

УДК 629.7:539.4

А.С. ХАМИЦАЕВ

Обнинское научно-производственное предприятие «Технология», Россия

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННОЙ КЕРАМИКИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Исследованы теплофизические характеристики и зависимость свойств конструкционной стеклокерамики для обтекателей радиоантенн высокоскоростных летательных аппаратов от температуры. Показано, что материал ОТМ 357 по термостойкости и стабильности диэлектрических свойств отвечает требованиям к материалам изделий рассматриваемого класса.

стеклокерамические материалы, обтекатели радиоантенн летательных аппаратов, теплофизические характеристики, температура, диэлектрические свойства

В работе [1] нами исследованы прочностные и упругие свойства стеклокерамического материала ОТМ 357, применяемого в конструкциях обтекателей радиоантенн летательных аппаратов (ЛА). Однако для конструкций этого класса не менее важными являются теплофизические характеристики материала и зависимость его свойств от температуры.

Темпы нагрева и охлаждения обтекателей радиоантенн высокоскоростных ЛА на различных участках траектории полета достигают 100 ... 150 °С/с, поэтому для материалов оболочек обтекателей одним из наиболее важных из группы теплофизических свойств является коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР), поскольку он оказывает существенное влияние на целостность изделий при их практическом применении. КЛТР должен быть как можно меньше, чтобы свести к минимуму напряжения, возникающие в изделии из-за неравномерности температурного поля, хотя, с другой стороны, минимизация КЛТР материала оболочки обтекателя влечёт за собой проблемы обеспечения надёжного её соединения с металлическим шпангоутом.

Стеклокерамика литийалюмосиликатного состава по КЛТР может заметно отличаться от исходного стекла в зависимости от температуры термообработки. КЛТР в процессе термообработки исходной заготовки может быть больше или меньше в зависимости от КЛТР образующихся кристаллических фаз. Отмечается и более высокое значение КЛТР ситалла

АС-418 по сравнению с КЛТР стеклокерамики (рис. 1).

Для простоты и удобства широко распространенное испытание на сопротивление тепловому удару сводится к резкому охлаждению образцов, нагретых до заданной температуры в водяной ванне с проточной водой. Принято считать, что устойчивость материала к резкому охлаждению важнее устойчивости к нагреванию, так как в первом случае вероятность разрушения гораздо больше вследствие возникновения в поверхностных слоях материала растягивающих напряжений, являющихся более критичными с точки зрения сохранения целостности образца. Однако данные методы испытания на термостойкость, изложенные в ГОСТ 11103-85 и ГОСТ 473.5-81, формальны по своему подходу вследствие требований к образцу (полировка), что не соответствует реальным условиям изготовления изделий, а критерий оценки термостойкости – появление трещины в образце или другого признака разрушения – чисто субъективный фактор, непригодный для оценки работоспособности конструкций. Более того, реальные условия эксплуатации различных изделий, в том числе антенных обтекателей, предусматривают иную картину, а именно, резкое нагревание и достаточно неинтенсивное охлаждение. Поэтому для оценки работоспособности реальных материалов в обтекателях ЛА целесообразно использовать такой показатель, как деградация прочности в условиях интенсивного нагрева и интенсивного охлаждения.

Исходя из вышеизложенного, можно констатировать, что результаты исследований термостойкости, приведенные в различных источниках, носят ориентировочный характер, относящийся к конкретному методу испытаний.

На наш взгляд, в [2] приводятся наиболее достоверные результаты по термостойкости ситалла АС-418, где авторы определяли деградацию прочности образцов $120 \times 25 \times 10$ мм, которые после равномерного прогрева до заданной температуры с одной из поверхностей подвергались локальному единичному капельному термоудару. Авторы считают, что локальный капельный термоудар с последующим измерением прочности при изгибе с помещением места повреждения образца при испытаниях в зону максимальных растягивающих напряжений, наиболее полно отражает условия эксплуатации антенных обтекателей. Результаты испытаний ситалла АС-418 данным методом представлены на рис. 1.

Однако, ввиду чрезвычайной важности данного параметра целесообразно рассмотреть поведение материала в различных условиях теплового нагружения. Поэтому при проведении исследований было изучено поведение стеклокерамики в различных условиях воздействия различными методами: сбрасыванием в воду от заданной температуры; помещением образцов в разогретую печь с последующим их быстрым охлаждением; односторонним темповым нагревом и охлаждением; воздействием пламени газовой горелки. В первом случае образцы стеклокерамики $30 \times 30 \times 4$ мм подвергались испытанию по схеме $20 - T \text{ } ^\circ\text{C} - \text{вода}$, с последующим тщательным осмотром их поверхности, T – температура воды.

Следует отметить, что на поверхности образцов с полированной поверхностью следы повреждений в виде локальных микротрещин обнаружены при термоударе $20 - 1000 \text{ } ^\circ\text{C} - \text{вода}$. На поверхности образцов с шероховатостью $R_a = 0,7$ мкм (стандартная шлифовка алмазным инструментом) микротрещины обнаруживаются при термоударе $20 - 850 \text{ } ^\circ\text{C} - \text{вода}$, а такие же образцы, но подвергнутые травлению в 6% растворе плавиковой кислоты, при аналогичных условиях испытания дефектов не обнаруживают.

Данные эксперименты позволяют сделать вывод о том, что результаты испытаний на термостойкость существенным образом зависят от состояния поверхности испытываемых образцов.

На рис. 2 показано, что с увеличением степени дефектности поверхности образцов их прочность снижается. Отсюда понятно, что острые углубления в теле материала, оставшиеся от воздействия инструмента, способны существенно ослаблять и его термостойкость. Полировка же образцов, снимая верхние гребешки шероховатой поверхности, не убирает полностью микродефекты. Травление образцов, не снижая шероховатости поверхности после механической обработки, притупляет острые кромки, особенно в глубине материала, и тем самым существенно улучшает термостойкость стеклокерамики. Об этом свидетельствуют и данные работы [2], где путем травления поверхности ситалла АС-418 удалось несколько повысить его прочность и термостойкость.

Анализируя результаты исследований термостойкости стеклокерамики, основанные на методе субъективной оценки качества образцов (появились микротрещины или нет), мы пришли к выводу о необходимости количественной, объективной оценки устойчивости материала к термоудару путем определения деградации прочности. С этой целью образцы стеклокерамики размером $7 \times 7 \times 60$ мм после механической обработки ($R_a = 0,7$ мкм) подвергались термоудару по схеме $20 - T \text{ } ^\circ\text{C} - \text{вода}$ от 150 до $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ с интервалом через $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ с последующим определением прочности при изгибе. Хотя условия испытаний в данном случае были существенно жестче, чем испытания ситалла АС-418 в [2], представляется достаточно интересным сравнить эти результаты (рис. 1). Оказалось, что термостойкость стеклокерамики, определенная в более жестких условиях, существенно превышает термостойкость ситалла АС-418. Хотя тенденция снижения прочности при изгибе стеклокерамики начинает проявляться при термоударе уже от $700 \text{ } ^\circ\text{C}$, падение прочности не носит катастрофического характера, как это наблюдается у ситалла АС-418. Даже после термоудара от $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ стеклокерамика еще имеет некоторую остаточную прочность (рис. 2).

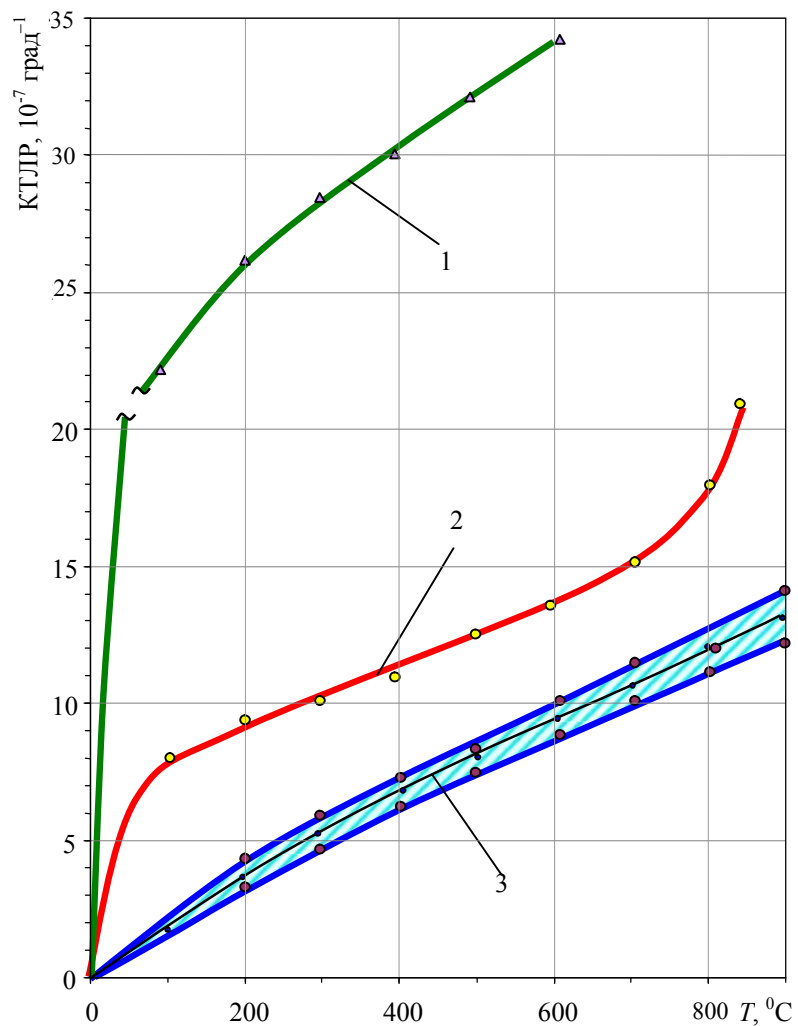


Рис. 1. Температурная зависимость КТТР литий-алюмосиликатного стекла (1), ситалла АС-418 (2) и стеклокерамики (3)

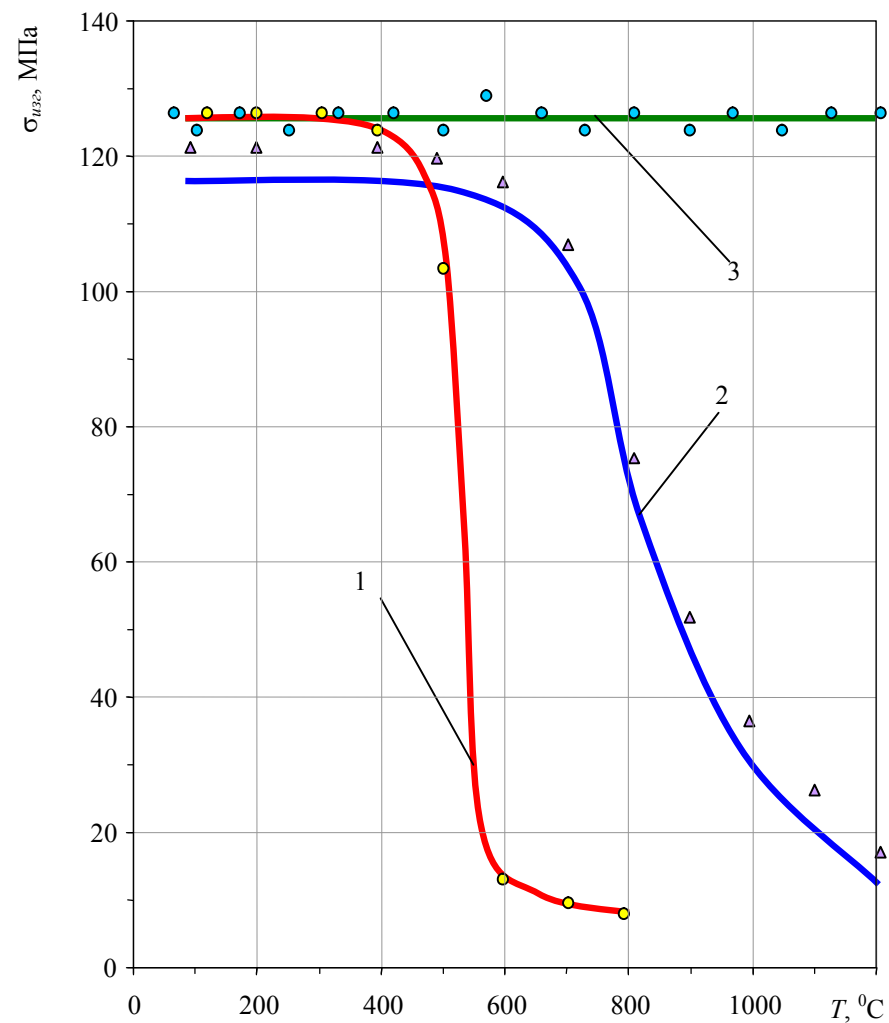


Рис. 2. Зависимость прочности при изгибе ситалла АС-418 и стеклокерамики от разности температур при термоударе: 1 – ситалл АС-418 (разовый капельный удар на разогретую поверхность образца); 2 – сбрасывание образцов стеклокерамики в воду; 3 – охлаждение образцов стеклокерамики на воздухе

Данные результаты, по-видимому, являются следствием того, что при сравнимых значениях прочности при изгибе ситалла АС-418 и стеклокерамики последняя имеет более низкие значения КЛТР и модуля упругости. Более того, стеклокерамика содержит в своем объеме до 1% закрытых пор, которые являются препятствием на пути распространения трещин. Комплекс данных показателей и обеспечивает более высокую устойчивость стеклокерамики к термоудару.

В следующем эксперименте на образцах стеклокерамики размером $7 \times 7 \times 60$ мм ($R_a = 0,7$ мкм) определялась устойчивость материала к воздействию темпового нагрева и охлаждения. С этой целью образцы мгновенно (не более чем за 1 секунду) помещались в разогретую до заданной температуры печь, выдерживались в печи в одном случае 60 секунд, в другом – 15 минут, после чего также мгновенно извлекались из печи и охлаждались на воздухе.

Было установлено, что резкий нагрев и охлаждение в неподвижной воздушной среде образцов стеклокерамики вплоть до температуры 1200°C не приводит к деградации их прочностных свойств (рис. 2).

Особый интерес представляют исследования по устойчивости стеклокерамики к темповому одностороннему нагреву и охлаждению. Эти исследования ценны и тем, что в литературе практически отсутствуют сведения об аналогичных испытаниях, хотя такие эксперименты наиболее приближены к условиям работы антенных обтекателей ЛА и способны более полно отразить возможность применения материала для их изготовления.

Методика проведения данного эксперимента включала изготовление партии образцов стеклокерамики размером $7 \times 7 \times 60$ мм ($R_a = 0,7$ мкм), определение исходных значений прочности при изгибе от подготовленной партии, установку образцов в гнездо из теплоизоляционного материала типа ТЗМК, установку в гнездо контрольного образца с приклеенными к двум противоположным поверхностям термопар, нанесение на наружную поверхность образцов светопоглощающего покрытия из суспензии Cr_2O_3 , размещение сборки образцов в центре зон нагрева

батареи кварцевых ламп. После этого по заданной программе производился односторонний нагрев и охлаждение образцов с последующим определением на них прочности при изгибе. При этом поверхность образцов, подвергавшаяся термонагрузению, располагалась в зоне растягивающих напряжений. По относительному изменению прочности образцов до и после испытаний представляется возможным судить о происходящих в материале изменениях и его использовании в конкретных объектах.

Результаты испытаний по устойчивости стеклокерамики к одностороннему темповому нагреву и охлаждению представлены в табл. 1, из которой следует, что общей тенденцией является отсутствие снижения прочности при изгибе стеклокерамики относительно исходной величины в интервале скоростей подъема от 100 до $150^\circ\text{C}/\text{с}$ и скоростей охлаждения от 20 до $320^\circ\text{C}/\text{с}$, которые достигались либо поддержанием заданного темпа охлаждения нагревателями стенда, либо обдувом сжатым воздухом поверхности образцов после выдержки при максимальной температуре. В результате данных исследований установлено, что реализованные темпы нагрева и охлаждения до максимальных температур от 850 до 1300°C не приводят к деградации прочности стеклокерамики, хотя и прослеживается некоторое снижение абсолютной величины прироста прочности от исходных значений по мере увеличения скорости охлаждения образцов от 40 до $320^\circ\text{C}/\text{с}$. Хотя эти изменения прочности лежат в поле разброса значений, тенденция просматривается достаточно убедительно. Поэтому возможное, хотя и незначительное, упрочнение материала объясняется эффектом закалки.

Полученные результаты являются принципиально важными, так как убедительно свидетельствуют о том, что температура на поверхности стеклокерамики до 1300°C не является для нее критической. Однако возможности стеклокерамики не ограничены данным интервалом температур, скоростей нагрева и охлаждения (табл. 1). Об этом свидетельствует тот факт, что материал не обнаруживает признаков разрушения (микротрещин, сколов и т.д.) даже в случаях прожигания в образцах сквозных

Относительное изменение прочности при изгибе стеклокерамики после темпового нагрева и охлаждения

Материал	$\sigma_{изг}$, МПа	Условия одностороннего темпового нагрева и охлаждения				
		$T_M=850\text{ }^{\circ}\text{C};$ $V_H=100\text{ }^{\circ}\text{C/c};$ $\tau_{MM}=80\text{ c};$ $V_{охл.}=8\text{ }^{\circ}\text{C/c};$ (850–580) $^{\circ}\text{C}$	$T_M=1170\text{ }^{\circ}\text{C};$ $V_H=150\text{ }^{\circ}\text{C/c};$ $\tau_{MM}=15\text{ c};$ $V_{охл.}=2\text{ }^{\circ}\text{C/c};$ (1170–700) $^{\circ}\text{C}$	$T_M=1300\text{ }^{\circ}\text{C};$ $V_H=160\text{ }^{\circ}\text{C/c};$ $\tau_{MM}=15\text{ c};$ $V_{охл.}=40\text{ }^{\circ}\text{C/c};$ (1300–650) $^{\circ}\text{C}$	$T_M=1300\text{ }^{\circ}\text{C};$ $V_H=150\text{ }^{\circ}\text{C/c};$ $\tau_{MM}=5\text{ c};$ $V_{охл.}=150\text{ }^{\circ}\text{C/c};$ (1300–650) $^{\circ}\text{C}$	$T_M=1300\text{ }^{\circ}\text{C};$ $V_H=150\text{ }^{\circ}\text{C/c};$ $\tau_{MM}=15\text{ c};$ $V_{охл.}=320\text{ }^{\circ}\text{C/c};$ (1300–650) $^{\circ}\text{C}$
		$\Delta\sigma_{изг.}, \%$				
Стеклокерамика ОТМ 357	103	+5,8	+14,6	+15,5	+14,6	+6,8

T_M – максимальная температура поверхности образцов; V_H – скорость подъема температуры; τ_{MM} – выдержка при максимальной температуре поверхности образца; $V_{охл.}$ – скорость охлаждения поверхности образца; (850–580) $^{\circ}\text{C}$ – интервал температур с заданной скоростью охлаждения: «+» – увеличение показателя от исходных значений.

Таблица 2

Расчетные значения термостойкости различных материалов, используемых для изготовления антенных обтекателей

Наименование материала	Уровень свойств						
	Марка, наименование материала						
	Пирокерам 9606	Пирокерам 9608	Ситалл АС 370	Ситалл АС 418	Высокоглиноземистая керамика (Al_2O_3)	Кварцевая керамика с пористостью 8...10%	Стеклокерамика ОТМ 357
Прочность при изгибе, МПа	182,0	114,0	179,0	12,0	315,0	45,0	11,0
Коэффициент теплового линейного расширения, $1/^{\circ}\text{C}$	$57 \cdot 10^{-7}$	$20 \cdot 10^{-7}$	$48 \cdot 10^{-7}$	$28,5 \cdot 10^{-7}$	$73 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$13 \cdot 10^{-7}$
Модуль упругости, МПа	$121 \cdot 10^3$	$87,5 \cdot 10^3$	$132 \cdot 10^3$	$85 \cdot 10^3$	$280 \cdot 10^3$	$45 \cdot 10^3$	$53 \cdot 10^3$
Коэффициент Пуассона	0,25	0,25	0,34	0,29	0,32	0,25	0,29
Максимальный перепад температур, $^{\circ}\text{C}$	400	980	370	700	210	2500	2260
Источник	[4]	[4]	[5]	[5]	[4]	[6]	[3]

отверстий ацетиленовой горелкой (рис. 3, 4). Нам не удалось зафиксировать в данном случае темпов нагрева и охлаждения, а также фактической температуры в зоне воздействия на образец пламени горелок, но сам факт сохранения целостности образцов и фрагмента обтекателя свидетельствует о высоких возможностях стеклокерамики. Аналогичные испытания образца, полученного из стекложатковки, обнаружили наличие в нем сквозных концентрических трещин, что свидетельствует не в пользу ситалла, получаемого по традиционной стекольной технологии, хотя химический и фазовый составы образцов идентичны.

Полученные результаты по целому ряду физико-технических свойств стеклокерамики, а также наличие литературных сведений по другим материалам, позволяют произвести расчет термостойкости и оценить различные материалы по данному параметру.

Для всех материалов при проведении расчета термостойкости исходили из условий, что напряжения на поверхности пластины, обусловленные постоянным перепадом температур, не зависят от толщины пластинки и их можно рассчитать по уравнению, предложенному в работе [3]:

$$\Delta T = \frac{2\sigma(1-\eta)}{E\alpha}, \quad (1)$$

где ΔT – перепад температур, который может выдержать материал без разрушения; σ – предел прочности при изгибе; η – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; α – коэффициент линейного теплового расширения.

Результаты расчета значений термостойкости сведены в табл. 2, из которой видно, что главную роль при разрушении от термоудара играют два фактора: низкие значения КЛТР и модуля упругости. Так, кварцевая керамика имеет наивысшую термостойкость из приведенных в табл. 2 материалов, хотя ее прочностные свойства существенно ниже, но при этом и ее КЛТР намного ниже, чем у других материалов. Приведенный расчет (табл. 2) показывает, что стеклокерамика по термостойкости уступает лишь кварцевой керамике, а абсолютные значения термостойкости настолько высоки, что

представляется возможным даже прожигать в образцах отверстия без их разрушения, что из всех других материалов можно сделать лишь в кварцевой керамике.

Таким образом, полученные результаты исследований по изменению прочностных свойств стеклокерамики в условиях различного вида термонагружения убедительно свидетельствуют о перспективности применения материала для обтекателей скоростных ЛА.

Важными свойствами стеклокерамики для обтекателей радиоантенн ЛА являются теплопроводность, удельная теплоемкость и температуропроводность. Ввиду достаточно благоприятного сочетания этих свойств ситаллы находят широкое применение, как в качестве проводника тепла, так и в качестве теплового изолятора. По своей теплопроводности ситаллы занимают промежуточное положение между стеклами и чисто окисными керамическими материалами [3 – 6]. Под воздействием температуры для стекол отмечается повышение теплопроводности, теплопроводность же кристаллических материалов с повышением температуры обычно снижается [7]. Поведение ситаллов своеобразное. До температур 400 ... 500 °С отмечается повышение теплопроводности, а затем с повышением температуры, теплопроводность снижается (рис. 5). Такое поведение теплопроводности характерно и для стеклокерамики β -сподуменового состава и для других ситаллов из данной группы. По всей вероятности, кривые теплопроводности некоторых материалов, приведенные на рис. 5, представляют собой следствие различных механизмов переноса тепла в различных температурных интервалах. Следует отметить, что кривая теплопроводности стеклокерамики располагается несколько ниже кривых для ситаллов АС-418 и Пирокерам 9608, для которых также характерен преимущественно β -сподуменовый фазовый состав. Некоторое снижение теплопроводности стеклокерамики вызвано наличием в материале небольшого количества мелких пор, которые способны приводить к снижению теплопроводности [7].

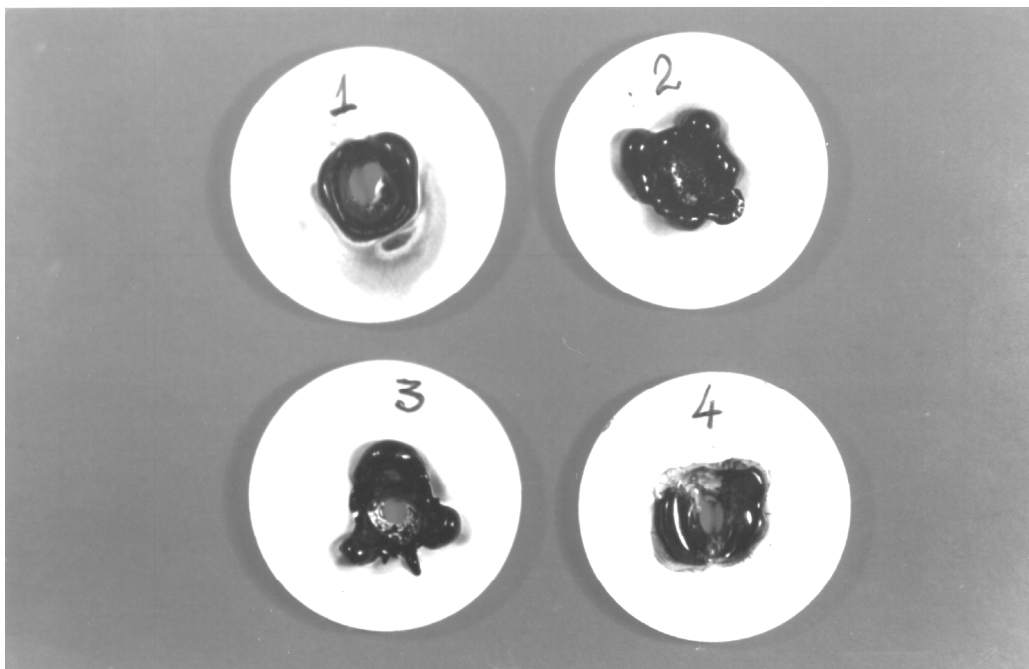


Рис. 3. Образцы из стеклокерамики (1 – 3) и закристаллизованного исходного литий-алюмосиликатного стекла (4) с отверстиями, прожженными ацетиленовой горелкой (в образце 4 сквозные концентрические трещины)

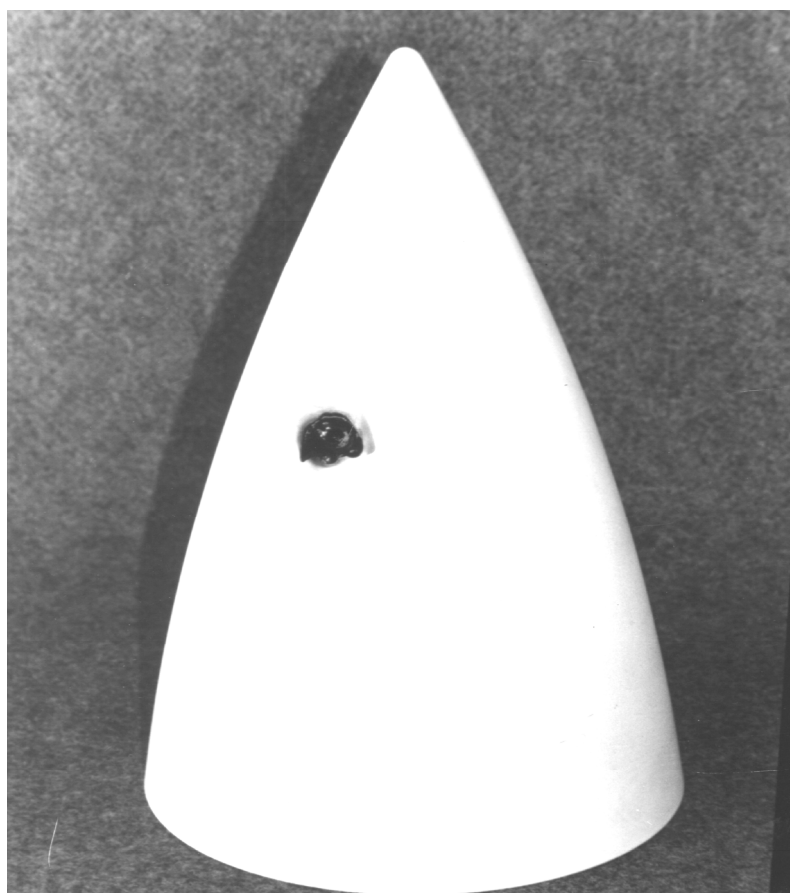


Рис. 4. Фрагмент обтекателя из стеклокерамики с отверстием,

прожженным ацетиленовой горелкой

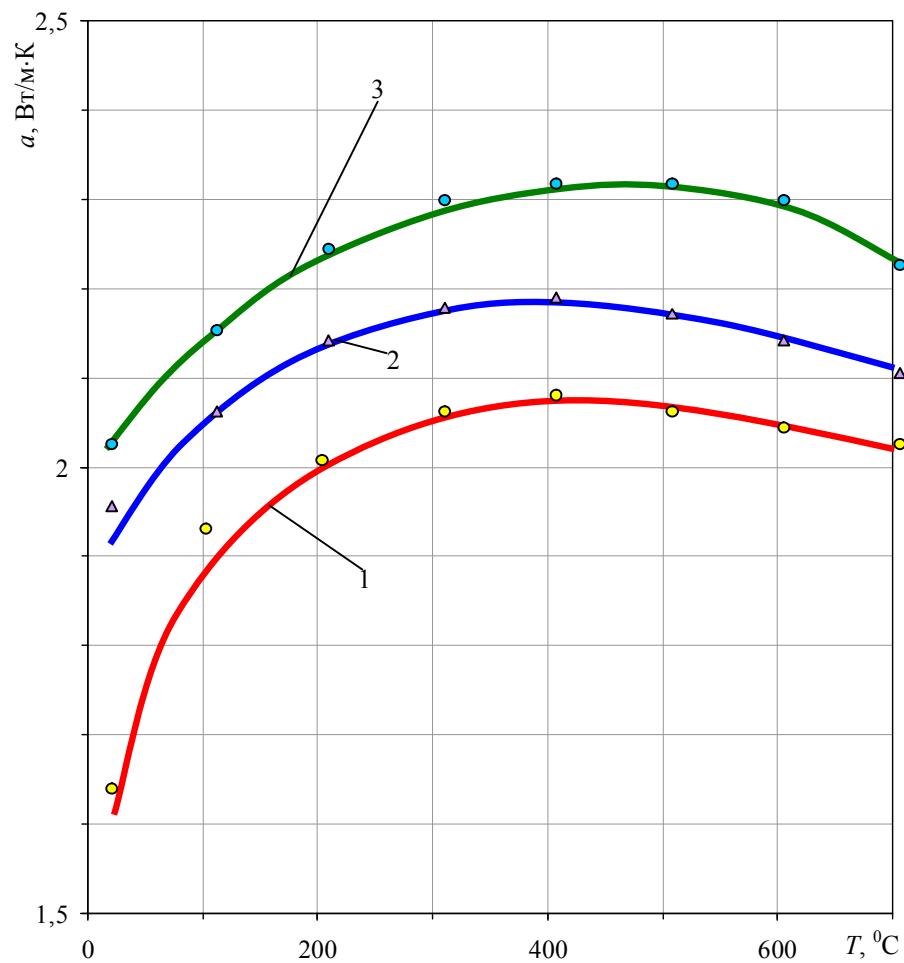


Рис. 5. Зависимость теплопроводности стеклокерамики, ситалла АС-418 и ситалла Пирокерам 9608 от температуры испытаний:
1 – стеклокерамика; 2 – ситалл АС-418; 3 – Пирокерам 9608

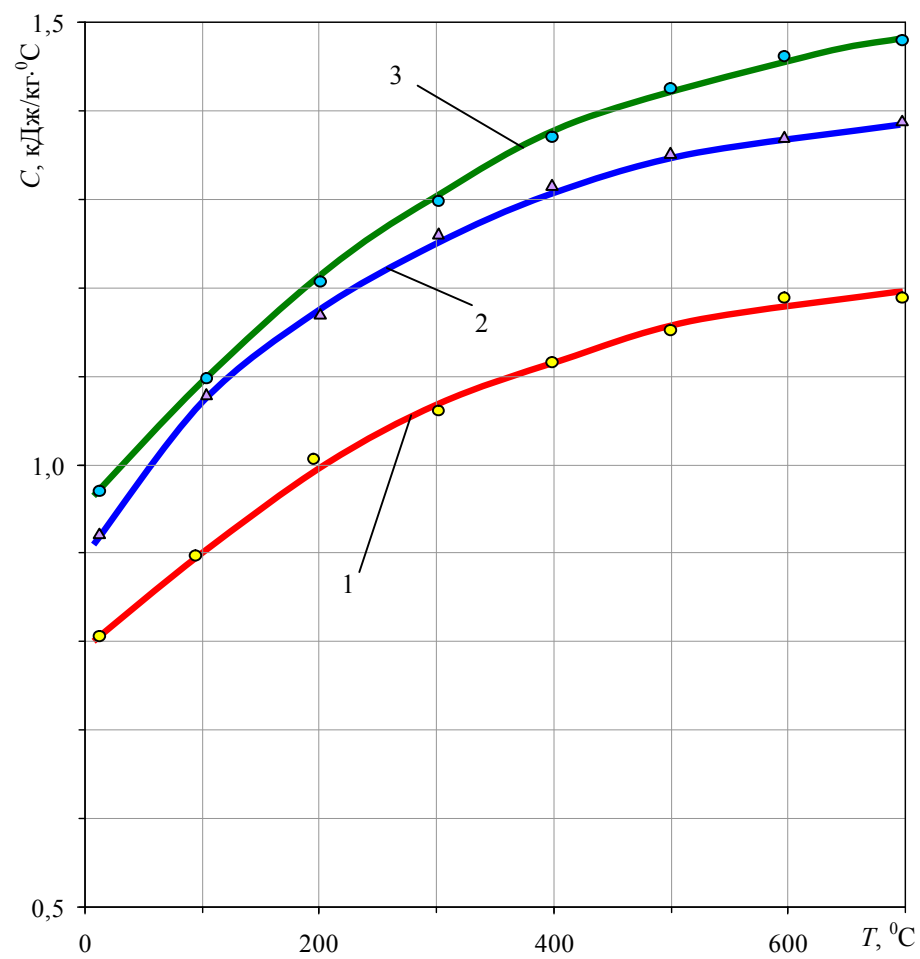


Рис. 6. Зависимость удельной теплоемкости стеклокерамики, ситалла АС-418 и ситалла Пирокерам 9608 от температуры испытаний:
1 – стеклокерамика; 2 – ситалл АС-418; 3 – Пирокерам 9608

Удельная теплоемкость ситаллов и стеклокерамики возрастает с повышением температуры (рис. 6), а характер этих изменений подобен изменениям в стеклах и других видах окисных керамических материалов.

Температуропроводность (рис. 7) является расчетной величиной [8]:

$$a = \lambda / \rho c, \quad (2)$$

где a – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность материала; c – удельная теплоемкость.

При проведении исследований установлено, что диэлектрические потери в ситалле АС-418 и стеклокерамике меньше, чем в исходном стекле, так как катионы щелочных металлов в кристаллической решетке менее подвижны, чем в структурной хаотической сетке стекла. Общей тенденцией является увеличение диэлектрических потерь в стеклах, ситаллах и стеклокерамике с повышением температуры.

Диэлектрические потери ситалла АС-418 и стеклокерамики проходят через слабо выраженный минимум, при этом у ситалла АС-418 он приходится на интервал температур 250 ... 350 °С [9], а у стеклокерамики – в интервале температур 400 ... 450 °С. Резкое увеличение диэлектрических потерь у ситалла АС-418 отмечается с повышением температуры от 400 °С, в то время как у стеклокерамики – от 550 °С. Если в интервале температур до 300 °С диэлектрические потери данных материалов сравнимы, то при температурах выше 400 °С потери в стеклокерамике в 2 – 3 раза ниже, чем у ситалла АС-418 (рис. 8, табл. 3). Это явление связано, как это было показано выше, с некоторыми отличиями в химическом и фазовом составе данных материалов. Особенно сказывается повышенное содержание оксида лития и наличие остаточной стеклофазы по границам кристаллов.

Диэлектрическая проницаемость разработанных ситаллов радиотехнического назначения находится в интервале от 5,5 до 7,5 единиц. Поэтому стеклокерамика ОТМ 357, находясь по химическому и фазовому составу в ряду β -сподуменовых ситаллов, по данному параметру не является исключением.

Точно так же, как и при кристаллизации моно-

литного исходного стекла, термообработка стеклокерамики вызывает увеличение значений диэлектрической проницаемости. Рост абсолютных значений диэлектрической проницаемости от исходного состояния вызван главным образом кристаллизацией стекла. Вклад в увеличение диэлектрической проницаемости за счет уплотнения при спекании (т.е. снижения пористости) от 13 ... 15 до 0,1% незначительный, судя по данным спекания однокомпонентных керамических материалов. Так, например, спекание кварцевой керамики от 12 ... 14% до нулевой пористости вызывает увеличение ее диэлектрической проницаемости от 3,3 до 3,7 единиц (10 – 11%). Здесь процессы кристаллизации отсутствуют, и увеличение диэлектрической проницаемости вызвано лишь снижением пористости. В стеклокерамике при тех же изменениях пористости увеличение диэлектрической проницаемости составляет 30%, т.е. 10%-ое увеличение ϵ осуществляется за счет уплотнения материала, а 20%-ое – за счет кристаллизации материала. При этом кристаллизация исходного стекла обеспечивает не только увеличение ϵ , но и существенную стабилизацию диэлектрической проницаемости в широком диапазоне температур (рис. 9, табл. 3). Так, если $\Delta\epsilon$ исходного стекла в интервале температур 20 ... 700 °С составляет 20%, то $\Delta\epsilon$ стеклокерамики в том же температурном интервале не превышает 5%, в то время как $\Delta\epsilon$ ситалла АС-418 составляет 9% [9].

Необходимо отметить, что кроме чисто количественных преимуществ в стабильности диэлектрической проницаемости стеклокерамики по сравнению с традиционно получаемым ситаллом АС-418, она выгодно отличается от последнего тем, что при одном и том же составе стекла позволяет проектировать значения диэлектрической проницаемости в широком диапазоне значений за счет введения в шликер расчетного количества добавок TiO_2 .

Выводы

1. Стеклокерамика ОТМ 357 по термостойкости и стабильности прочностных и диэлектрических свойств

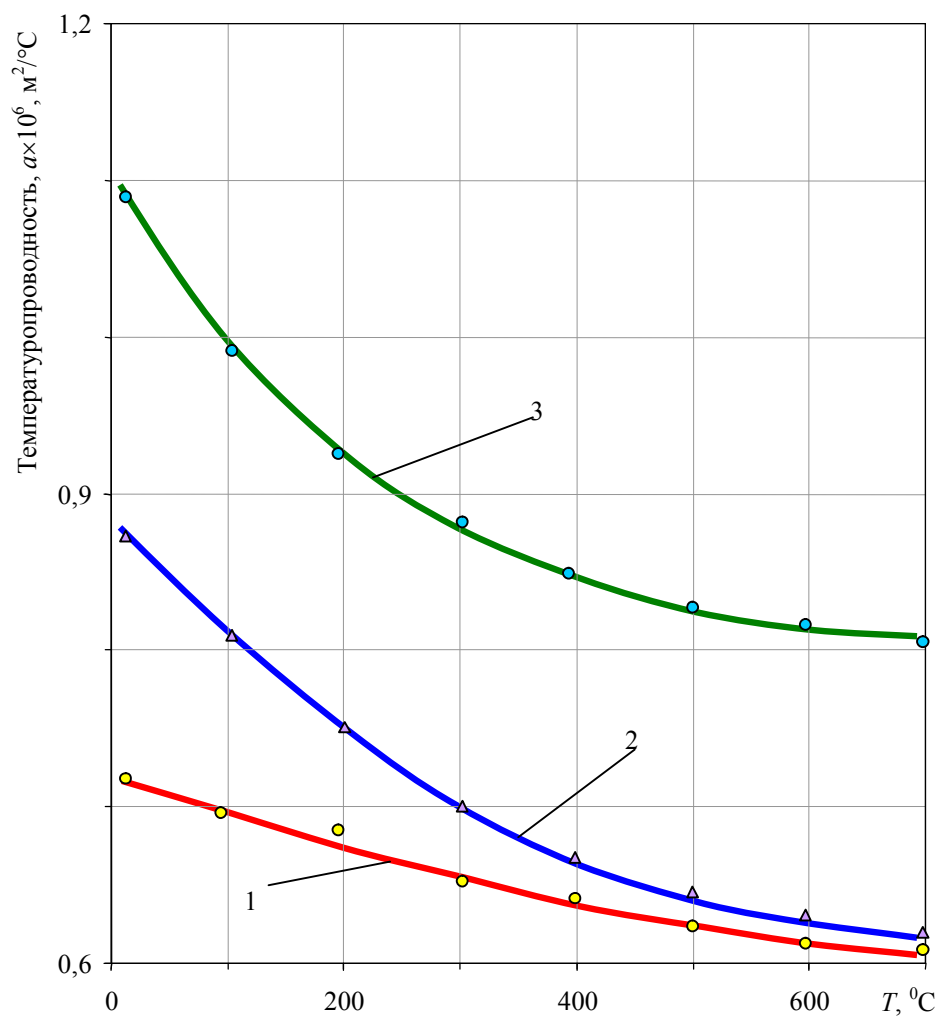


Рис. 7. Зависимость температуропроводности стеклокерамики, ситалла AC-418 и ситалла Пирокерам 9608 от температуры испытаний:
1 – стеклокерамика; 2 – ситалла AC-418;
3 – Пирокерам 9608

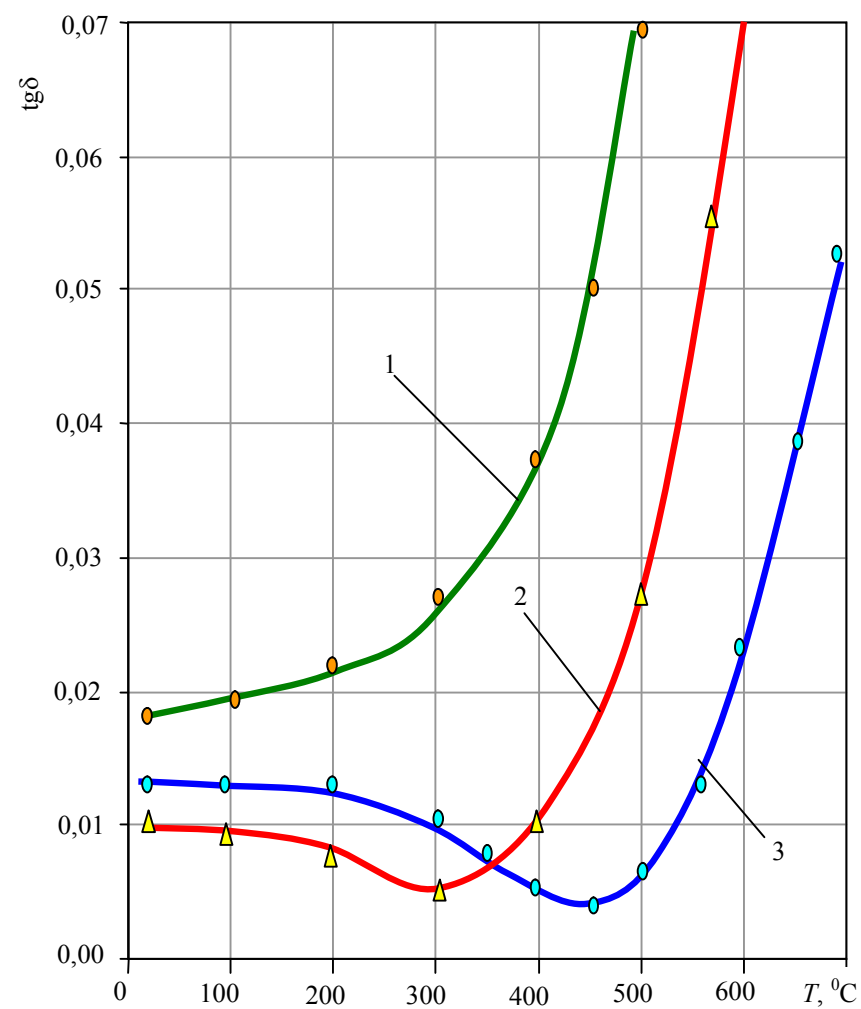


Рис. 8. Температурная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь:
1 – литий-алюмосиликатного стекла; 2 – ситалла AC-418;
3 – стеклокерамики

Таблица 3

Относительные изменения ε и $\text{tg}\delta$ различных материалов в интервале температур 200 ... 700 °С

Температура, °С	Исходное стекло		Ситалл АС-418		Стеклокерамика ОТМ 357	
	$\Delta\varepsilon$, %	$\Delta\text{tg}\delta$, %	$\Delta\varepsilon$, %	$\Delta\text{tg}\delta$, %	$\Delta\varepsilon$, %	$\Delta\text{tg}\delta$, %
100	2,0	+16,7	0	-5,0	0	-5,2
200	4,1	+33,3	0	-16,5	0	-16,8
300	6,6	+55,6	0,4	-45,0	0	-28,0
350	7,9	+77,8	0,6	-33,3	0	-36,0
400	9,9	+105,6	1,0	+11,0	0,7	-40,8
450	10,7	+177,8	1,5	+83,0	1,2	-40,8
500	12,4	+288,0	1,9	+233,3	1,5	-28,8
550	14,0	—	2,6	+400,0	2,1	-7,2
600	16,5	—	3,9	+511,1	3,5	+8,0
650	18,2	—	6,5	+733,3	4,0	+212,8
700	19,8	—	9,0	—	4,6	+335,2

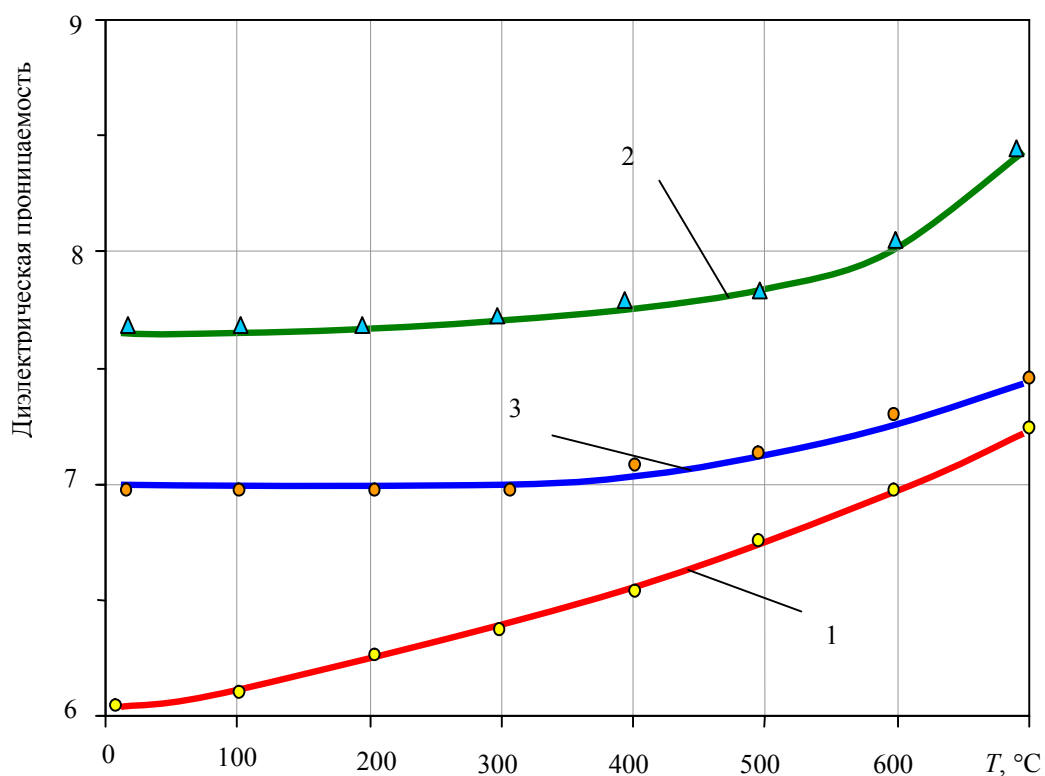


Рис. 9. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости:

1 – литий-алюмосиликатного стекла; 2 – ситалла АС-418;

3 – стеклокерамики

в диапазоне температур от 20 до 1175 °С отвечает требованиям к материалам обтекателей радиоантенн высокоскоростных ЛА и существенно их превосходит зарубежные аналоги.

2. Установлено, что высокая термостойкость стеклокерамики обусловлена достаточно низкими значениями ее модуля упругости и КЛТР сравнимыми с уровнем аналогичных свойств лишь кварцевой керамики, а также мелкозернистой структурой и оптимально сформированным фазовым составом материала. Такое благоприятное сочетание теплофизических и упругих свойств материала связано с наличием небольшого количества закрытых пор, которые в комплексе с керамоподобной структурой являются препятствиями распространению трещин. Проведенный расчет показал, что стеклокерамика ОТМ 357 по термостойкости лишь незначительно уступает пористой кварцевой керамике. Данные расчета подтверждены экспериментом, когда материал, в отличие от образцов из закристаллизованной стеклозаготовки, не обнаруживает видимых следов разрушения при прожигании в нем отверстий ацетиленовой горелкой.

3. Установлено, что основной вклад в увеличение диэлектрической проницаемости при синтезе стеклокерамики вносит кристаллизация стекла с формированием оптимального фазового состава материала. Существенное снижение прироста диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь в стеклокерамике ОТМ 357 по сравнению с ситаллом АС-418 β -сподуменового состава вызвано более низким содержанием в ней остаточной стеклофазы, являющейся основным источником потерь в стеклокристаллических материалах.

4. Приведенные паспортные характеристики стеклокерамики ОТМ 357 позволяют проводить тепловые и радиотехнические расчеты при проектировании обтекателей.

антенн летательных аппаратов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”. – 2004. – Вып. 23. – С. 217 – 228.

2. Полешко А.П., Горелик Е.Т. О прочности технических ситаллов и стекол при растяжении // Проблемы прочности. – 1981. – № 3. – С. 73 – 79.

3. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов: проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания: Учеб. пособие / А.Г. Ромашин, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, М.Ю. Русин. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 2003. – 239 с.

4. Экспериментальные исследования конструкции узла соединения антенного обтекателя с корпусом ракеты / А.И. Туманов, М. Ю. Русин, А.Н. Хора и др. // Синтез, технология производства и методы испытания жаропрочных неорганических материалов. – 1978. – С. 60 – 64.

5. Липовцев Ю.В. Методы расчета термонапряженного состояния конструкций типа оболочек вращения из неорганических материалов // Жаропрочные неорганические материалы. – 1977. – Вып. 5. – С. 356 – 375.

6. Седоков Л.М., Мартыненко А.Г., Симоненко Г.А. Радиальное сжатие, как метод механических испытаний // Заводская лаборатория. – 1977. – Т. 43, № 1. – С. 98 – 100.

7. Конструкционная прочность стекла и ситаллов / Г.С. Писаренок, К.К. Амелянович, Ю.И. Коцуб и др. – К.: Наук. думка, 1979. – 283 с.

8. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике / В.С. Авудевский, Ю.И. Данилов, В.К. Кошкин и др. – М.: Оборонгиз, 1960. – 389 с.

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

Литература

1. Гайдачук В.Е., Русин М.Ю., Хамицаев А.С. Прочностные и упругие свойства стеклокерамического материала ОТМ 357 для обтекателей радио-

Поступила в редакцию 26.07.2004

Рецензент: канд. техн. наук, проф. В.В. Кириченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.