пиролиз растворов, гидротермальные реакции, синтез сжиганием, реакционное спекание с введением металлических порошков [53, 69].

Для материалов на основе Al₂O₃ хорошо подходят методы изготовления, использующие

¹⁰ В случае полимерного геля итоговая объемная усадка может составлять 95 % [65].

окисление металлического алюминия газобразным кислородом (Al + O₂ → Al₂O₃), такие, как направленное окисление металла (directed metal oxidation) и реакционное связывание (reaction bonding) [65]. Метод направленного окисления металла был разработан компанией *Lanxide Corp.*¹¹ для получения пористых и плотных материалов, в том числе композитов. Суть процесса сводится к окислению расплава металла (алюминиевого сплава) газом (кислородом воздуха). Если алюминиевый сплав содержит несколько процентов Mg, то в ходе окисления при 900–1350 °C на поверхности расплава не образуется защитная пленка оксида. Продукт представляет собой кермет из Al₂O₃ (непрерывная фаза) и Al (непрореагировавший остаток, обычно 5–30 об. %). Композиты более сложного состава с матрицей Al₂O₃–Al могут быть получены путем дополнительного введения в заготовку частиц или волокон наполнителя (например, SiC). Как следует из механизма процесса, он, вообще говоря, не относится к керамическим технологиям.

Реакционно-связанный Al₂O₃ получают окислением порошковых смесей, содержащих значительное количество алюминия (30–65 об. %). Смесь Al (размер частиц ~20 мкм), α-Al₂O₃ (0,5–1 мкм) и ZrO₂ (~0,5 мкм) после помола компактируют в заготовку пористостью 30–40 %. Термообработка в окислительной атмосфере (обычно воздух) ниже 900 °C приводит к превращению Al в нанокристаллический γ-Al₂O₃, который претерпевает фазовый переход в α-Al₂O₃ при нагреве примерно до 1100 °C. Увеличение объема¹² на 28 % при переходе Al → α-Al₂O₃ частично компенсирует усадку при спекании, так что в итоге может быть получена плотная керамика состава Al₂O₃–ZrO₂ (например, ZTA с 20 об. % ZrO₂).

Азотированием нанопорошков TiO₂–Al₂O₃, синтезированных методом соосаждения из раствора, получены композиты из наночастиц TiN (~60 нм) в матрице Al₂O₃ [70]. Ряд продуктов может быть получен реакционным спеканием с использованием химических реакций твердое – твердое.

¹¹ *Lanxide Corp.* перестала существовать в 1999 г., обанкротившись.

¹² В расчете на 1 моль исходного Al при 25 °C.

Так, кермет $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Ni}$ относительной плотностью 96–98 % был получен реакционным спеканием при 1600–1700 °С смеси порошков алюминия и оксида никеля: $2\text{Al} + 3\text{NiO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ni}$ [65].

Подобные композиты из наночастиц металлов в оксидной матрице имеют структуру, инверсную относительно широко известного случая дисперсионного упрочнения металлов наночастицами оксидов. В статье [71] композиты с 0–20 об. % Ni в матрице Al_2O_3 были получены горячим прессованием при 1450 °С порошковых смесей $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Ni}$, в которых металлический никель был синтезирован путем восстановления NiO газообразным водородом при 700 °С, а порошок NiO, в свою очередь, был получен отжигом на воздухе спиртового раствора нитрата никеля. При объемной доле никеля в композите 5 % материал имел максимальный σ_f (трехточечный изгиб) около 1100 МПа, тогда как у спеченного Al_2O_3 без никеля было измерено $\sigma_f = 700$ МПа. У композита с 5 об. % Ni средний размер включений Ni составил около 100 нм, а зерен корундовой матрицы — 0,64 мкм. Примечательно, что при этом трещиностойкость в отличие от прочности не увеличилась. Для нанострук-

турированных композитов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--W}$ и $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Mo}$, полученных японскими авторами, наблюдалось также значительное увеличение только прочности (с вольфрамом) либо и прочности, и трещиностойкости (с молибденом).

Из представленных примеров видно, что новые перспективные керамические материалы могут быть получены (освоены в производстве) с использованием самых разнообразных химических реакций. Композиты с керамической матрицей, в том числе алюмооксидной, армированные коммерчески доступными волокнами и усами (SiC , Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$), их технологии изготовления и свойства рассмотрены в монографии [46]. Некоторые новые композиционные материалы на основе Al_2O_3 по результатам исследовательских работ (например, Al_2O_3 , армированный углеродными нанотрубками) рассмотрены в обзоре [72] в связи с вопросами разработки бронекерамики.

(Продолжение следует)

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

Библиографический список

29. **Абызов, А. М.** Оксид алюминия и алюмооксидная керамика (Обзор). Часть 1. Свойства Al_2O_3 , промышленное производство дисперсного Al_2O_3 / А. М. Абызов // Новые огнеупоры. — 2019. — № 1. — С. 16–23.
30. **Hussey, R. H.** Advanced technical ceramics directory and databook / R. H. Hussey, J. Wilson. — L. : Chapman and Hall, 1998. — 506 p.
31. CoorsTec. Advanced alumina / [Электронный ресурс]. Режим доступа : http://www.coolstek.com/resource-library/library/8510-1023_alumina.pdf.
32. Morgan Technical Ceramics. Alumina Ceramics (Al_2O_3) / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.morgantechnicalceramics.com/en-gb/materials/alumina/>.
33. MatWeb / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.matweb.com/>.
34. CeramTec. Ceramic materials / [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://www.ceramtec.com/files/ma_materials_data_en_de.pdf.
35. CeramTec. ZTA alumina zirconia platelet composite // [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://www.ceramtec.it/files/ma_zta-alumina-zirconia-platelet-composite.pdf.
36. **Kuntz, M.** The effect of microstructure and chromia content on the properties of zirconia toughened alumina / M. Kuntz, R. Krüger // Ceram. Int. — 2018. — Vol. 44. — P. 2011–2020.
37. Kyocera. Characteristics of Kyocera fine ceramics / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://global.kyocera.com/prdct/fc/product/pdf/material.pdf>.
38. Kyocera. Single crystal sapphire // [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://global.kyocera.com/prdct/fc/product/pdf/s_c_sapphire.pdf.

39. Dynamic Ceramic. Material Properties / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.dynacer.com/data-sheets/alumina>.
40. Superior Technical ceramics. Materials property chart // [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.ceramics.net/sites/default/files/files/STCPropertyChart-LetterSize-Printable-Color-FA.pdf>.
41. Superior Technical Ceramics. High purity alumina ceramics / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.ceramics.net/sites/default/files/purealumina-whitepaper-fa.pdf>.
42. Superior Technical Ceramics. Zirconia-toughened alumina / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.ceramics.net/sites/default/files/zta-whitepaper-fa.pdf>.
43. Ortech Advanced Ceramics. Alumina oxide ceramics Al_2O_3 / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.ortechceramics.com/creamic-materials/alumina-ceramics/>.
44. Materion. Durox alumina ceramics // [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://materion.com/products/technical-ceramics/durox-alumina-ceramic>.
45. 3M™ Nextel™ ceramic fibers and textiles. Technical reference guide / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://multimedia.3m.com/mws/media/13270550/3m-nextel-technical-reference-guide.pdf>.
46. Handbook of Ceramic Composites ; ed. by N. P. Bansal. — Boston, Dordrecht, London : Kluwer Academic Publishers, 2005. — 558 p.
47. **Афанасов, И. М.** Высокотемпературные керамические волокна / И. М. Афанасов, Б. И. Лазорек. — М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2010. — 51 с. http://nano.msu.ru/files/master/1/materials/ht_ceramic_fibers.pdf.
48. **Лукин, Е. С.** Новые керамические материалы на основе оксида алюминия / Е. С. Лукин, Н. А. Макаров,

И. В. Додонова [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2001. — № 7. — С. 2–10.

Lukin, E. S. New ceramic materials based on aluminium oxide / E. S. Lukin, N. A. Makarov, I. V. Dodonova [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2001. — Vol. 42, № 7/8. — P. 261–268. DOI: 10.1023/A:1012758727396].

49. **Dobrovinskaya, E. R.** Sapphire: material, manufacturing, applications / E. R. Dobrovinskaya, L. A. Lytvynov, V. Pishchik. — Boston : Springer, 2009. — 480 p.

50. **Лукин, Е. С.** Современная оксидная керамика и области ее применения / Е. С. Лукин, Н. А. Макаров, А. И. Козлов [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. — 2007. — № 1. — С. 3–13. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11909922>.

51. NTK Cutting Tools. General catalog. Vol. 4 / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.ntk-cuttingtools.com/en/products/ceramics/overview-ceramic>.

52. Ceramic cutting tools. Materials, development, and performance ; ed. by E. D. Whitney. — Park Ridge : Noyes Publications, 1994. — 357 p.

53. **Гаршин, А. П.** Керамика для машиностроения / А. П. Гаршин, В. М. Гропянов, Г. П. Зайцев, С. С. Семёнов. — М. : Научтехлитиздат, 2003. — 384 с.

54. Sandvik Coromant. Ceramics for smart and productive machining of super alloys / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/downloads>.

55. CeramTec. Oxide Ceramics for Machining Applications / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://www.ceramtec.com/spk-cutting-materials/oxide-ceramics/>.

56. Greenleaf. Metalcutting tools and systems. Inserts — ceramic / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.greenleafcorporation.com/Greenleaf-Imperial.pdf>.

57. **Wang, J.** Zirconia-toughened alumina (ZTA) ceramics / J. Wang, R. Stevens // J. Mater. Sci. — 1989. — Vol. 24, № 10. — P. 3421–3440.

58. **Bhaduri, S.** Auto ignition synthesis and consolidation of Al_2O_3 - ZrO_2 nano/nano composite powders / S. Bhaduri, S. B. Bhaduri, E. Zhou // J. Mater. Res. — 1998. — Vol. 13, № 1. — P. 156–165.

59. **Галахов, А. В.** Структура порошкового компакта. Часть 1. Неоднородность упаковки частиц / А. В. Галахов // Новые огнеупоры. — 2014. — № 5. — С. 22–32.

Galakhov, A. V. Powder compact structure. Part 1. Particle packing inhomogeneity / A. V. Galakhov // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 3. — P. 199–208.

60. **Галахов, А. В.** Структура порошкового компакта. Часть 2. Методы повышения однородности упаковки частиц / А. В. Галахов // Новые огнеупоры. — 2014. — № 6. — С. 34–45.

Galakhov, A. V. Powder compact structure. Part 2. Methods for increasing particle packing uniformity / A. V. Galakhov // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 3. — P. 209–219.

61. Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS. Materials Synthesis and Development Group // [Электронный ресурс]. Режим доступа : https://www.ikts.fraunhofer.de/en/departments/structural_ceramics/oxide_ceramics/materials_synthesis_development.html.

62. **Chinelatto, A. S. A.** Mechanisms of microstructure control in conventional sintering / A. S. A. Chinelatto, E. M. de Jesus Agnolon Pallone, A. M. de Souza [et al.] // Sintering of Ceramics — New Emerging Techniques ; ed. by A. Lakshmanan. — Rijeka : In Tech, 2012. — Ch. 18. — P. 401–422.

63. AluChem. Product Data Sheets / [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://aluchem.com/data-sheets/>.

64. **Полубояров, В. А.** Получение ультрамикрорегерогенных частиц путем механической обработки / В. А. Полубояров, З. А. Коротаева, О. В. Андрюшкова // Неорганические материалы. — 2001. — Т. 37, № 5. — С. 592–595.

65. **Rahaman, M. N.** Ceramic Processing and Sintering / M. N. Rahman ; 2nd ed. — Boca Raton : CRC Press, 2003. — 875 p.

66. Thanakorn Inter Supply Co. Abrasive Raw Materials / [Электронный ресурс]. Режим доступа : www.thanakorn.co.th.

67. **Кремень, З. И.** Технология шлифования в машиностроении / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин. — СПб. : Политехника, 2007. — С. 12.

68. Composite Materials Handbook. — Vol. 5. Ceramic matrix composites / US Department of Defence ; MIL-HDBK-17-5. — 2002. — P. 56–61.

69. **Хабас, Т. А.** Нанопорошки металлов в технологии керамики / Т. А. Хабас. — Томск : Томский политех. ун-т, 2009. — 230 с.

70. **Guo, J.-K.** Advanced ceramic materials / J.-K. Guo, J. Li, H.-M. Kou // Modern Inorganic Synthetic Chemistry ; ed. by R. Xu, Y. Xu ; 2nd ed. — Amsterdam : Elsevier, 2017. — Ch. 17. — P. 463–492.

71. **Sekino, T.** Reduction and sintering of a nickel-dispersed-alumina composite and its properties / T. Sekino, T. Nakajima, S. Ueda, K. Niihara // J. Am. Ceram. Soc. — 1997. — Vol. 80, № 5. — P. 1139–1148.

72. **Гаршин, А. П.** Ударопрочные материалы на основе технической керамики: достижения и перспективы повышения баллистической эффективности / А. П. Гаршин, В. И. Кулик, А. С. Нилов // Новые огнеупоры. — 2016. — № 4. — С. 53–67.

Garshin, A. P. Shock-resistant materials based on commercial grade ceramic: achievements and prospects for improving their ballistic efficiency / A. P. Garshin, V. I. Kulik, A. S. Nilov // Refract. Ind. Ceram. — 2016. — Vol. 57, № 2. — P. 207–219. ■

Получено 22.06.18
© А. М. Абызов, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

EUROMAT 2019

EUROPEAN CONGRESS AND EXHIBITION
ON ADVANCED MATERIALS AND PROCESSES

[HTTP://EUROMAT2019.FEMS.EU/](http://EUROMAT2019.FEMS.EU/)
1–5 сентября 2019 г.
Стокгольм, Швеция

FEMS
FEDERATION OF EUROPEAN
MATERIALS SOCIETIES

30
1987–2017
www.fems.org