

Д. т. н. **Е. И. Суздальцев** (✉)

ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск Калужской обл., Россия

УДК 666.266.6

КЕРАМИЧЕСКИЕ РАДИОПРОЗРАЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

Рассмотрены физико-технические свойства и технологические особенности получения ряда радиопрозрачных керамических материалов в привязке к тактико-техническим характеристикам современного ракетного вооружения. Убедительно показано, что каким-либо одним материалом невозможно удовлетворить весь комплекс требований к обтекателю в различных условиях эксплуатации. Сделана попытка обозначить уровни показателей свойств материала, совокупность материаловедческих, технологических и конструкторских задач, решение которых позволит существенным образом привести к улучшению тактико-технических характеристик различных ракетных комплексов.

Ключевые слова: радиопрозрачные материалы, кварцевая керамика, ситаллы, стеклокерамика, обтекатель.

Научно-технический прогресс 19-го и начала 20-го веков коснулся многих сфер деятельности, в том числе и авиации. Созданы новые летательные аппараты, которые были ориентированы на выполнение военных целей: разведки, уничтожения противника. Однако достигнутые скоростные и высотные параметры этих аппаратов позволяли бороться с ними имеющимся стрелковым оружием: винтовками, пулеметами.

В то же время создание более современных летательных аппаратов (увеличение скоростей, высоты полета, маневренности) привело к необходимости разработки более современных средств их уничтожения. Для борьбы в воздухе самолеты оснащаются пушечно-пулеметным вооружением, создаются наземное зенитное вооружение, службы обнаружения приближающихся воздушных целей и своевременного предупреждения об опасности воздушных налетов. Создается стройная система противовоздушной обороны.

Середина прошлого века характеризуется появлением на вооружении ряда стран реактивной авиации. Достигнутые уже в то время уровни скоростных параметров самолетов (800–900 км/ч), с одной стороны, существенно ограничили возможности их поражения традиционным наземным зенитным вооружением, а с другой стороны, реакции пилота стало явно недостаточно для ведения воздушного боя пушечно-пулеметными средствами.

Таким образом, прогресс в области авиационной техники настоятельно потребовал создания эффективных средств их своевременного обнару-

жения и поражения. Для этих целей создаются ракеты различного назначения: воздух – воздух, базирующиеся на борту самолета и обеспечивающие поражение целей в условиях полета; воздух – поверхность, базирующиеся также на борту самолета и предназначенные для поражения наземных и надводных целей; поверхность – воздух, базирующиеся в транспортно-пусковых контейнерах, а также на открытых подвижных или стационарных платформах и предназначенные для поражения самолетов и ракет на дальних подступах к объекту нападения. Параллельно с созданием ракет осуществляются разработки в области систем их точного наведения на цель в условиях всепогодности применения и места старта.

Один из важных элементов современных ракет, управляемых методом радиолокационного наведения, — антенный обтекатель. Головной антенный обтекатель не только защищает антенный блок от воздействия климатических и аэродинамических факторов, но и фактически определяет тактико-технические характеристики ракеты (ГТХ), формируя ее аэродинамическое качество, определяя точность наведения на цель, воспринимая на себя основные тепловые и силовые нагрузки при маневрах. С развитием скоростей и маневренности ракет требования к обтекателям и материалам обтекателей значительно возросли. Для ракет различных классов, работающих на скоростях 5–12 М, температура на поверхности обтекателя может достигать 2000 °С, а силовые нагрузки достигать 10 т. Широко используемый для изготовления обтекателей первых ракет стеклопластик уже не удовлетворяет поставленным требованиям из-за недостаточной огнеупорности.

С начала 60-х годов прошлого века в США и СССР были начаты работы по созданию керами-



Е. И. Суздальцев
E-mail: mironova_kv@mail.ru



ческих материалов для обтекателей высокоскоростных ракет. Прорабатывался широкий ассортимент материалов: керамика на основе оксидов кремния, алюминия, магния, бериллия и др., нитридная керамика, а также ситаллы — стеклокристаллические материалы на основе стекла. К настоящему времени доведены до стадии широкого внедрения три вида материалов: ситаллы, высокоглиноземистая и кварцевая керамика. При этом высокоглиноземистые материалы используются для изготовления обтекателей ракет класса воздух – воздух, работающих на скоростях 4–4,5 М. Особенно широко применяется этот материал в США для обтекателей ракет типа «Sparrow» [1]. В России этот класс материалов для изготовления обтекателей не используется по целому ряду причин, изложенных ниже.

Ситаллы (Пирокерам-9606, Пирокерам-9608, АС-418, АС-370 и др.) используются как в США, так и в России для изготовления обтекателей ракет земля – воздух и воздух – воздух, работающих на скоростях 4–7 М. Особенно широкое применение нашел этот материал для изготовления изделий морского и аэродромного базирования. В связи с отсутствием пористости материал отличается хорошей устойчивостью к длительному воздействию морской воды, пыли, повышенной влажности даже без применения лакокрасочных покрытий [1].

Кварцевая керамика нашла широкое применение как у нас в стране, так и за рубежом при изготовлении высокоскоростных ракет различных классов, работающих на скоростях 5–10 М [1–3].

Анализ ТТХ современного авиационного и ракетного вооружения наиболее развитых стран мира [2–5] позволяет заключить, что практически каждая страна обладает самолетами, потенциальными носителями ракетного вооружения, со сравнимыми показателями (табл. 1). Аналогичным образом из данных табл. 2 следует, что и ракетное вооружение различных стран по уровню представленных параметров существенных различий не обнаруживает. В данной ситуации представляется возможным осуществить общий подход к рассмотрению свойств материалов антенных обтекателей радиолокационных ракет различных классов. Некоторые образцы современных ракетных комплексов, оснащенных обтекателями из радиопрозрачных неорганических материалов, представлены на рис. 1.

Для высокоскоростных ракет основным требованием к материалу обтекателя, безусловно, является его *огнеупорность*. В этом смысле высокоглиноземистая керамика имеет явное предпочтение. Температура изменения агрегатного состояния для нее 2050 °С, в то время как для

Таблица 1. Тактико-технические характеристики самолетов, потенциальных носителей ракетного вооружения

Страна	Марка самолета	Назначение самолета	Характеристика самолета					
			максимальная скорость, км/ч, на высоте		дальность действия	длина, м		
			>10 км	≤3 км		разбега	пробега	
Россия	МиГ-23МЛ	Фронтальный истребитель	2500	1350	—	500	750	
	МиГ-29-9Б	» »	2400	1500	680	240	600	
	МиГ-31	Истребитель-перехватчик	3000	1500	2200	1200	800	
	СУ-30	» »	2450	1300	250	550	670	
США	F-111	Многоцелевой ударный самолет	2650	1470	2400	—	—	
	F-16	Многоцелевой истребитель	2140	1470	925	—	—	
	F-22А Локхид	» »	2335	—	1285	—	—	
	Фантом	» »	2300	1460	1270	—	—	
Франция	Мираж 1	Многоцелевой истребитель-бомбардировщик	2350	1470	900	—	—	
	Мираж 2000	Истребитель-бомбардировщик	2330	100	1480	—	—	
	Рафаль	Многоцелевой истребитель	2100	1390	1000	300	400	
Англия	Харриер	—	—	1200	500	—	—	
	Хоук-2000	Штурмовик	—	1020	1200	—	—	
Китай	J-7	Истребитель	2150	—	1300	900	800	
	J-8	»	2330	—	1000	670	1000	
Израиль	КФИРС-7	Многоцелевой истребитель	2440	1370	1185	—	—	
Италия	Фиат Е-91	Ударно-разведывательный истребитель	2025	1130	600	—	—	
Швеция	Вигген	Истребитель-бомбардировщик	2125	1470	≥1000	—	—	
ФРГ +	Гриппсн	Многоцелевой истребитель	2550	1470	—	—	—	
Англия +	Торнадо	Многоцелевой самолет	2300	1480	1900	—	—	
Италия	Ягуар	Истребитель-бомбардировщик	1700	1320	1400	—	—	



Таблица 2. Тактико-технические характеристики ракет, работающих по принципу радиолокационного наведения

Ракеты класса воздух – воздух										
Показатели	Россия			США			Англия	Франция		
	X-15	X-22	X-58	AGM-129 A	Шрайк	Харм	Аларм	Армат		
Скорость полета, м/с	1800	100	1300	250	1000	820	800	830		
Дальность стрельбы, км	≤300	≤550	≤120	≤300	≤50	≤80	≤70	≤150		
Тип носителя	Ту-95МС, Ту-22МЗ, Ту-160, Су-27К, Су-27ИВ	Ту-22К, Ту-95 К-22, Ту-22М2, Ту-22М3	Су-17 МЗ, Су-17 МУ, Су-24, Су-24 М, МиГ-25БМ	В-52, В-1, В-2	F-4, F-105, A-6	ВВС, ВМС	Торнадо	Ягуар, Мираж, Рафаль		
Ракеты класса воздух – поверхность										
Показатели	Россия			США («Сперроу»)				Англия	Франция	Италия
	РВВ-АЕ	Р-27 Р	Р-33 Р	ААМ-N-2	AIM-7Е	AIM-7F	AIM-7M	Скайфлеш	Матра Супер	Асканд-7А
Скорость полета, м/с	1450	1250	1250	700	1000	1120	1120	1450	750	1100
Дальность стрельбы, км	100	≤130	≤80	8,0	25	70	100	50	18	50
Тип носителя	Су-27, МиГ-29	МиГ-29К, МиГ-23МР, Су-27, Су-27К	МиГ-23М, МиГ-23МД	F-4, F-8, F-14	F-8, F-14, F-111	F-4, F-8, F-14, F-111	F-4, F-8, F-14, F-111	Торнадо, F-16	Мираж, F-104, Старфайер	F-104 S
Ракеты класса поверхность – воздух										
Показатели	Россия					США				
	ЗРК С-300В	ЗРК С-300 ПМУ	ЗРК С-300 ПМУ 1	ЗРК БУК	ЗРК ШТИЛЬ	ЗРК Patriot				
Скорость полета, м/с	1700	2100	2400	1230	1230	1600				
Максимальная дальность полета, км	400	90	400	—	—	60				
Диапазон высот поражения целей, м	25–30000	25–25000	10–25000	15–25000	15–25000	60–24000				
Диапазон скоростей поражаемых целей, м/с	≤3000	≤2255	≤6450	≤1200	≤1200	≤1800				
Мобильность	Самоходный	Самоходный	Самоходный	Самоходный	Самоходный	Возимый				

ситаллов 1200–1350 °С, керамических материалов на основе кварцевого стекла не выше 1300 °С. Однако при одностороннем кратковременном

тепловом нагреве, что реально происходит в обтекателях ракет, работоспособность изделия определяется другими факторами.



Рис. 1. Образцы современных ракетных комплексов и ракет, оснащенных обтекателями из радиопрозрачных материалов: а — зенитно-ракетный комплекс (ЗРК) С-300; б — ЗРК БУК; в — пуск ракеты 48Н6Е с кварцевым обтекателем из ЗРК С-300; з — пуск ракеты 9М317 с ситалловым обтекателем из ЗРК БУК

Самым существенным из них для неорганических огнеупорных материалов является термостойкость (сопротивление воздействию термоудара и термочиклическим нагрузкам). Наиболее распространенный экспериментальный критерий этого качества — температурный перепад по толщине стенки, который выдерживает материал без разрушения.

На рис. 2 показана зависимость перепада температур АТ для кварцевой керамики (1), Пирокерма 9606 (2) и высокоглиноземистой керамики (3) от величины $K = ad/2$. Значения K в условных единицах между 10^{-1} и

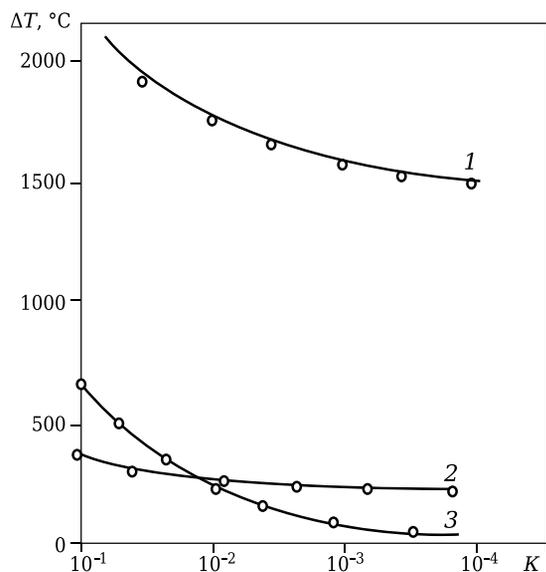


Рис. 2. Устойчивость радиопрозрачных неорганических материалов к термоудару ΔT : 1 — кварцевой керамики; 2 — Пирокерама 9606; 3 — керамики на основе Al_2O_3 ; $K = ad/2$, где d — толщина стенки изделия; a — коэффициент теплопередачи

10^{-4} соответствуют тепловым нагрузкам при входе космических аппаратов в плотные слои атмосферы. Существенное преимущество кварцевой керамики перед другими материалами по этому параметру объясняется прежде всего благоприятным сочетанием ее прочностных, теплофизических и деформационных свойств [6].

Высокую термостойкость кварцевой керамики определяет прежде всего низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), который значительно ниже, чем у других керамических материалов (рис. 3, а).

Кроме того, при нагреве кварцевой керамики и изделий на ее основе происходит релаксация напряжений. Как показано в целом ряде исследований, это явление наблюдается при температурах выше $900^\circ C$, а величину эффекта можно усилить или ослабить за счет изменения природы сырья и структуры материала [7].

Для материала обтекателя важной характеристикой является и *теплопроводность*. При температуре наружной поверхности выше $1000^\circ C$, температура антенного блока не должна превышать $200^\circ C$.

В связи с тем что для данного класса ракет разработка системы принудительного охлаждения антенного блока значительно усложняет конструкцию изделия, решение проблемы осуществляется за счет теплозащитных характеристик материала обтекателя и его конструктивных параметров. Предпочтение отдается материалам с низкой теплопроводностью. Среди неорганических диэлектриков материалы на основе аморфного диоксида кремния имеют самую низкую теплопроводность. На рис. 3, б показана темпе-

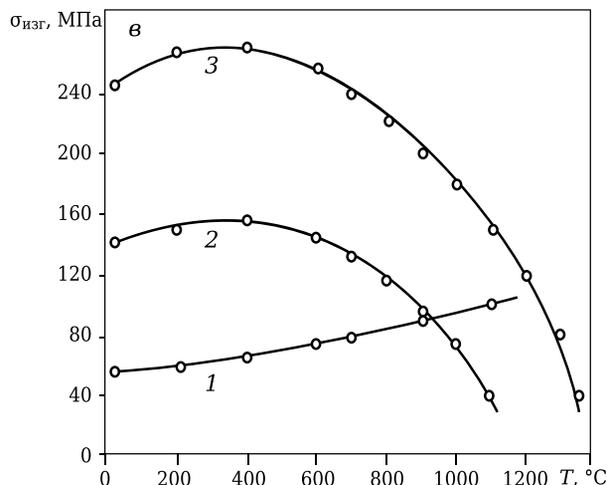
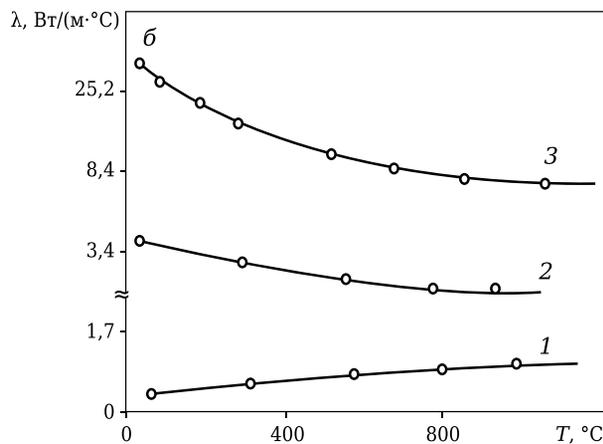
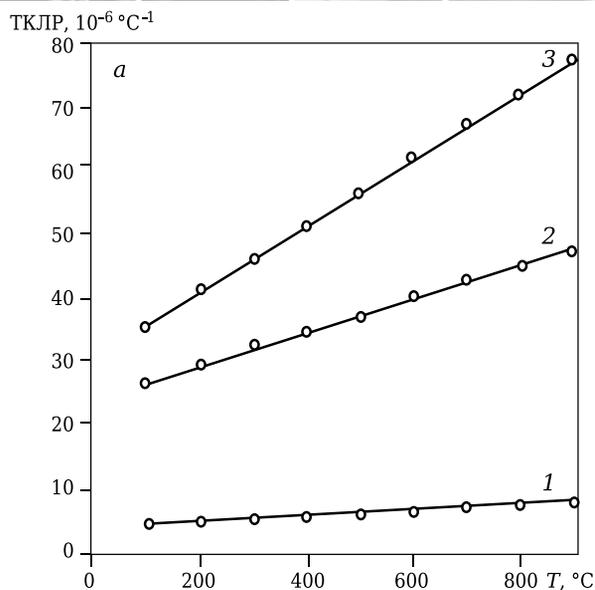


Рис. 3. Температурная зависимость ТКЛР (а), теплопроводности λ (б) и предела прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ (в) неорганических материалов: 1 — кварцевой керамики; 2 — Пирокерама 9606; 3 — керамики на основе Al_2O_3

ратурная зависимость величины теплопроводности для кварцевой керамики пористостью 8–10 %, Пирокерама 9606 и беспористой высокоглиноземистой керамики. Тепловые расчеты обтекателей

полуволновой конструкции для ракет земля – воздух, работающих на скоростях 6–12 М показывают, что только оболочки их кварцевой керамики обеспечивают достаточную теплозащиту [8–10].

Среди рассматриваемых материалов кварцевая керамика имеет самые низкие прочностные и упругие характеристики. Однако при нагревании эти свойства во многом выравниваются (рис. 3, в). Увеличение прочности кварцевой керамики с повышением температуры также объясняется релаксацией напряжений при появлении пластической деформации [11]. При длительном (десять часов) воздействии высоких температур пористая кварцевая керамика начиная с 1100 °С подвергается дополнительному спеканию, затем при температуре выше 1200 °С — кристаллизации.

Однако при одностороннем нагреве конструкционная прочность материала в изделии увеличивается, а температурная область эксплуатации материала повышается до 1700–2000 °С.

Как показали многочисленные исследования в нашей стране и за рубежом, благодаря высокой термостойкости и низкой теплопроводности изделия из кварцевой керамики не теряют свои несущие способности даже при частичной потере толщины оболочки из-за плавления и сублимации материала [12–15]. *Решающим фактором в выборе материала для реального обтекателя является стабильность диэлектрической проницаемости при относительно невысоком значении тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$* (рис. 4) [6].

Изменение ее для кварцевой керамики, ситалла Пирокерам 9606 и высокоглиноземистой керамики составляет для интервала температур 25–500 °С: 1,0, 2,7 и 4,8 % соответственно; для 25–1000 °С: 3,0, 6,2 и 18,0 % соответственно (см. рис. 4).

В интервале температур до 1200 °С изменение ϵ кварцевой керамики не превышает 4 %, и даже в случае доведения материала до расплава кварцевого стекла ($T = 1800 \div 2000$ °С) ϵ не превышает 4,1 единицы [16]. Низкая теплопроводность кварцевой керамики в условиях односторонних кратковременных режимов нагрева предохраняет прогрев оболочки на большую глубину, и высокая температура локализуется в поверхностном слое толщиной до 0,5 мм, что существенно не ухудшает работоспособность обтекателя с точки зрения радиотехнических характеристик.

Большое значение с точки зрения обеспечения радиотехнических характеристик имеет также *абсолютная величина диэлектрической проницаемости*. У кварцевой керамики она самая низкая (см. рис. 4, а), и это не только снижает искажения диаграммы направленности антенны и потери СВЧ на переотражение, но и упрощает технологический процесс механической обработки оболочек, так как требования на допуски по толщине стенки более низкие, чем для других ма-

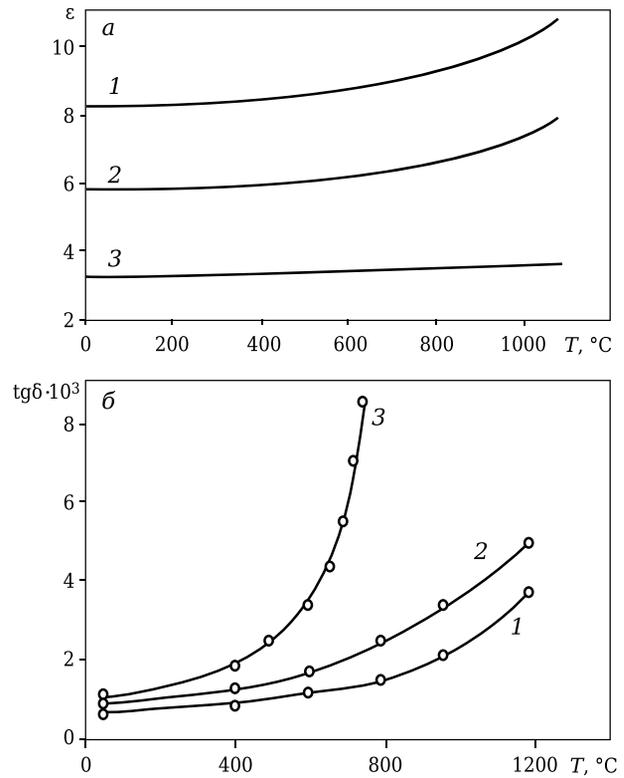


Рис. 4. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ (а) и $\text{tg}\delta$ (б) радиопрозрачных неорганических материалов: 1 — керамики на основе Al_2O_3 ; 2 — Пирокерам 9606; 3 — кварцевой керамики

териалов [1]. Если для обтекателей из кварцевой керамики с $\epsilon = 3,3 \div 3,5$ они составляют 0,1 мм, то для обтекателей из ситаллов с $\epsilon = 6 \div 8$ и алюмооксидной керамики с $\epsilon = 9 \div 10$ они находятся в пределах 0,01 и 0,001 мм соответственно.

По данным ряда работ [17–21], диэлектрическая проницаемость материала обтекателя в рабочем диапазоне температур не должна изменяться более чем на 10 %, а значения $\text{tg}\delta$ не должны превышать 0,01. Однако в реальных условиях эти требования могут быть сформулированы более жестко.

Большим преимуществом кварцевой керамики является ее технологичность. Для организации производства изделий из нее не требуется дорогостоящее оборудование, сырьем служат широко распространенные на земной поверхности кварцевые материалы — жильный кварц и кварцевые концентраты, стекольные пески. Используются также различные отходы производства кварцевого стекла. Если сравнивать формование изделий из высокоглиноземистой керамики, ситалла и кварцевой керамики, то в первом случае формование осуществляется горячим шликерным литьем с введением более 10 % органической связки, которая затем выжигается с выделением вредных веществ; во втором — формование изделий осуществляется из расплава стекла при высоких температурах в условиях горячего производства; изделия из кварцевой керамики легко



формируются методом водного шликерного литья в обычных гипсовых формах. Температура обжига изделий из кварцевой керамики 1240–1270 °С, для ее обжига применяют удобные в эксплуатации электрические печи (вместо высокотемпературных газовых для обжига изделий из Al_2O_3 при 1650 °С). В связи с небольшой твердостью изделия из кварцевой керамики сравнительно просты в механической обработке. При этом необходимо отметить, что благодаря небольшим линейным усадкам при обжиге (до 1,5 % кварцевой керамики против 10 % для высокоглиноземистой керамики), а также удобству формования шликерным литьем перед, например, центробежным формованием ситалловых изделий создаются условия для получения изделий из кварцевой керамики с малыми припусками на механическую обработку. Это существенно упрощает технологию производства изделий, сокращает трудоемкость, расход сырья и материалов. Разработка специалистами

ОНПП «Технология» технологии получения высококонцентрированных литейных шликеров, а также плотных и прочных отливок [7, 8] позволила освоить выпуск крупногабаритных (до 1,5 м) изделий, что пока не удается сделать из других материалов (рис. 5).

Анализ уровня физико-технических свойств и технологических возможностей этих материалов (табл. 3) показывает, что в мировой практике нет какого-либо единого материала или композиции, способных удовлетворять всему комплексу требований к обтекателям. Данное обстоятельство вынуждает ученых и практиков разграничивать области применения материалов в зависимости от условий создания обтекателей конкретных систем.

Так, кварцевая керамика пористостью 8–10 % широко используется в обтекателях ракетных комплексов С-300 различных модификаций (Россия), Patriot (США) и других систем, эксплуата-

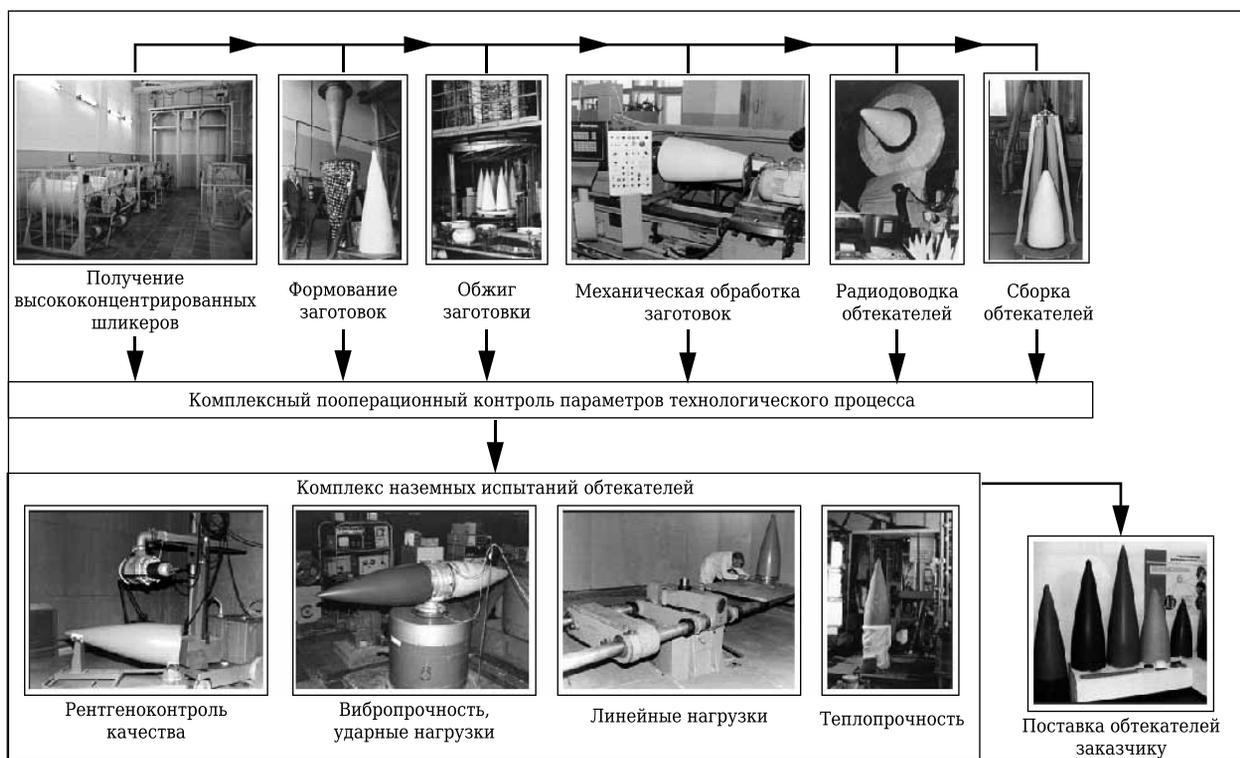


Рис. 5. Принципиальная технологическая схема изготовления обтекателей из кварцевой керамики

Таблица 3. Обобщенные сравнительные характеристики радиопрозрачных, высокотермостойких неорганических материалов

Материал	Основные достоинства	Недостатки
Кварцевая керамика	Высокая термостойкость материала и устойчивость обтекателя к термоудару, стабильность диэлектрических характеристик в широком интервале температур и частот, хорошие термозащитные характеристики, технологичность производства изделий сложного профиля	Низкая механическая прочность, необходимость влагозащиты и герметизации, низкая устойчивость к пылевой и дождевой эрозии
Стеклокристаллические материалы (ситалл, пирокерам)	Отсутствие пористости и высокая стойкость к климатическому воздействию и морской воде	Недостаточная термостойкость и термостабильность диэлектрических свойств
Высокоглиноземистая керамика	Высокая прочность материала и оболочки, устойчивость к дождевой эрозии и воздействию агрессивных сред	Низкая устойчивость к термоудару, высокая температура спекания

ция которых предусматривает использование защитных транспортно-пусковых контейнеров. В то же время вследствие сравнительно низкой механической прочности, возможности поглощать влагу из окружающей среды (рис. 6) и низкой устойчивости к пылевой и дождевой эрозии (рис. 7) применение кварцевой керамики для обтекателей ракет аэродромного и корабельного базирования становится проблематичным [22, 23].

Для данных типов ракет в США широко используются ситаллы и алюмооксидная керамика. В России ракеты аэродромного и корабельного базирования комплектуются преимущественно ситалловыми обтекателями, так как этот класс материалов, имея явные преимущества по целому ряду физико-технических свойств перед алюмооксидной керамикой, является более технологичным по сравнению с ней при изготовлении изделий.

Учитывая ценные свойства кварцевой керамики и ситаллов, делали неоднократные попытки объединить их в единый комплекс и создать материал, обладающий одновременно высокими термостойкостью, диэлектрической проницаемостью и прочностью, низкой пористостью, стабильностью диэлектрических и прочностных характеристик в широком диапазоне температур.

Однако анализ результатов исследований по модификации кварцевой керамики оксидами и соединениями с целью получения тех или иных новых свойств материала показывает, что таким путем удастся решить лишь те или иные локальные задачи, хотя и они являются важными и результаты истребованы промышленностью (рис. 8). Решить задачу в комплексе, работая в этом направлении, не удалось. С одной стороны, в результате кристаллизации кварцевого стекла не

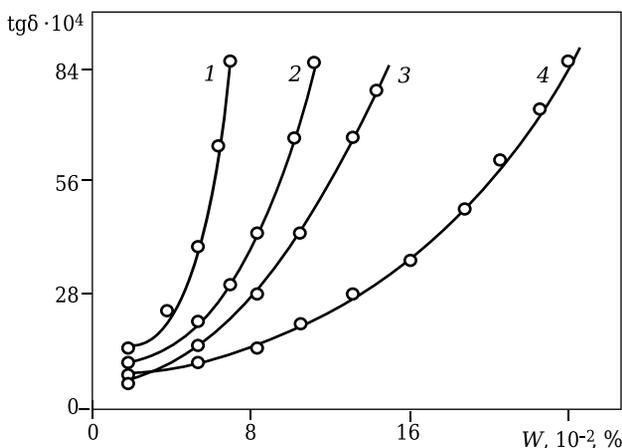


Рис. 6. Зависимость tgδ кварцевой керамики от влагопоглощения W и пористости, %: 1 — 6,8; 2 — 11,5; 3 — 16,3; 4 — 18,7

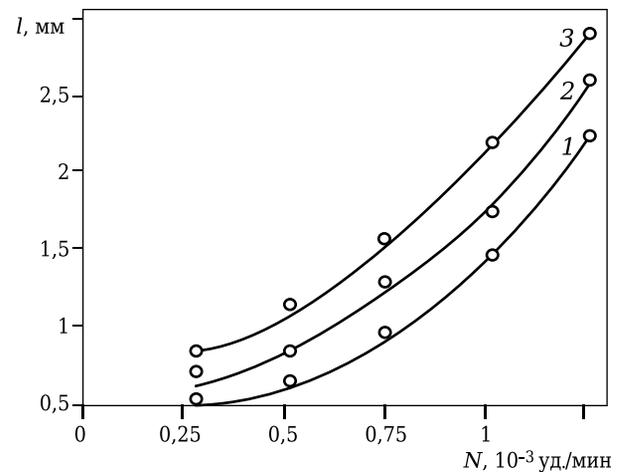


Рис. 7. Зависимость глубины повреждения l кварцевой керамики пористостью 8,5 % от интенсивности капельной нагрузки N при различных скоростях соударения, м/с: 1 — 120; 2 — 150; 3 — 180



Рис. 8. Области применения керамических материалов на основе аморфного диоксида кремния



удаётся спечь материал до нулевой пористости при введении большого количества модифицирующих добавок, а с другой стороны, полученная беспористая кварцевая керамика не может заменить ситалловый обтекатель вследствие сравнительно низких прочности и диэлектрической проницаемости, что вызывает увеличение толщины стенки обтекателя [20] и его массы. Более того, промышленность сориентирована на изготовление средств управления исходя из свойств ситаллов, поэтому простая замена одного материала на другой потребовала бы изменения конструкции ракет и перестройки всей структуры изготовления систем управления ракетой, что чрезвычайно трудно, длительно и дорого. Основные свойства материалов на основе аморфного диоксида кремния пористостью от нуля до 85 % представлены в табл. 4.

Аналогично работам по унификации свойств кварцевой керамики проводились исследования и по улучшению свойств ранее разработанных ситаллов радиотехнического назначения, направленные в первую очередь на повышение их термостойкости, механической прочности и стабилизацию диэлектрических характеристик.

Тщательному анализу подвергнуты причины, препятствующие реализации комплекса ценных свойств ситаллов, а именно: наличие пузырей, раковин, поверхностная и объемная дефектность, структура и фазовый состав, технологические режимы [24–33]. В результате анализа разработаны методы повышения механической прочности, термостойкости и стабилизации диэлектрических характеристик ситаллов.

В работах [34, 35] показано, что технологические приемы при производстве ситаллов (корректировка химического состава исходного стекла, увеличение продолжительности выдержки при температуре кристаллизации материала до 10 раз) позволяют стабилизировать диэлектрические характеристики ситаллов при температурах до 600–700 °С.

Работы, приведенные выше, и целый ряд других работ свидетельствуют о широком поиске путей и средств улучшения свойств ситаллов радиотехнического назначения, однако современных средств кардинального улучшения

свойств ситаллов недостаточно. Во многом это связано с технологией получения ситаллов, при ее осуществлении чрезвычайно трудно, а порой невозможно существенно изменить химический состав исходных стекол.

Во-первых, необходимость обеспечения способности состава ситалла к стеклообразованию и требуемых технологических свойств расплава не позволяет получать ситаллы на основе большей части кристаллических фаз, поэтому требуется введение в состав стекла помимо оксидов, соответствующих составу заданной кристаллической фазы, большой группы дополнительных компонентов, что может препятствовать выделению заданной фазы или резко снижать ее содержание.

Во-вторых, ограниченность верхнего предела температуры варки (~1600 °С) не позволяет синтезировать ситаллы на основе тугоплавких фаз и тем самым получать жаростойкие материалы.

Однако при всех видимых недостатках классическая (стекольная) технология получения ситаллов, включающая подготовку шихты заданного химического состава, варку стекла, формование изделий центробежным литьем, прессование или прокатку, отжиг изделий, кристаллизацию изделий и их механическую обработку, была основной как в бывшем СССР, так и за рубежом при изготовлении антенных обтекателей ракет аэродромного и корабельного базирования.

К настоящему времени синтезированы сотни составов ситаллов, однако промышленностью освоена малая доля из них, а для изготовления антенных обтекателей ракет используются единицы. Наиболее перспективны для антенных обтекателей ситаллы в системе $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ (Пирокерам 9606 (США), АС-370, АС-023 (Украина)) и в системе $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O}$ (Пирокерам 9608 (США), АС-418 (Украина)). Ситаллы первой системы не содержат ионов щелочных металлов, что наделяет их малыми диэлектрическими потерями, однако за счет высокого ТКЛР их термостойкость невелика. Ситаллы второй системы имеют худшие значения тангенса угла диэлектрических потерь, но вследствие низких значений ТКЛР их термостойкость выше. Основные кристаллические фазы ситаллов первой группы: кордиерит $2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$, рутил TiO_2 и

Таблица 4. Основные свойства керамических радиопрозрачных материалов на основе аморфного диоксида кремния*

Показатели	Марка материала						
	ТСМ-109	ТСМ-107	Ннасит	ОТМ-920	ОТМ-921	ОТМ-607	ОТМ-605
Плотность, г/см ³	2,10–2,15	2,15–2,18	1,94–2,05	1,70–1,75	1,26–1,33	0,5–0,6	0,3–0,4
Пористость, %	5–10	<0,5	8–10	21–25	40–43	70–80	82–86
Предел прочности при изгибе, МПа	65	55	45	28	20	9	3
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	1,8	1,5	0,7	0,6	0,4	0,1	0,07
ТКЛР, 10 ⁻⁷ град ⁻¹	≤9,5	≤7,5	≤7,5	≤7,5	≤7,5	≤7,5	≤7,5
Диэлектрическая проницаемость, $f = 1010$ Гц, 20 °С	5,5	3,7	3,5	2,9	2,5	1,5	1,3

* Увеличение в интервале 20–1200 °С $\varepsilon < 3$ %; $\text{tg}\delta < 0,005$.



твердый раствор β -кварца. Основные кристаллические фазы ситаллов второй группы: твердый раствор β -сподумена $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$, рутил TiO_2 и твердый раствор β -эвкриптита $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Основные физико-технические свойства этих ситаллов по данным отечественных и зарубежных источников приведены в табл. 5.

Значения показателей свойств материалов, принадлежащих одной системе, близки, что свидетельствует об исчерпанных возможностях данных систем. По этой причине в последнее время все большее внимание уделяется керамической технологии синтеза стеклокристаллических материалов. Суть ее заключается в гранулировании расплавленной стекломассы водяной струей, измельчении гранул в порошок, последующем формировании заготовок полусухим прессованием или термопластичным литьем под давлением с использованием связующих (парафинового пластификатора, поливинилового спирта или кремнийорганических связующих) с дальнейшим спеканием и кристаллизацией материала [36–46].

Обобщенные данные о возможностях и преимуществах керамической технологии получения ситаллов по сравнению с классической (стекольной) технологией представлены на рис. 9.

Керамическая технология выгодно отличается от классической, так как обеспечивает получение заготовок с минимальной разнотолщиностью, а конфигурация и форма изделия практически не регламентируются. Важная отличительная черта керамической технологии получения ситаллов — существенное сокращение и упрощение режима термообработки. Это объясняется тем, что развитая поверхность тонких стеклопорошков может успешно выполнять функцию катализатора [36, 39]. Возможность получения пористых и высокопористых ситаллов еще одно из преимуществ керамической технологии. В работах [38, 41] показана возможность получения β -сподуменной керамики методом термопластичного литья и последующего спекания при 1000–1250 °С заготовок пористостью от 1 до 40 % с пределом прочности при изгибе до 90 МПа.

Таблица 5. Основные свойства стеклокристаллических материалов, используемых для изготовления антенных обтекателей

Показатели	Значение показателей для материала			
	Пироксрам 9606 (США)	АС-370 (Украина)	Пироксрам 9608 (США)	АС-418 (Украина)
Плотность, г/см ³	2,60	2,6–2,7	2,5	2,5–2,6
Водопоглощение, %	0	≤0,02	0	≤0,02
Предел прочности при изгибе (20 °С), МПа	120–260	170–210	110–130	100–145
Модуль упругости, МПа	12,3	13,2	8,8	9,0
ТКЛР (20–600 °С), 10 ⁻⁷ град ⁻¹	15–57	20–40	4–20	5–22
Теплопроводность (20–600 °С), Вт/(м·°С)	3,0–2,2	3,1–2,1	1,8–2,0	1,8–2,0
Удельная теплоемкость (20–600 °С) кДж/(кг·град)	0,8–1,3	0,9–1,3	1,75–1,2	0,5–1,1
Диэлектрическая проницаемость ($f = 10^{10}$ Гц, 20 °С)	5,7	6,7	6,9	7,5
Тангенс угла диэлектрических потерь ($f = 10^{10}$ Гц, 20 °С)	0,0002	0,0012	–	0,015
Термостойкость ΔT , °С	350	400	550	600

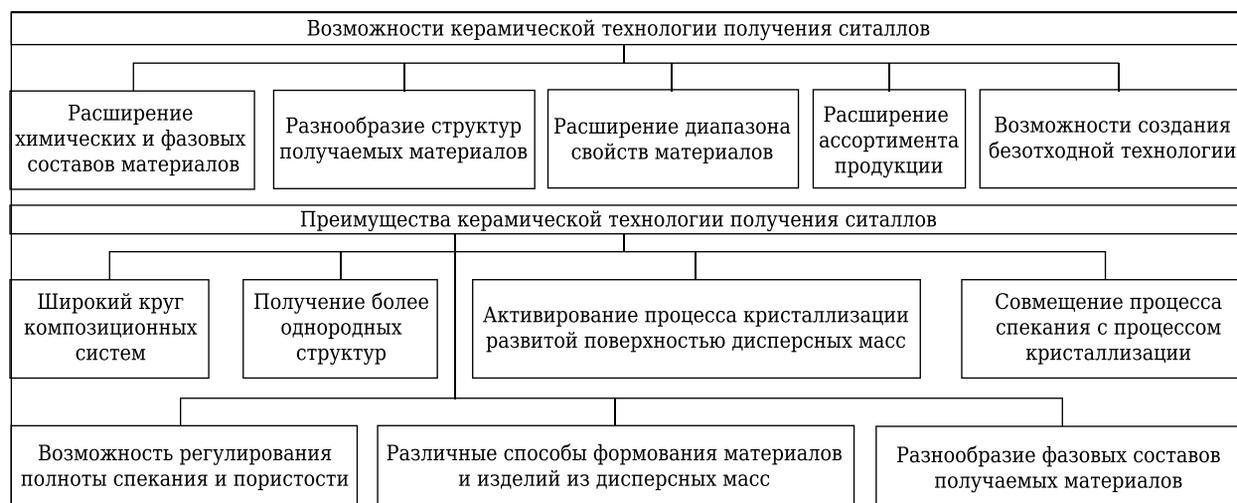


Рис. 9. Возможности и преимущества керамической технологии получения ситаллов по сравнению с классической технологией



Керамическая технология получения стеклокристаллических материалов позволяет совмещать процесс спекания материала и кристаллизацию стекла; использовать различные способы формования из дисперсных масс, включая и водное шликерное литье заготовок [46]; дает возможность утилизировать технологические отходы и незаменима при небольших объемах производства, а также при частой и оперативной смене ассортимента продукции.

Широкие перспективы создания стеклокристаллических материалов с качественно новым уровнем показателей свойств открываются с возможностью использования последних достижений современной технологии: армирования матрицы, золь-гель процессов, реакционного формирования фаз и других методов.

В целом анализ состояния разработок в области синтеза стеклокристаллических материалов свидетельствует об интенсивно развивающихся новых методах, новых направлениях в области технологии ситаллов.

Для развития работ по созданию ситалловых обтекателей для ОНПП «Технология» керамический путь синтеза материалов и технологий наиболее выгоден и технологически оправдан, поскольку предприятие имеет более чем 30-летний опыт создания обтекателей из керамических материалов на основе SiO_2 и Al_2O_3 . Работы по созданию обтекателей ведутся комплексно — от согла-

сования технического задания на обтекатель до его изготовления, включая электродинамический и теплопрочностные расчеты конструкции, разработку необходимого для этих целей материала и технологии, изготовление опытных образцов и их наземную отработку с дальнейшим серийным производством и поставкой продукции заказчику.

В качестве базового варианта при проведении исследований было использовано стекло литий-алюмосиликатного состава, так как ситаллы на его основе имеют удовлетворительные технические характеристики и используются при изготовлении обтекателей для комплектации российской военной техники. В качестве базовой технологии использована технология водного шликерного литья, позволившая получить новый класс стеклокристаллических материалов и высокоплотные крупногабаритные заготовки сложного профиля, что, в свою очередь, при минимальных затратах обеспечивает получение беспористых обтекателей [47–54]. В этой технологии наиболее органично объединены керамическая и стекольная технологии получения стеклокристаллических материалов и изделий, максимально задействован весь комплекс технологического оборудования, используемый для изготовления как кварцевых, так и стеклокристаллических обтекателей, что позволяет изменять производственные мощности при смене номенклатуры изделий (рис. 10). Основные свойства материалов, полученных по кера-

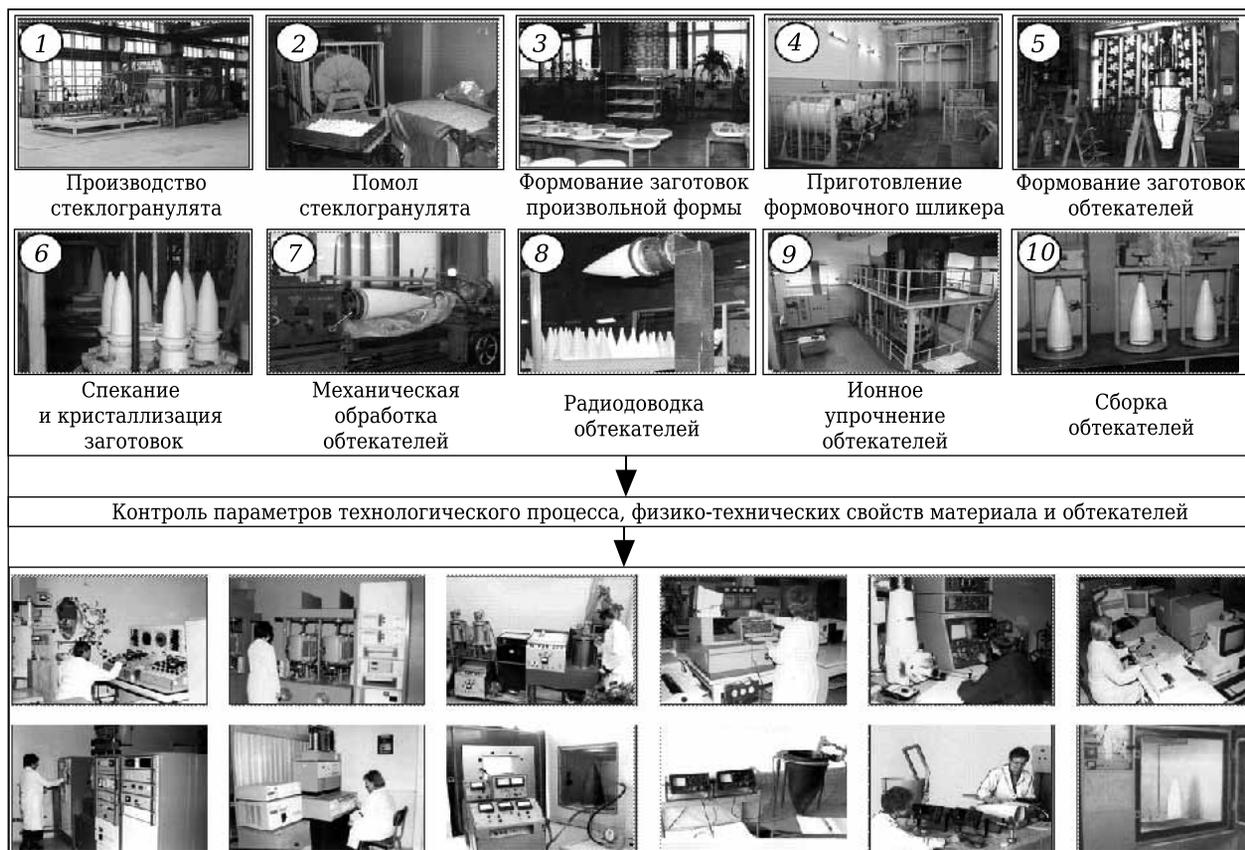


Рис. 10. Технологическая схема изготовления обтекателей из стеклокерамических материалов



мической технологии, представлены в табл. 6, их устойчивость к воздействию эксплуатационных факторов ракет классов воздух – воздух и воздух – поверхность — в табл. 7, устойчивость к воздействию агрессивных сред — в табл. 8–10, результаты высокотемпературного воздействия в табл. 11, 12.

В данной работе не затрагивается вопрос о возможности использования высокотермостойких радиопрозрачных материалов на основе Si_3N_4 для антенных обтекателей. Однако при целом ряде по-

ложительных свойств (сохранение прочности при высоких температурах, сравнительно низкая величина диэлектрической проницаемости, технологическая возможность изготовления обтекателей и др.), что позволит существенно увеличить ТТХ ракет, необходимо как минимум решить три главные задачи: существенно уменьшить величину теплопроводности, обеспечить вакуумную плотность и стабильность радиотехнических характеристик в области рабочих температур объектов.

Таблица 6. Свойства стеклокерамических материалов, полученных по новой технологии

Показатели	Материал						
	ОТМ 357	ОТМ 357-5	ОТМ 357-10	ОТМ 357-15	ОТМ 357-20	ОТМ 357-У	ОТМ 357-О
Плотность, г/см ³	2,5	2,56	2,61	2,67	2,71	2,5	2,5
Пористость, %	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1	≤0,1
Предел прочности, МПа:							
при изгибе (20–1150 °С)	100±10	100±10	100±10	100±10	100±10	≥137	120±10
при сжатии	300±30	300±30	300±30	300±30	300±30	—	—
Модуль упругости, 10 ⁻⁴ МПа	5,4	5,5	5,7	5,7	5,6	6,9	7,3
ТКЛР (20–900 °С), 10 ⁻⁷ град ⁻¹	5–13	7–15	8–16	11–21	13–23	6–17	8–17
Теплопроводность (20–700 °С), Вт/(м·°С)	1,6–1,9	1,7–1,9	1,8–2,0	2,1–2,4	2,2–2,5	1,6–2,3	1,8–2,2
Удельная теплоемкость (20–700 °С), кДж/(кг·°С)	0,9–1,2	0,9–1,2	0,9–1,2	0,9–1,2	0,9–1,2	0,8–1,3	3,80–1,27
Ударная вязкость, кДж/м ²	2,2–2,5	2,1–3,1	2,0–2,5	2,0–2,4	1,9–2,3	≥2,5	2,2–2,3
Диэлектрическая проницаемость ($f = 10^{10}$ Гц, 20 °С)	6,9–7,3	7,8–8,1	8,8–9,5	10,2–10,5	11,5–12,5	6,5–7,5	6,5–7,5
Увеличение диэлектрической проницаемости ($f = 10^{10}$ Гц, 20–700 °С), %	≤4,5	≤4,5	≤4,0	≤4,0	≤3,0	≤6,0	≤3,0
Тангенс угла диэлектрических потерь ($f = 10^{10}$ Гц, 20–700 °С)	0,01–0,06	0,013–0,07	0,012–0,075	0,013–0,07	0,013–0,07	0,01–0,06	0,01–0,05
Термостойкость ΔT , °С	1200	1150	1150	1100	1000	—	—
Трибостойкость, балл	1	1	—	—	—	—	—

Таблица 7. Схема испытания образцов стеклокерамики β -сподуменового состава по условиям воздействия эксплуатационных факторов изделий

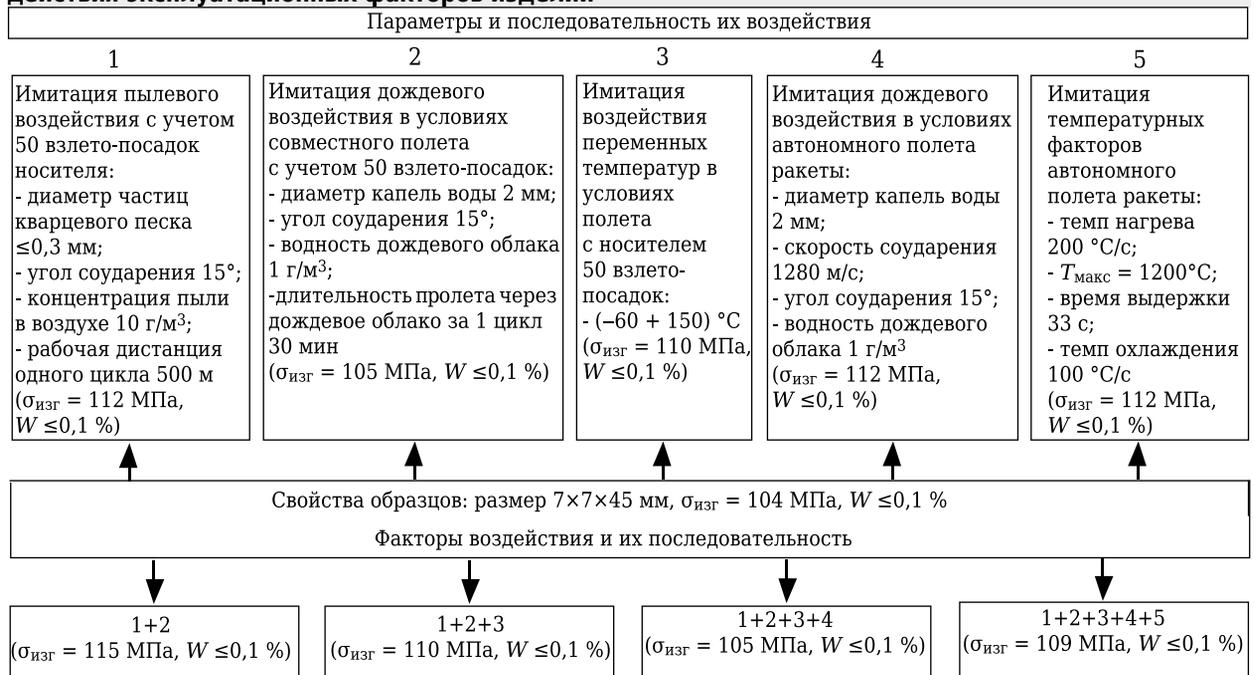


Таблица 8. Влияние химической обработки на прочностные и диэлектрические свойства стеклокерамики^{*1}

Реагент	Концентрация, %	Предел прочности при изгибе ^{*3} , МПа	Диэлектрическая проницаемость ^{*3} при $f = 10^{10}$ Гц	$\text{tg}\delta^{*3}$ при $f = 10^{10}$ Гц, 10^4
HCl	18,5	115 / 120	6,95 / 6,94	105 / 110
H ₂ SO ₄	24,9	115 / 115	6,85 / 6,85	105 / 109
HNO ₃	32,0	115 / 108	6,95 / 6,94	105 / 110
H ₃ PO ₄	16,5	115 / 116	6,90 / 6,89	105 / 110
NaOH+Na ₂ CO ₃ ^{*2}	4,0	115 / 109	7,07 / 7,07	110 / 114
	5,3			
KOH+Na ₂ CO ₃ ^{*2}	5,6	115 / 115	6,93 / 6,92	106 / 105
	5,3			

^{*1} Время кипячения 3 ч.
^{*2} Смесь равных объемов.
^{*3} Числитель — исходная величина, знаменатель — конечная.

Таблица 9. Химическая стойкость стеклокерамики в серной кислоте и гидроксиде натрия по ГОСТ 473.1 и ГОСТ 473.2*

Реагент	Концентрация, %	Химическая стойкость, %	
		кислотостойкость	щелочестойкость
Порошок из исходного стеклогранулята			
H ₂ SO ₄	98	94,23	—
NaOH	35	—	22,41
Порошок из стеклокерамики			
H ₂ SO ₄	98	94,87	—
NaOH	35	—	52,36
Стеклокерамика в виде дисков			
H ₂ SO ₄	98	99,73	—
NaOH	35	—	90,43

* Время кипячения 1 ч.

Таблица 10. Химическая стойкость стеклокерамики в условиях длительного воздействия агрессивных сред

Агрессивная среда	Концентрация, %	Время воздействия, ч	Потеря массы, %	Химическая стойкость, %
HCl	18,5	2650	0,03	99,97
H ₂ SO ₄	24,9	2650	0,02	99,98
H ₃ PO ₄	16,5	2650	0,02	99,98
Керосин	—	2650	0,01	99,99
Морская вода	—	5800	0,0	100

Таблица 11. Свойства стеклокерамики при температурном «старении» в течение 360 с в условиях одностороннего нагрева со скоростью 100 °С/с (охлаждение инерционное)

Показатели	Исходное значение	Показатели свойств при температуре «старения», °С						
		450	650	850	1000	1050	1100	1200
Плотность, г/см ³	2,49	2,50	2,49	2,49	2,50	2,48	2,49	2,50
Водопоглощение, %	0,04	0,05	0,03	0,04	0,02	0,01	0,02	0,03
Предел прочности при изгибе, МПа	117	118	122	124	120	121	119	123
Диэлектрическая проницаемость	7,24	7,27	7,27	7,25	7,21	7,24	7,23	7,22

Исходя из тенденции развития авиационной и ракетной техники на ближайшую перспективу, требования к материалам радиопрозрачных обтекателей, безусловно, возрастут и в комплексе достигнут величин, представленных ниже (в диапазоне рабочих температур):

Диапазон рабочих температур, °С..... -60+1500
 Длительность воздействия, мин, рабочих температур, °С:
 300..... 20,0
 1500..... 5,0
 Предел прочности при изгибе, МПа..... ≥150
 ТКЛР, 10⁻⁷ град⁻¹..... ≤20,0
 Теплопроводность, Вт/(м·°С)..... ≤3,0
 Изменение ϵ , %..... ≤5,0
 $\text{tg}\delta$ ≤0,01
 Водопоглощение, %..... ≤0,1

Органичное соединение свойств целого ряда радиопрозрачных материалов в комплексе будет удовлетворять современным требованиям.

Безусловно, понятно, что реализацию все возрастающих требований к ТТХ конкретных ракетных систем чрезвычайно трудно обеспечить лишь физико-техническими свойствами конкретных материалов. В этом плане существенную помощь следует ожидать от реализации новых конструктивных решений обтекателя, вплоть до согласованных действий с разработчиком систем управления ракетой. Таким образом, в перспективе успешная реализация новых и более трудных задач в области создания радиопрозрачных обтекателей зависит от тесного взаимодействия трех составляющих: технологии, материала и конструкции обтекателя. При этом каждый элемент этой триады способен вносить



свой немалый вклад в решение конечной цели.

В частности, в технологическом аспекте чрезвычайно мало внимания уделялось использованию элементов нанотехнологий, армированию матриц, СВЧ-спеканию и др.

В материаловедческом аспекте следовало бы больше внимания уделить созданию слоистых материалов, материалов с теплоотражающими, вакуум-плотными, эрозионно-стойкими и ударопрочными покрытиями.

В плане конструкции обтекателя наряду с разработкой новых сплавов для переходных отсеков целесообразно рассмотреть возможности исполь-

зования для этих целей композиционных материалов с нулевым ТКЛР или другие конструктивные решения, исключающие воздействие шпангоута на обтекатель, а также теплозащиту самого антенного блока.

Дальнейшая проработка элементов этой триады в плане вышеперечисленных аспектов способна существенным образом улучшить как качественные, так и экономические показатели кварцевой керамики и стеклокерамики, используемых в настоящее время для обтекателей ракет. Они же способны решить многие проблемы и в плане проработки использования для обтекателей других материалов.

Библиографический список

1. Павлов, В. В. Материалы антенных обтекателей / В. В. Павлов. — М. : ОНТИ, ВИАМ, 1966. — 117 с.
2. Бычко, В. Ф. Сравнительные ТТХ российских ЗРК и ЗРК «Patriot» / В. Ф. Бычко, В. И. Никитин // Бюллетень иностранной научной и технической информации (БИНТИ) «Естественные науки, техника». Серия 1. — 1993. — № 14 (2624). — С. 25.
3. Соколов, Д. Противовоздушная слабость Америки / Д. Соколов, И. Петров // Коммерсант. — 1997. — № 2. — С. 27–34.
4. Морозов, В. П. Энциклопедия современной военной авиации / В. П. Морозов, В. А. Обухович, С. И. Сидоренко [и др.]. — Минск : Харвей, М. : АСТ, 2001. — 720 с.
5. Широкопад, А. Б. Энциклопедия отечественного ракетного вооружения / А. Б. Широкопад. — М. : АСТ, Минск : Харвей, 2003. — 544 с.
6. Шнейдерман, Я. А. Новые материалы для антенных обтекателей сверхзвуковых самолетов и ракет / Я. А. Шнейдерман // Зарубежная радиоэлектроника. — 1971. — № 2. — С. 79–113.
7. Пивинский, Ю. Е. Кварцевая керамика / Ю. Е. Пивинский, А. Г. Ромашин. — М. : Металлургия, 1974. — 264 с.
8. Ромашин, А. Г. Научные и практические аспекты изготовления крупногабаритных, сложнопрофильных изделий из кварцевой керамики / А. Г. Ромашин, Е. И. Суздальцев, М. Ю. Русин // Новые огнеупоры. — 2004. — № 9. — С. 34–40 ; Там же. — № 11. — С. 20–27.
9. Бородай, Ф. Я. Перспективы разработки и применения керамических материалов на основе кварцевого стекла / Ф. Я. Бородай // Жаропрочные неорганические материалы. — М. : ОНТИ, НИТС, 1977. — Вып. 4. — С. 63–75.
10. Суздальцев, Е. И. Свойства кварцевой керамики / Е. И. Суздальцев // Неорганические материалы. — 1984. — Т. 20, № 2. — С. 335.
11. Подобеда, Л. Г. Высокотемпературная конструкционная радиопрозрачная керамика / Л. Г. Подобеда, А. Г. Ромашин, Ф. Я. Бородай // Жаропрочные неорганические материалы. — М. : ОНТИ, НИТС, 1974. — Вып. 3. — С. 189–199.
12. Суздальцев, Е. И. Жаростойкие материалы на основе кварцевой керамики с повышенной эрозионной стойкостью / Е. И. Суздальцев, С. М. Бреховских, В. С. Цыганенко // Авиационная промышленность. — 1981. — № 7. — С. 63, 64.
13. Фролов, Г. А. Характерные температуры изменения состояний кварцевой керамики при одностороннем нагреве / Г. А. Фролов, А. А. Король, В. В. Пасичный [и др.] // Инженерно-физический журнал. — 1986. — Т. 5L, № 6. — С. 932–939.
14. Фролов, Г. А. Измерение температурных полей в образцах стеклокерамики при уносе массы с поверхности / Г. А. Фролов, В. В. Пасичный, Е. И. Суздальцев [и др.] // Инженерно-физический журнал. — 1989. — Т. 57, № 2. — С. 313–318.
15. Пеньков, И. И. Влияние рецептурных добавок на эрозионную стойкость кварцевой керамики / И. И. Пеньков, М. Ю. Русин, Е. И. Суздальцев // Авиационная промышленность. — 1984. — № 7. — С. 52, 53.
16. Суздальцев, Е. И. Закономерности изменения диэлектрических свойств кварцевой керамики / Е. И. Суздальцев, М. Ю. Русин // Авиационная промышленность. — 1984. — № 9. — С. 54–56.
17. Каплун, В. А. Обтекатели антенн СВЧ / В. А. Каплун. — М. : Советское радио, 1974. — 238 с.
18. Шнейдерман, Я. А. Материалы для антенных обтекателей сверхзвуковых самолетов и ракет / Я. А. Шнейдерман // Зарубежная радиоэлектроника. — 1966. — № 9. — С. 94–120.
19. Пригода, Б. А. Обтекатели антенн летательных аппаратов / Б. А. Пригода, В. С. Кокунько. — М. : Машиностроение, 1970. — 287 с.
20. Бересневич, Л. А. Получение на основе матрицы кварцевого стекла керамики с повышенной диэлектрической проницаемостью и исследование ее свойств : дис. ... канд. техн. наук / Бересневич Л. А. — М., 1975. — 189 с.
21. Демьянов, В. В. Зависимость РТХ обтекателей от величины ϵ и $\tan \delta$ материала полуволновой стенки / В. В. Демьянов, Е. Б. Бриг // Тезисы 3-й Всесоюзной конференции по обтекателям и антенным укрытиям, Харьков. — 1978. — С. 75, 76.
22. Суздальцев, Е. И. Влияние технологических факторов на эрозионную стойкость кварцевой керамики / Е. И. Суздальцев, Ю. П. Семизоров // Авиационная промышленность. — 1978. — № 6. — С. 75, 76.
23. Соломин, Н. В. Диэлектрические свойства кварцевой керамики / Н. В. Соломин, Ф. Я. Бородай, Н. Ю. Комиссарова // Электронная техника. — 1968. — Вып. 3, серия 14. — С. 25–31.
24. Журьяри, З. Л. Особенности получения кордиеритовых ситаллов, пригодных для упрочнения / З. Л. Журьяри, Т. А. Рожкова, В. М. Чебан [и др.] // Стекло и керамика. — 1991. — № 9. — С. 11, 12.
25. Дубовик, В. Н. Дефектность кордиеритовых ситаллов / В. Н. Дубовик, О. А. Непомнящий // Катализи-



рованная кристаллизация стекла : сб. науч. тр. — М. : МПСМ СССР, 1986. — С. 98–102.

26. **Райхель, А. М.** Изменение поверхностной и объемной дефектности сподуменовых ситаллов при повторной термобработке / *А. М. Райхель, Л. Г. Ивченко* // Катализируемая кристаллизация стекла : Сб. науч. тр. — М. : МПСМ СССР, 1986. — С. 102–105.

27. **Райхель, А. М.** Влияние пузырей и раковин на прочность ситаллов / *А. М. Райхель, В. Н. Лихтенштейн, О. А. Непомнящий* [и др.] // Проблемы прочности. — 1980. — № 2. — С. 104–106.

28. **Дубовик, В. Н.** Исследование термостойкости ситаллов / *В. Н. Дубовик, А. М. Райхель, В. Н. Павлова, Л. Г. Ивченко* // Проблемы прочности. — 1981. — № 11. — С. 60–65.

29. **Дубовик, В. Н.** Контактная прочность ситаллов при ударе / *В. Н. Дубовик, А. М. Райхель, В. Г. Шведун* [и др.] // Проблемы прочности. — 1981. — № 9. — С. 84–86.

30. **Дубовик, В. Н.** Комбинированное упрочнение поврежденного сподуменного ситалла / *В. Н. Дубовик, А. М. Райхель* // Проблемы прочности. — 1988. — № 12. — С. 67–70.

31. **Гомон, В. М.** Упрочнение ситаллов / *В. М. Гомон, В. Н. Дубовик, А. М. Райхель* [и др.] // Стекло и керамика. — 1991. — № 9. — С. 9–11.

32. **Гомон, В. М.** Разработка методов и технологии упрочнения ситаллов изделий конструкционного назначения / *В. М. Гомон, В. Н. Дубовик, А. М. Райхель* [и др.] // Стекло и керамика. — 1991. — № 9. — С. 13.

33. **Дубовик, В. Н.** Повышение прочности и удельной ударной вязкости ситаллов методом комбинированного упрочнения / *В. Н. Дубовик, А. М. Райхель, О. А. Непомнящий* [и др.] // Стекло и керамика. — 1991. — № 9. — С. 14–16.

34. **Дубовик, Т. В.** Диэлектрические свойства сподуменовых ситаллов / *Т. В. Дубовик* // Доклады 2-й Всесоюз. конф. Обнинск, 1971. — С. 27–35.

35. **Дубовик, В. Н.** Диэлектрические свойства ситаллов при температуре 20–1000 °С на СВЧ / *В. Н. Дубовик, Т. В. Дубовик, В. Я. Сущева* // Катализируемая кристаллизация стекла : сб. науч. тр. — М. : МПСМ СССР, 1986. — С. 75–79.

36. **Филиппович, В. Н.** Поверхностное зарождение кристаллов как катализатор объемной кристаллизации стекла в порошковой технологии ситаллов / *В. Н. Филиппович, А. М. Калинина, Д. Д. Дмитриев* // Катализируемая кристаллизация стекла : сб. науч. тр. — М. : МПСМ СССР, 1986. — С. 29–34.

37. **Бондарева, Л. К.** Кристаллизация и спекание порошков стекла в системе $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ / *Л. К. Бондарева, Н. М. Павлушкин, Г. А. Ступина* [и др.] // Неорганические материалы. — 1986. — Т. 22, № 9. — С. 1487–1492.

38. **Бобкова, Н. М.** Ситаллокерамика и ее свойства / *Н. М. Бобкова, С. Е. Баранцева, О. С. Залыгина* // Стекло и керамика. — 1995. — № 11. — С. 16–18.

39. **Соловьев, В. И.** Роль катализаторов кристаллизации в порошковой технологии ситаллов / *В. И. Соловьев* // Катализируемая кристаллизация стекла : сб. науч. тр. — М. : МПСМ СССР, 1986. — С. 111–113.

40. **Соловьев, В. И.** Плотноспеченные и пористые стеклокристаллические диэлектрики / *В. И. Соловьев,*

А. А. Лешина, И. А. Денисюк [и др.] // Стекло и керамика. — 1992. — № 2. — С. 16–18.

41. **Соловьев, В. И.** Перспективы развития порошковой технологии ситаллов / *В. И. Соловьев, Е. С. Ахлестин, Э. П. Сысоев, А. А. Тряпкин* // Стекло и керамика. — 1992. — № 3. — С. 12–14.

42. **Заявка 56-164070 Япония, МКИ С 04 В 35/16.** Производство теплостойкой керамики с низким расширением. — 1981.

43. **Пат. 4194917 США, МКИ С 04 В 35/18.** Обожженная керамика, характеризующаяся высокой плотностью и низким температурным расширением. — 1980.

44. **Пат. 163916 ВНР, МКИ С 04 В 33/22.** Способ получения термостойких керамических изделий. — 1975.

45. **Заявка 56-109870 Япония, МКИ С 04 В 35/18.** Спеченный материал с низким коэффициентом линейного термического расширения. — 1981.

46. **Пат. 19622522 Германия, МКИ С 03 С 10/12.** Способ изготовления формованных изделий из стеклокерамики. — 1998.

47. **Трехсвятский, С. Б.** Новый стеклокристаллический материал / *С. Б. Трехсвятский, В. Н. Павлов, В. Г. Стратьев* // Новые неорганические материалы. — 1983. — Вып. 1. — С. 181, 182.

48. **Суздальцев Е. И.** Новое направление в области синтеза высокотермостойких, радиопрозрачных стеклокристаллических материалов / *Е. И. Суздальцев* // ИФЖ. — 2001. — Т. 74, № 6. — С. 121–130.

49. **Суздальцев, Е. И.** Исследование процессов получения высокоплотных водных суспензий и формования заготовок из стекла литийалюмосиликатного состава / *Е. И. Суздальцев* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2002. — № 11. — С. 10–23.

50. **Суздальцев, Е. И.** Влияние условий термообработки на формирование структуры и свойств стекла и стеклокерамики литийалюмосиликатного состава / *Е. И. Суздальцев* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2002. — № 4. — С. 16–25.

51. **Суздальцев, Е. И.** Исследование по получению стеклокерамики β -сподуменного состава с регулируемой диэлектрической проницаемостью / *Е. И. Суздальцев* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2002. — № 5. — С. 15–18.

52. **Суздальцев, Е. И.** Синтез высокотермостойких радиопрозрачных стеклокерамических материалов и разработка технологии изготовления на их основе обтекателей летательных аппаратов : дис. ... докт. техн. наук / *Суздальцев Е. И.* — М., 2002. — 430 с.

53. **Суздальцев, Е. И.** Статистический анализ технологического процесса изготовления изделий из стеклокерамики литийалюмосиликатного состава / *Е. И. Суздальцев* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2004. — № 3. — С. 12–18.

54. **Суздальцев, Е. И.** К вопросу устойчивости стеклокерамики литийалюмосиликатного состава к воздействию эксплуатационных факторов летательных аппаратов / *Е. И. Суздальцев, А. С. Хамицаев* // Огнеупоры и техническая керамика. — 2005. — № 10. — С. 16–23. ■

Получено 21.08.14

© Е. И. Суздальцев, 2014 г.