

УДК 629.73.002:666.775

М.Ю. РУСИН¹, А.Г. РОМАШИН¹, П.И. КАМНЕВ²¹ Обнинское научно-производственное предприятие «Технология», Россия² ОКБ «Новатор», Россия

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ГОЛОВНЫХ ОБТЕКАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Проведен анализ состояния разработки головных обтекателей летательных аппаратов в России и за рубежом. Изложен опыт разработки данного класса изделий в Обнинском научно-производственном предприятии «Технология» и ОКБ «Новатор».

головные обтекатели летательных аппаратов, характеристики керамических материалов, конструктивно-технологические решения, испытания

Введение. Постановка проблемы

Головные обтекатели являются одним из важнейших элементов конструкций летательных аппаратов (ЛА), в значительной степени определяющих аэродинамические характеристики и точность наведения на цель. К ним предъявляются типовые для ЛА требования минимальной массы при обеспечении достаточной прочности и надежности. В связи с широким применением радиолокационных систем управления, обтекатели как головные, так и расположенные на корпусе ЛА, должны обладать комплексом радиотехнических свойств, т.е. радиоволны заданного спектра частот не должны претерпевать искажений и ослабления мощности электромагнитного потока. С этим непосредственно связаны и защитные функции обтекателя в целях обеспечения работоспособности аппаратуры в условиях действующих тепловых и аэродинамических нагрузок. Кроме того, ввиду продолжительных сроков использования ЛА, качество обтекателей характеризуется стабильностью прочностных и радиотехнических свойств от начала до конца эксплуатации, что предъявляет ряд специфических требований к материалам, из которых они изготавливаются [1].

Функциональные свойства обтекателей обуславливают противоречивые требования к конструкционным материалам. Например, применение мате-

риалов с большим коэффициентом теплопроводности, обеспечивающим снижение температурных напряжений в стенке обтекателя, приводит к росту температуры во внутреннем объеме, что может вывести из строя радиотехническую аппаратуру.

Характерной особенностью условий эксплуатации обтекателя является изменение температуры на стенке головной части ракеты от высоты полета, что видно на рис. 1.

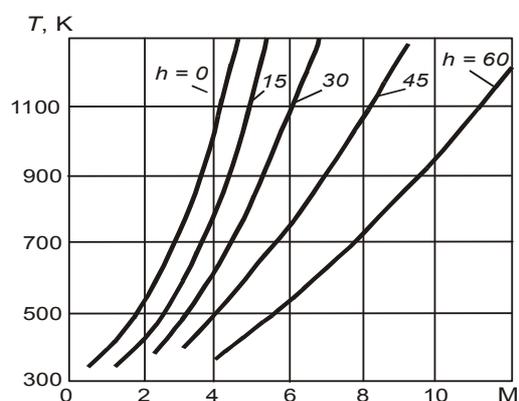


Рис. 1. Изменение температуры на стенке головной части ракеты от высоты полета (h – км)

В современных ЛА используются головные обтекатели, созданные на базе стеклопластиков, керамических материалов, ситаллов и углепластиков.

Стеклопластики заняли обширную нишу в определенном классе ЛА, но проблемы, связанные с дальнейшим их совершенствованием, для обтекателей ЛА в полной мере не решены до настоящего

времени. Несмотря на значительный прогресс в индустрии полимерных композиционных материалов, принципиального улучшения характеристик обтекателей из композиционных материалов, по сравнению с кварцевой керамикой, получить не удается.

Пределные возможности некоторых конструкционных материалов с учетом суммарных ограничений, действующих на ЛА, приведены на рис. 2 [2 – 3].

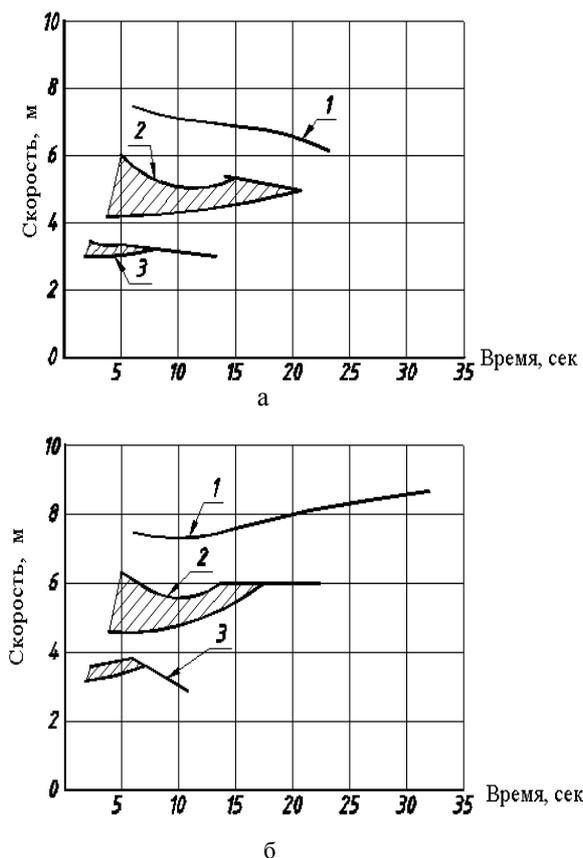


Рис. 2. Пределные возможности материалов обтекателей в зависимости от скорости полета ЛА при угле пуска 20° (а), при угле пуска 80° (б):
1 – кварцевая керамика; 2 – пирокерам 9606;
3 – алюмооксидная керамика

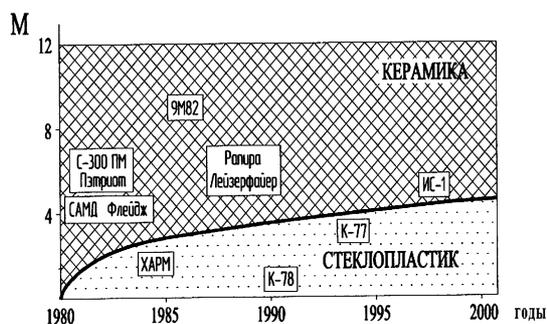


Рис. 3. Керамика и стеклопластики в обтекателях ракет

На рис. 3 показаны характерные области применения стеклопластиков и керамики в обтекателях ракет [1] за последние 20 лет.

Целью настоящей статьи является систематизация опыта разработки головных обтекателей ЛА.

Опыт создания головных обтекателей ЛА

Проблема создания головных обтекателей неразрывно связана с синтезом новых материалов, разработкой технологии их производства и проектирования оптимальных конструкций по весовым и радиотехническим параметрам.

В табл. 1 приведены свойства основных керамических материалов (диэлектриков), пригодных к применению в конструкциях обтекателей.

Кварцевая керамика в настоящее время обоснованно заняла передовое место среди материалов для радиопрозрачных обтекателей сверхскоростных ЛА. Однако сравнительно невысокая прочность и низкий коэффициент линейного температурного расширения этого материала затрудняют проектирование высоконагруженных, ответственных элементов летательных аппаратов.

Главными задачами при разработке обтекателей являются:

- изыскание возможности повышения прочности материала и конструкций;
- поиск методов, обеспечивающих технологичность сборки, надежность, долговечность конструкции;
- синтез новых материалов для конструирования антенных обтекателей, как в узком, так и в широком диапазоне волн.

Следует отметить, что в основном все известные ЛА классов «поверхность – воздух», «воздух – воздух» и «воздух – поверхность», созданные к настоящему времени у нас в стране и за рубежом, базируются на узкочастотных полуволновых обтекателях из керамики и стеклопластиков. Не являются здесь исключением исключением американский «Пэтриот» и наш «С-300».

Таблица 1

Свойства основных керамических материалов (диэлектриков)

Свойства керамики	Тип керамики							
	Оксидная керамика					Нитридная керамика		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	BeO	MgO	ситалл	BN	AlN	Si ₃ N ₄
Плотность, 10 ⁻³ кг/м ³	1,7...2,2	3,6...3,93	3,0	3,58	2,5...2,84	1,6...2,2	3,27	2,45...3,45
Температура плавления (размягчения), К	1980	2100	2870	3070	1680	3300	2670	2170
Прочность на изгиб (МПа) при T= 290 К T=1300 К	30...80 30...110	210...380 49...8	110...280 100...240	110...170 35...100	80...150	80...180 90...130	280	150...830 150...700
Температурный коэффициент линейного расширения 10 ⁶ , (1/К) в интервале 300 – 1300 К	0,5...0,8	8,0...8,7	8,2...10,3	12...14,5	0,9...5,7	0,3...0,85	5,6	2,5...2,8
Теплопроводность, Вт/(м К)	0,7...1,3	2,7...6,9	222	40	1,9...3,7	15...200	30	3,9...19
Теплоемкость, кДж/(кг· К)	0,65...0,75	0,7...1,1	1,26	0,98	0,7...0,9	0,8...1,2	-	0,67...0,8
Термостойкость, К	1200	180...240	1000	120...175	1000	1500	-	1100
Интегральный коэффициент черноты	0,5...0,6	0,3...0,7	0,36	0,32...0,7	0,7	-	-	-
Модуль упругости, МПа·10 ⁻⁴	2,0...7,7	22,0...28,0	32,0	24,0	6,0...12,0	2,9...12,0	35,0	7,8...30,0
Коэффициент Пуассона	0,17	0,28...0,3	0,29	0,36	0,22...0,26	0,2	-	0,2...0,27
Диэлектр. проницаемость	2,7...3,6	8,7...9,9	6,5	8,0...9,0	6,9...10,2	3,3...3,5	8,5	10÷90

К настоящему времени выработана иерархия основных требований (рис. 4) к материалам и к обтекателям при их создании [1].

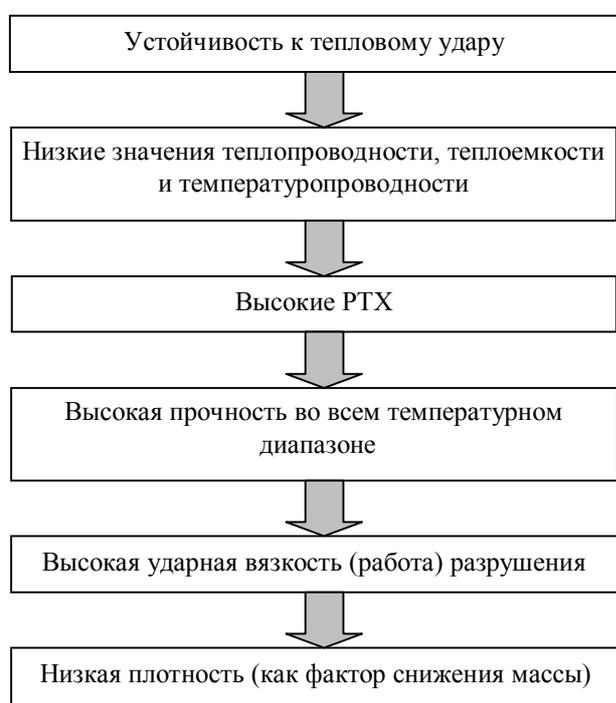


Рис. 4. Иерархическая схема требований к потребительским свойствам (характеристикам) антенных обтекателей

Анализ имеющихся результатов показывает, что наибольшие скорости полета доступны ЛА с обтека-

телями из кварцевой керамики, затем идут ситаллы (пирокерам 9606 и Рейкерам) и алюмооксидная керамика.

За последние десятилетия в проектировании и технологии производства обтекателей из диоксида кремния и ситаллов накоплен богатейший опыт, решены многие материаловедческие проблемы, что позволило найти новые по сравнению со стеклопластиковыми конструкционные решения (рис. 5).

В зависимости от применяемого материала в конструкции обтекателя и режимов его эксплуатации соединение керамической оболочки с переходными элементами производится с помощью адгезионной или адгезионно-механической связи (рис. 6, 7) [1].

Для обтекателей из алюмооксидной керамики, которая имеет высокие прочностные характеристики (предел прочности при растяжении $\sigma_s = 70 \dots 100$ МПа) и высокие значения температурного коэффициента линейного расширения, $\alpha = (80 \dots 90) \cdot 10^{-7}$ град⁻¹, вопрос связи высоконагруженных теплосиловыми воздействиями элементов конструкции решается с помощью припоев и, сохраняющих высокую прочность при температурах 773 К и выше, жестких клеев горячего отверждения.

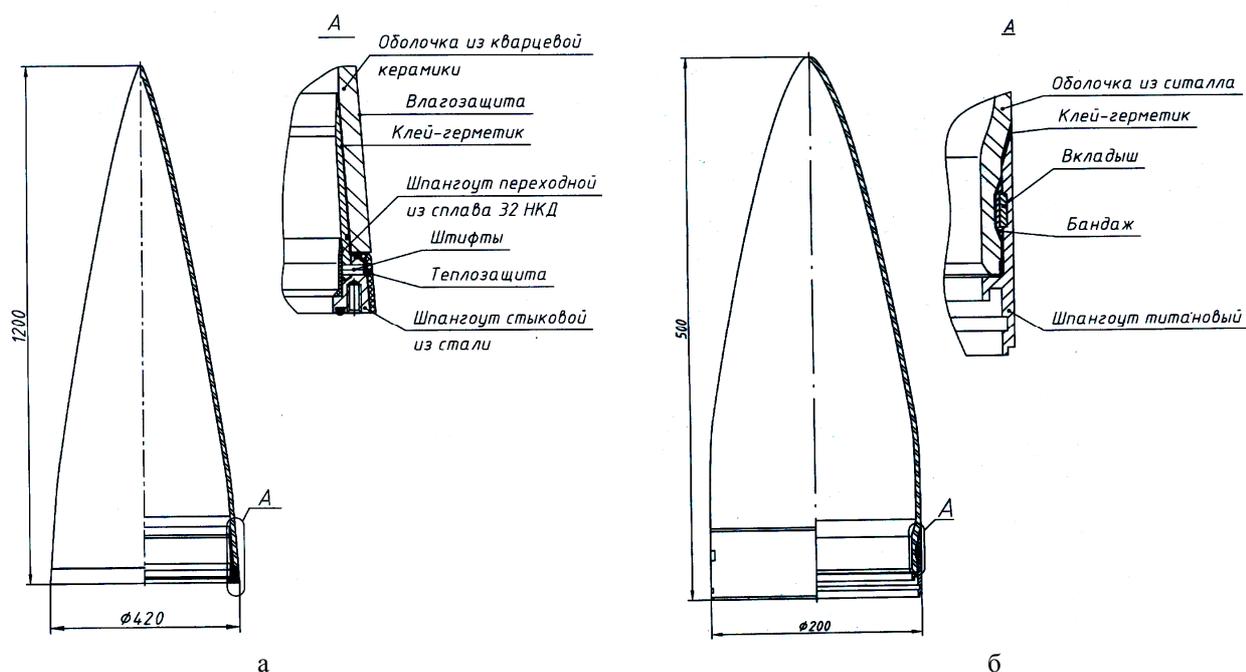


Рис. 5. Обтекатель из кварцевой керамики (а), из ситалла (б)

При этом в качестве материалов переходных соединительных элементов (шпангоутов) используются согласованные по α сплавы и композиционные материалы. Для обтекателей из пирокерама, ситалла, имеющих в 2 ... 3 раза меньшие σ_{θ} и в 3 ... 5 раз меньшие значения α , чем у алюмооксидной керамики, нашли применение соединения с использованием высокоэластичных клеев-герметиков в комбинации с механической связью при наружном или внутреннем расположении относительно поверхности стенки керамической оболочки переходных металлических или стеклопластиковых элементов.

Уровень анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции обтекателя в эскизных проектах первых разрабатываемых изделий не позволял правильно определить опасный расчетный случай. Не было представления об опасности для оболочки из пористой кварцевой керамики местных напряжений в ней от стеснения температурных деформаций жестко связанных эпоксидным клеем ВК-9 керамического элемента со стеклопластиковым. Лишь экспериментально – на образцах, а затем и на самих оболочках обтекателей, собранных с помощью жесткого клея холодного отверждения ВК-9 со стеклопластиковыми шпангоута-

ми, было зафиксировано возникновение трещин в керамическом элементе на краях клеевого шва. Корректного теоретического решения задачи о степени допустимой рассогласованности по ТКЛР соединяемых элементов в обтекателе из кварцевой керамики в тот период проектировщики обтекателей не имели.

В результате длительных исследований в качестве материала для шпангоута был выбран прецизионный сплав 32НКД, с $\alpha = 8 \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$, практически совпадающий с α кварцевой керамики до 373 К, но применяемый на тот момент в отечественном машиностроении лишь в приборостроении.

Использование шпангоутов из сплава 32 НКД с максимально утоненной носовой частью для снижения концентраций напряжений в керамическом элементе устранило эффект снижения несущей способности от термоциклических климатических воздействий, но стабильности по несущей способности керамического элемента соединения с применением жесткого клея ВК-9 достигнуто не было из-за локальных отрывных напряжений в керамической оболочке у носовой части шпангоута при теплосиловом воздействии.

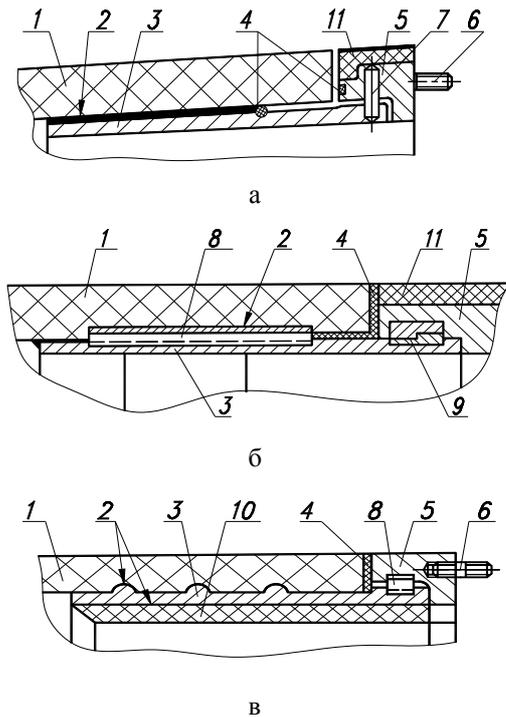


Рис. 6. Конструкции соединений обтекателя со шпангоутом:

- 1 – оболочка из керамического материала;
- 2 – адгезионный слой; 3 – переходный элемент;
- 4 – уплотнение; 5 – шпангоут; 6 – шпилька; 7 – штифт;
- 8 гофрированный металлический элемент;
- 9 – соединительный элемент (типа «байонет»);
- 10 – распорное кольцо; 11 – теплозащита

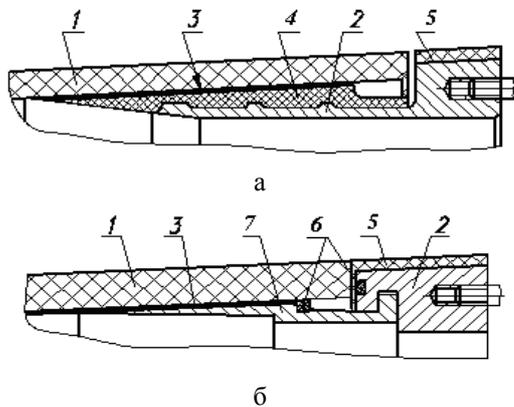


Рис. 7. Соединение обтекателя со шпангоутом:

- 1 – керамическая оболочка; 2 – шпангоут;
- 3 – адгезионный слой; 4 – промежуточное кольцо;
- 5 – теплозащита; 6 – уплотнение;
- 7 – разрезное соединительное кольцо

Лишь применение эластичного адгезива для соединения элементов обтекателя позволило успешно завершить первые отечественные разработки обтекателей из кварцевой керамики для С-300. В качестве эластичного адгезива был выбран обычный герметик У1-18НТ, применявшийся ра-

нее по своему прямому назначению (как герметик и эластичная прокладка).

Сегодня разработан и внедрен в практику создания обтекателей принципиально новый подход – комплексный, заключающийся в том, что материал, технология и конструкция рассматриваются в тесной взаимосвязи и взаимообусловленности.

Повышение тактико-технических характеристик ракет по аэродинамическим нагрузкам предъявляет повышенные требования к прочности конструкции обтекателя. Для обтекателей ракет со скоростями полета 8 – 10 М проведенный анализ теплонапряженного состояния конструкции позволил установить некоторую характерную особенность. Теоретическим путем определены основные закономерности распределения изотермических линий и линий равных растягивающих напряжений по высоте оболочки и толщине ее стенки [4].

Установлено, что характерной особенностью обтекателей всех классов ракет является увеличение растягивающих напряжений от носка к основанию и от внешней поверхности к внутренней, а рост значений температур по изолиниям наоборот – от основания к носку и от внутренней к наружной поверхности (рис. 8, 9).

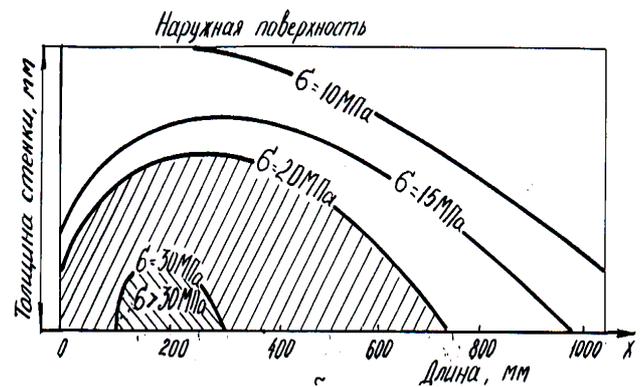


Рис. 8. Характерное распределение растягивающих напряжений в оболочке обтекателя

Разработана принципиально новая двуслойная конструктивная схема обтекателей с переменными по определенному закону толщинами слоев [5], на базе которой создан целый ряд обтекателей для ракет 9М82, ИС-1 и др. (рис. 10).

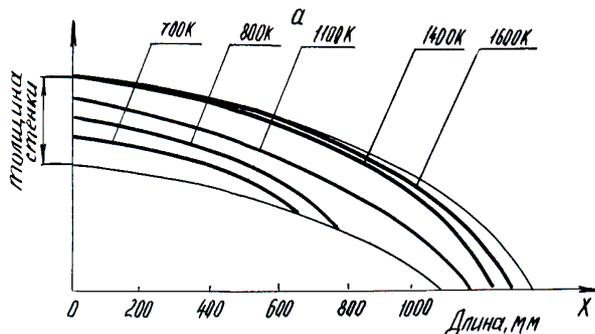


Рис. 9. Характерное распределение изотерм по толщине стенки и высоте обтекателей

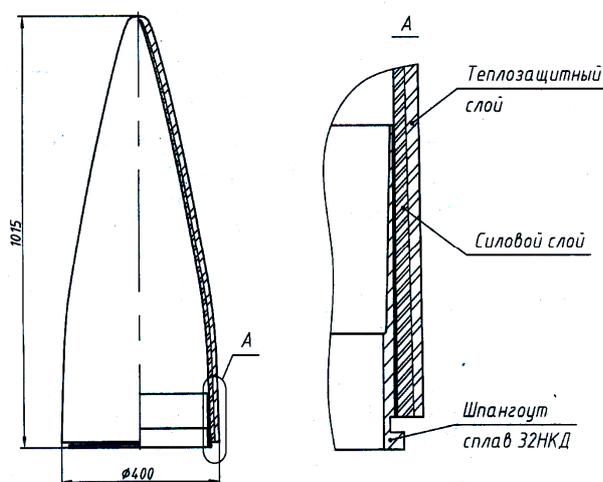


Рис. 10. Двуслойный обтекатель

Испытания создаваемых и серийно выпускаемых систем наведения с разработанными нами обтекателями показали, что комплексы наведения по точностным характеристикам, избирательности и помехозащищенности опередили аналогичные зарубежные образцы.

Тенденции в области конструирования перспективных обтекателей неразрывно связаны с развитием не только скоростей ЛА, но и с новыми направлениями в системах поиска целей и наведения ЛА на цель на конечном участке. Бурное развитие спутниковых систем контроля и целеуказания, лазерных систем наведения и наведения по топографии местности ведет к необходимости разработки новых принципов в проектировании и технологии произ-

водства оболочек, разработке новых моделей радиотехнического обеспечения конструкций в сочетании с аэродинамикой, теплозащитой и синтезом материалов.

Как уже отмечалось, огромное значение при разработке обтекателей играет подбор материалов оболочки и шпангоута по сравнимости значений ТКЛР. В связи с этим следует отметить, что наиболее перспективными материалами для шпангоутов является 32НКМБЛ и 32НКХБЛ [6] с наиболее низкими значениями ТКЛР в довольно широкой области температур от -50 до 350 °С, что видно из рис. 11.

Выводы

Дальнейшее развитие в области создания обтекателей для перспективных ракет немислимо без синтеза новых радиопрозрачных материалов с более высокими прочностными характеристиками, чем это достигнуто на сегодня в кварцевой керамике. Такими направлениями работ могут быть:

- 1) синтез материалов на основе BN, AlN, SiC и композиций на основе SiO_2 ;
- 2) дальнейшее улучшение характеристик стекло-керамики путем ионного упрочнения за счет химического насыщения кремнийорганическими полимерами спироциклического и крестообразного строения;
- 3) синтез новых материалов на основе никель-кобальт-железо.

Литература

1. Ромашин А.Г., Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Русин М.Ю. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов: Учебное пособие. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – 238 с.
2. Русин М.Ю. От технического задания на разработку – к экспорту обтекателей // Наука производству. – 1999. – № 9 (22). – С. 14 – 16.

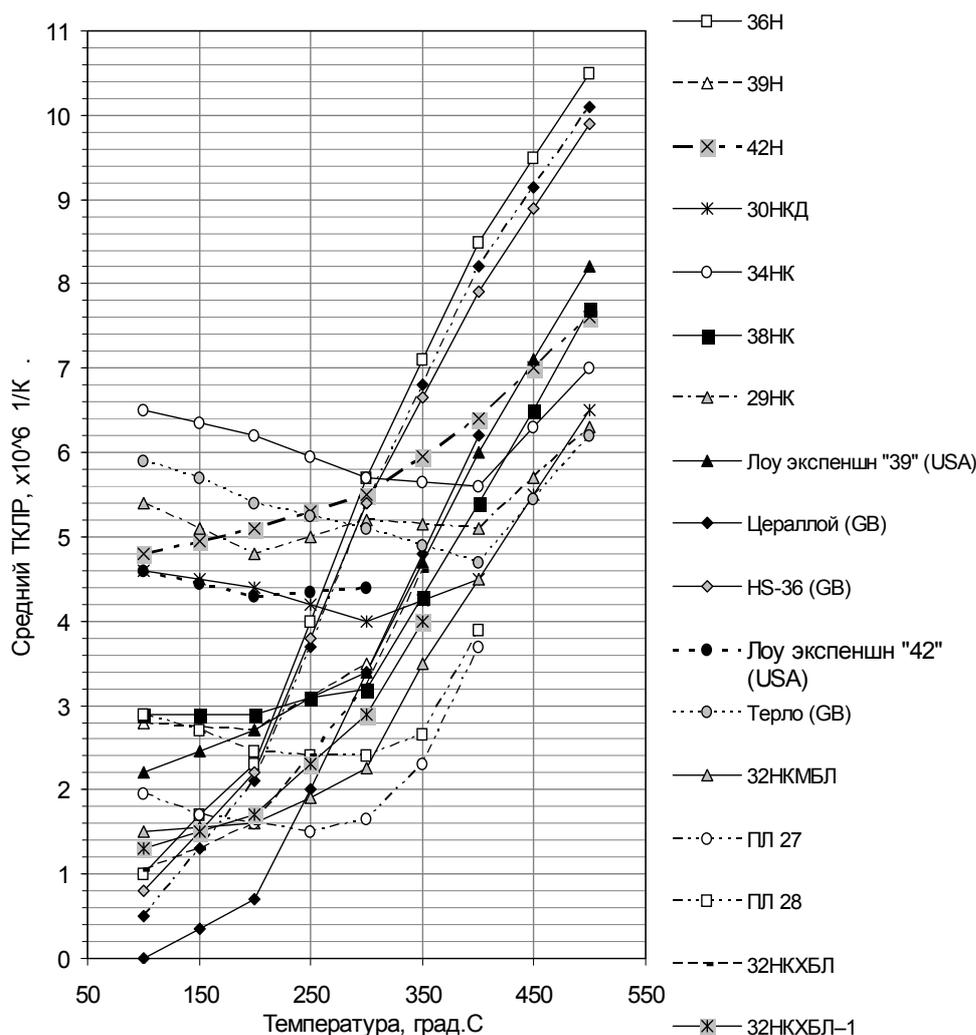


Рис. 11. Изменение ТКЛР сплавов от температуры

3. Русин М.Ю. К формированию научных основ производства радиопрозрачных обтекателей летательных аппаратов // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2003. – Вып. 35 (4). – С. 29 – 45.

4. Русин М.Ю. Прочность керамических конструкционных материалов // Вісник Східноукраїнського Нац. ун-ту. – Луганськ. – 2000. – № 8 (30). – С. 111 – 115.

5. Патент 2209494 Российская Федерация, МПК⁷ H 01Q 1/42. Головной антенный обтекатель ракеты / А.Г. Ромашин, М.Ю. Русин, П.И. Камнев,

Л.В. Големенцев и др.; заявл.09.04.02; опубл. 27.07.03. Бюл. № 21 // Изобретения. Полезные модели. – 2003. – № 21 III. – С. 621.

6. Патент 2183228 Российская Федерация, МПК⁷ C22C 38/52. Литейный сплав на основе железоникеля / М.Д. Харчук, С.В. Рабинович, В.И. Черменский, Русин М.Ю.; заявл. 02.11.00; опубл. 10.06.02. Бюл. № 16 // Изобретения. Полезные модели. – 2002. – № 16 II. – С. 233.

Поступила в редакцию 22.04.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.