

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ УЗЛА СОЕДИНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ОБТЕКАТЕЛЯ РАКЕТЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ШПАНГОУТОМ

Рогов Д.А.* , Латыш С.И., Васюков М.В.**

*Обнинское научно-производственное предприятие «Технология»,
Киевское шоссе, 15, Обнинск, Калужская обл., 249031, Россия*

** e-mail: rogov.dmitry.76@yandex.ru*

*** e-mail: fantol@yandex.ru*

Рассматриваются вопросы выбора конструкции узла соединения керамической оболочки с металлическим шпангоутом головного антенного обтекателя, удовлетворяющего условию минимума конструктивных переработок имеющегося аналога при сохранении всех геометрических размеров используемых деталей. Расчетным путем показан процесс отбора вариантов исполнения с последующей оптимизацией их геометрических параметров. Применение других конструкционных материалов, используемых в данной сборке, недопустимо по радиотехническим и массовым соображениям. Результаты расчетной оптимизации конструкции подтверждены натурными испытаниями макетных изделий.

Ключевые слова: летательный аппарат, ракета, керамика, обтекатель, узел соединения, оптимизация, проектирование.

К обтекателям антенн летательных аппаратов предъявляется сложный комплекс различных требований [1]. Особенно сильному воздействию обтекатели подвергаются во время скоростного полета (работы) летательного аппарата в плотных слоях атмосферы, во время которого условия нагружения как по температуре, так и по силовым факторам достигают своих предельных максимальных значе-

ний. На рис. 1 показана картина распределения наружного избыточного давления в процессе работы ракеты класса воздух-воздух (РВВ) [2].

Как видно из данного рисунка, значения давления в носовой части поверхности изделия могут достигать нескольких атмосфер, что приводит к возникновению в узле заделки оболочки изгибающего момента и продольной сжимающей силы,

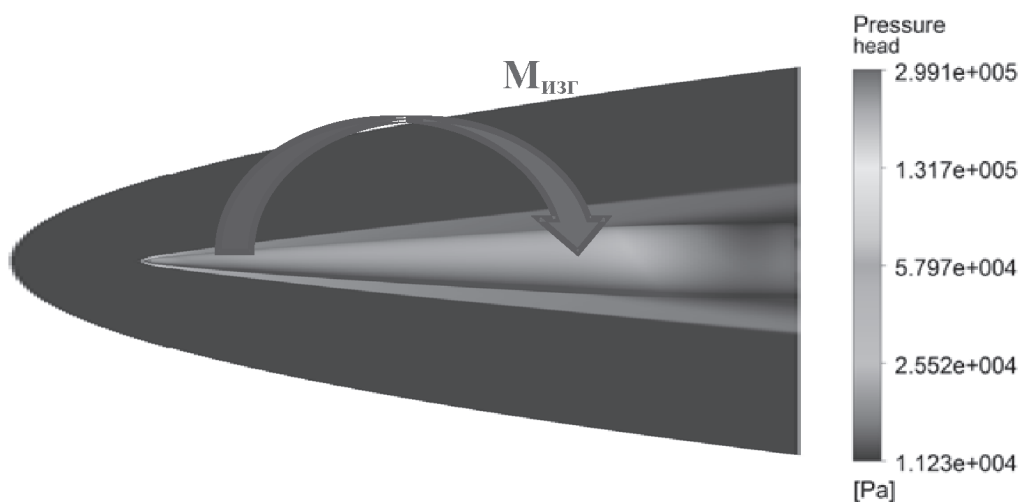


Рис. 1. Распределение внешнего избыточного давления по поверхности РВВ

величины которых в целом зависят от геометрии изделия и параметров движения. Одновременно с воздействием силовых факторов работоспособность конструкции головного обтекателя РВВ определяется температурами, которые возникают в ней при воздействии высокотемпературного аэродинамического нагрева. Для характерных скоростей движения ракет порядка 3–5 М соответствующие значения температур поверхности керамических материалов, наиболее часто используемых при производстве радиопрозрачных оболочек, достигают 600–1000 °С.

Несущая способность обтекателя в основном определяется сохранением целостности его оболочки, в большинстве случаев изготавливаемой из радиопрозрачных неметаллических материалов, например керамики (кварцевой, стеклокерамики, нитридной, алюмоксидной и т.д.) [3]. Главным недостатком подобных материалов является их повышенная хрупкость и в некоторых случаях низкая прочность на растяжение.

В свою очередь, уровень растягивающих напряжений в оболочке определяется величиной силовых факторов и напряжениями, возникающими в керамике как от неравномерности прогрева по толщине, так и в местах крепления оболочки на переходных металлических шпангоутах, выполняющих функцию разъемного соединения головного обтекателя с ответным отсеком ракеты.

В качестве материала оболочки по своим радиотехническим характеристикам была выбрана квар-

цевая керамика НИАСИТ, физико-механические свойства которой показаны в таблице.

Согласно данным, указанным в таблице, значение предела прочности на растяжение и значение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) для кварцевой керамики невелики.

Физико-механические свойства керамики НИАСИТ

Коэффициент теплопроводности	1 Вт/м·С
Плотность	2000 кг/м ³
Теплоемкость	1130 Дж/кг·С
Предел прочности на растяжение	25 МПа
ТКЛР	$0,7 \cdot 10^{-6} 1/С$

ТКЛР НИАСИТ отличается более чем в 10 раз от ТКЛР титанового сплава ВТ-20 и почти в три раза от ТКЛР инварового сплава 32НКД, применяемого в качестве материала внутреннего шпангоута. Такая разница в физико-механических свойствах склеиваемых материалов на участке крепления керамической оболочки с внутренним инваровым шпангоутом вызывает при прогреве последнего рост растягивающих напряжений в керамике, способных вызвать ее разрушение.

Общий вид обтекателя и применяемые в его конструкции материалы показаны на рис. 2.

Характерный режим нагрева изделия класса воздух-воздух показан на рис. 3.

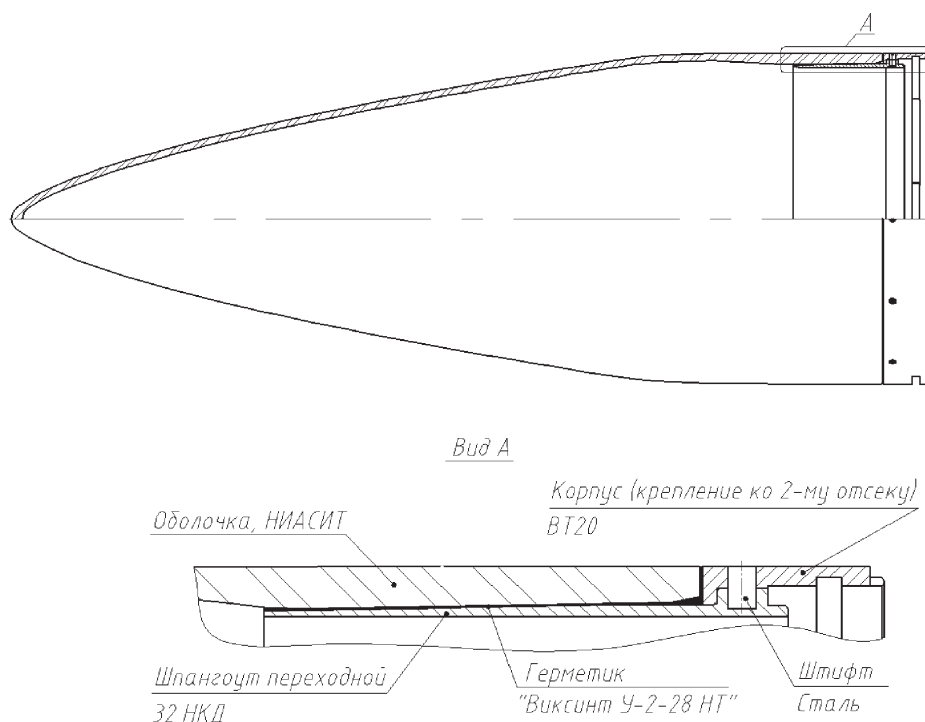


Рис. 2. Эскиз обтекателя и материалы, применяемые в конструкции: 1 — оболочка НИАСИТ; 2 — герметик «Виксинт У-2-28»; 3 — переходной шпангоут 32НКД; 4 — корпус (крепление ко 2-му отсеку) ВТ-20

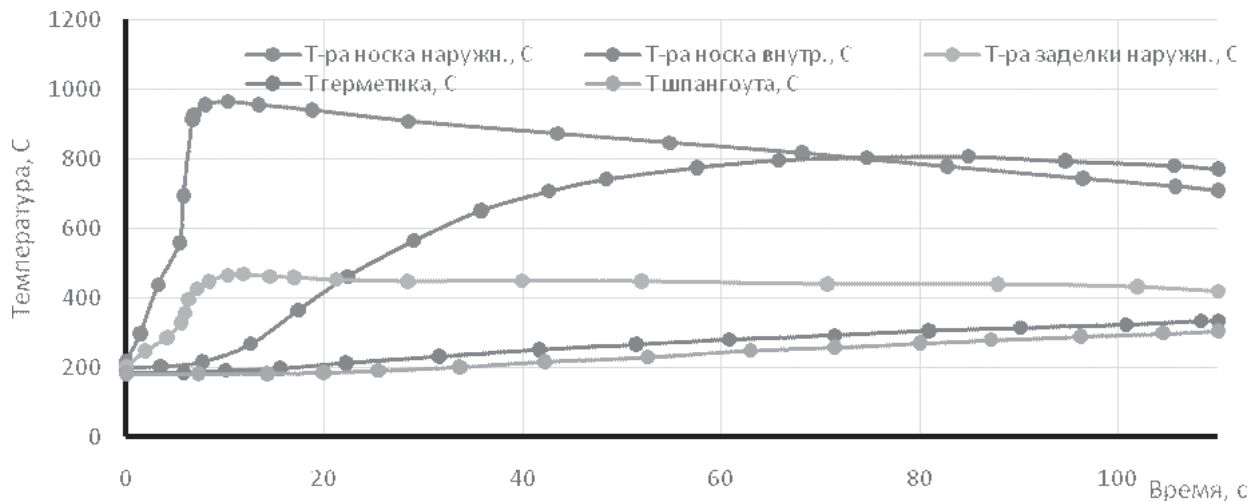


Рис. 3. Зависимость температуры керамики и шпангоута от времени

Для реализации конструкции на первоначальном этапе отработки рассматривался вариант исполнения, показанный на рис. 2. Предварительно были проведены расчетные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) изделия. По расчетным данным, напряжения в керамической оболочке при максимальном темпе нарастания температуры (на 10-й секунде) не превышают предельно допустимых $[\sigma]_{\text{раст}} = 25$ МПа, однако на окончании режима (~ 110-я секунда) напряжения, вызванные одновременным воздействием изгибающего момента, продольной сжимающей силы и внутреннего распора от прогрева инварового шпангоута, превышают соответствующее значение $[\sigma]_{\text{раст}}$. Результаты расчета представлены на рис. 4 и 5, на которых показаны расчетные картины распределения первых главных напряжений в керамической оболочке на 10-й и 110-й секундах соответственно. Расчеты выполнены в конечно-элементной (КЭ) постановке с помощью программного

комплекса Ansys Mechanical v.14.5 (лицензионный договор №050413-03). Точность расчетных исследований при применении КЭ-методов сильно зависит от правильности постановки задачи и выбора расчетной схемы [4].

Натурное моделирование режима нагрева (см. рис. 3) с одновременным силовым воздействием подтвердило результаты КЭ-моделирования в плане недостаточной надежности конструкции и отсутствия запаса прочности по напряжениям. Макетные изделия разрушались в разные моменты времени, располагавшиеся на конечных точках режима.

Так как стоимость каждого натурального макетного изделия на этапе отработки очень высока, а также в связи с корреляцией расчетов и результатов испытаний было принято решение о дальнейшей отработке конструкции изделия на вариантах, в основе которых лежит узел соединения, аналогичный рассмотренному выше.

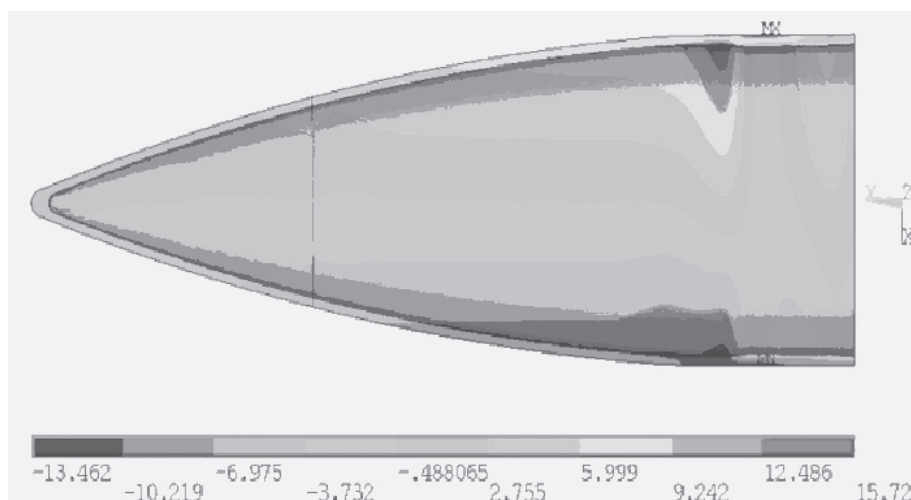


Рис. 4. Первые главные напряжения σ_1 в керамике, МПа (10-я секунда режима)

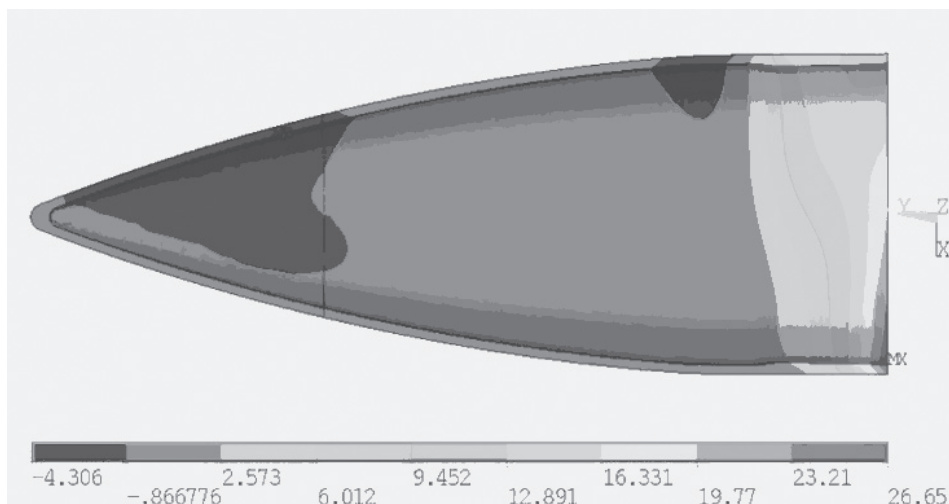
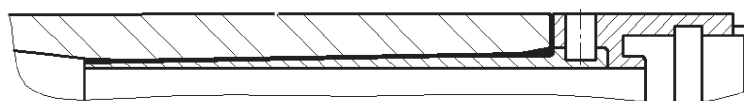


Рис. 5. Первые главные напряжения σ_1 в керамике, МПа (110-я секунда режима)

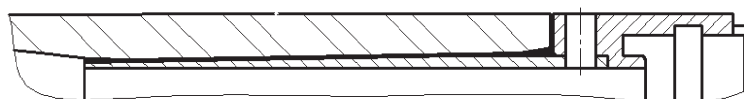
Было рассмотрено несколько вариантов исполнения внутреннего инварового шпангоута в части его крепления в титановом корпусе — через фиксирующие радиальные штифты (12 штук, равномерно по окружности), допускающие в нормальном состоянии свободное расширение корпуса из ВТ-20 без влияния на внутренний элемент из 32НКД. Одним из недостатков штифтового соединения разнородных материалов является возможное защемле-

ние самих штифтов, на которые приходится наибольшие усилия при передаче нагрузок от силовых факторов. При этом защемленный штифт вызывает дополнительное формоизменение внутреннего инварового шпангоута за счет несимметричного растяжения его титановым корпусом с большим ТКЛР.

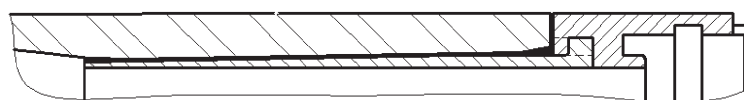
Представленные на рис. 6 варианты исполнения №2 и №3 относятся к штифтовому типу соедине-



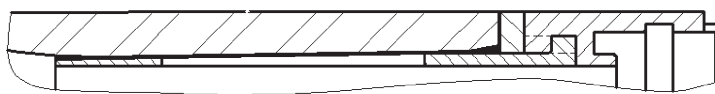
Вариант №2. Шпангоут переходной выполнен в виде кольца с бобышкой в основании, отсутствует выступ в торцевой части.



Вариант №3. Шпангоут переходной выполнен в виде кольца. Сквозная установка штифтов.



Вариант №4. Байонетное соединение шпангоута переходного с корпусом.



Вариант №5. Байонетное соединение шпангоута переходного с корпусом. В шпангоуте переходном выполнены прорези. Дополнительно установлено кольцо опорное.

Рис. 6. Варианты узлов заделки, предложенные на рассмотрение

ния. При детальной проработке и исследовании ранее разработанных изделий был предложен вариант байонетного закрепления «внутренний шпангоут-титановый корпус» (№4). Такой вариант соединения обеспечивает сопряжение деталей в продольном (осевом направлении — от силовых нагрузок) и позволяет им свободно перемещаться относительно друг друга при радиальном расширении его составных частей.

Расчеты НДС показали значительное снижение растягивающих напряжений в керамической оболочке варианта №4 (по сравнению с ранее рассмотренными вариантами), однако запас по напряжениям был недостаточен для того, чтобы полностью гарантировать работоспособность изделия.

Одним из конструкторских решений по снижению величины распора при прогреве внутреннего шпангоута из сплава 32НКД с большим (по сравнению с керамикой) ТКЛР является снижение его жесткости в области склейки с оболочкой. Главными элементами снижения жесткости шпангоута в окружном направлении являются продольные прорези [5], позволяющие материалу шпангоута свободно расширяться в окружном направлении без стеснения деформаций, и, следовательно, без изменения своего поперечного круглого сечения в радиальном направлении. Величина максимальных растягивающих напряжений в керамике определяется количеством прорезей, протяженностью зоны склейки без прорезей (при наличии такой зоны), а также расстоянием от края прорезей до керамики. Величина максимальных растягивающих напряжений в керамике в окружном направлении не может быть ниже меридиональных напряжений от растяжения шпангоутом через клеевой подслои и в основном определяется упругими характеристиками клея-герметика.

Вариант исполнения с байонетным креплением к титановому корпусу внутреннего инварового шпангоута и выполненными в нем продольными пазами (прорезями) также показан на рис. 6 (узел №5).

Результаты расчётных исследований

Для определения оптимальных параметров геометрии узла заделки проводились расчетные исследования температурных полей и распределения напряжений в керамической оболочке. Для вышеуказанных вариантов исполнения примеры результатов расчетов КЭ-методами (ANSYS) представлены на рис. 7—10.

По результатам расчетных исследований можно сделать следующие выводы:

1) для вариантов узлов №№1-4 с расположенным в непосредственной близости к торцу оболочки контактным соединением переходного шпангоута с корпусом характерны высокие распорные напряжения в оболочке в зоне сжатия. Для варианта №1 со штифтовым соединением переходного шпангоута с корпусом показано, что заземление одного из штифтов в зоне сжатия приводит к увеличению распорных напряжений в оболочке на $\approx 25\%$ по сравнению с расчетным случаем, когда заземление штифтов не учитывается;

2) максимальные растягивающие напряжения для всех вариантов исполнения достигаются на наружной поверхности оболочки в зоне склейки. Несущая способность оболочки из кварцевой керамики НИАСИТ может быть повышена путем ее пропитки с наружной стороны метилфенилспироксидом (МФСС -8);

3) дальнейшая проработка вариантов исполнения должна проводиться с целью снижения уровня растягивающих напряжений в керамике области сжатия [6];

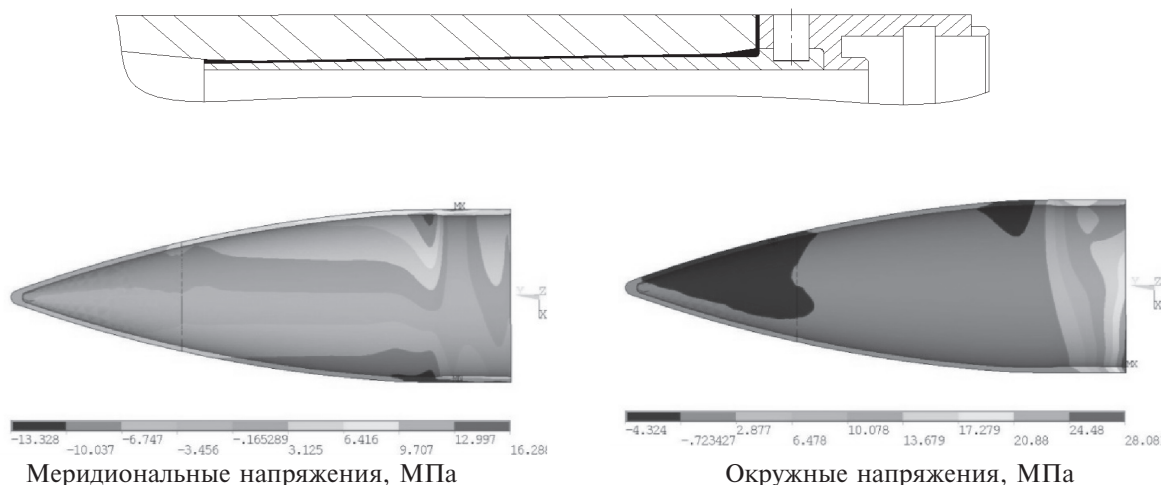


Рис. 7. Напряжения в керамической оболочке (110-я с), МПа. Вариант исполнения №2

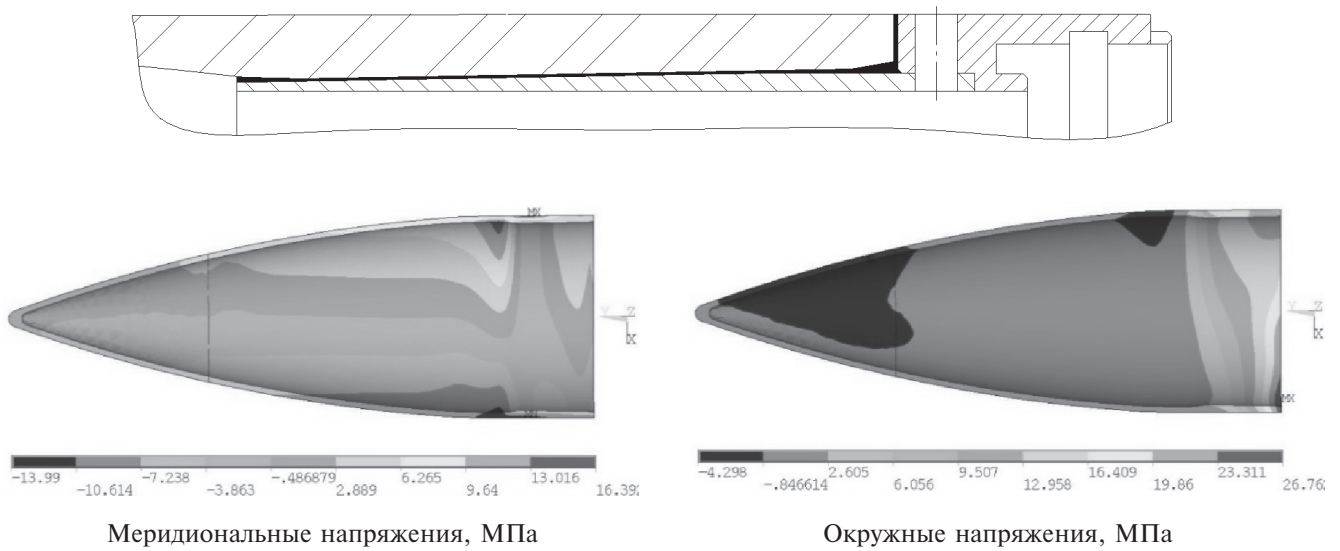


Рис. 8. Напряжения в керамической оболочке (110-я с), МПа. Вариант исполнения №3

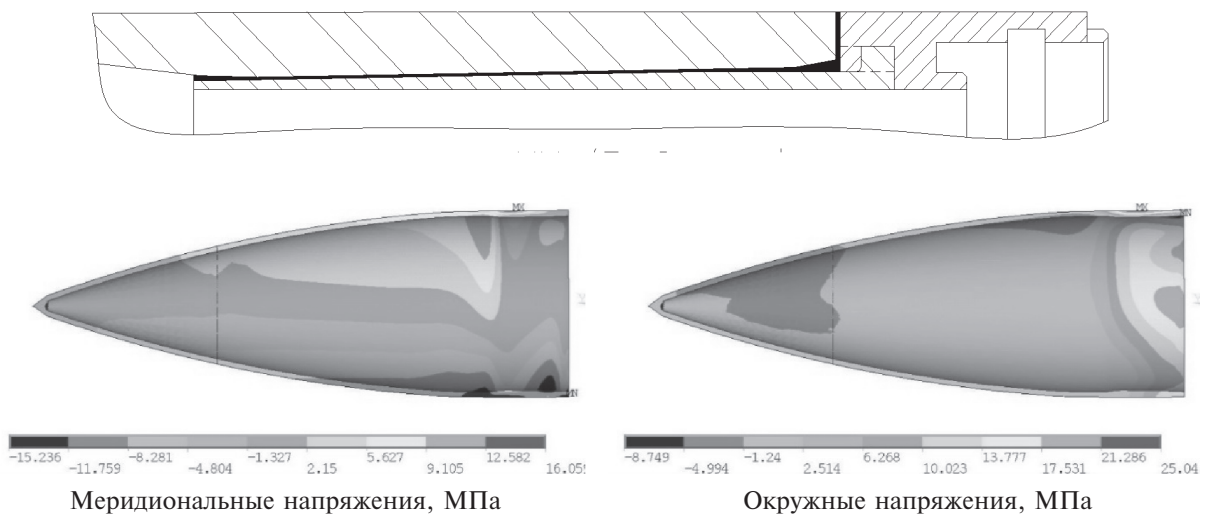


Рис. 9. Напряжения в керамической оболочке (110-я с), МПа. Вариант исполнения №4

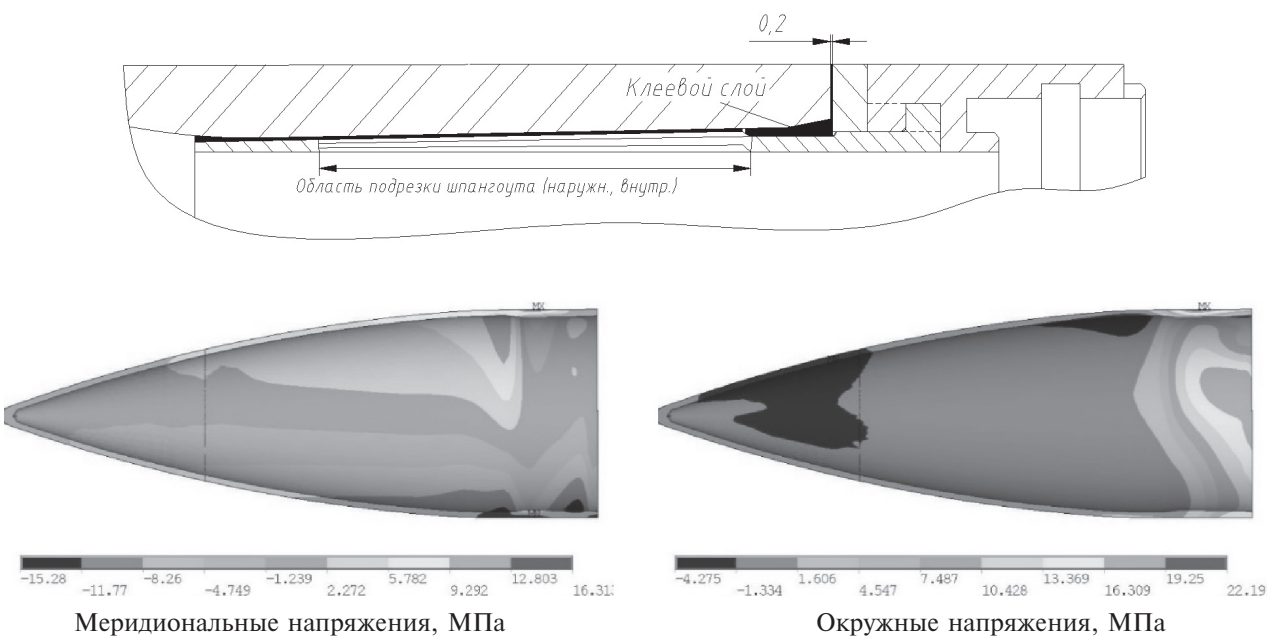


Рис. 10. Напряжения в керамической оболочке (110-я с), МПа. Вариант исполнения №5

4) одновременно следует рассмотреть конструкции корпусов, выполненных из других материалов, кроме титанового сплава ВТ-20, так как расчетным путем показано, что применение в качестве материала корпуса сталей 45, 12Х18Н10Т с более высоким (по сравнению с титановым сплавом ВТ-20) модулем упругости E приводит к снижению напряжений в оболочке;

5) должна быть проведена дальнейшая оптимизация (варианты №№4, 5) с целью снижения уровня растягивающих напряжений в оболочке в зоне растяжения. При выполнении расчетов будут установлены конструкционные параметры и элементы, влияющие на уровень напряжений в оболочке: напуск в торцевой части оболочки, оптимальные клеевые зазоры по торцевым поверхностям элементов конструкции (оболочка, кольцо упорное, корпус), локальные проточки, а также пазы и их оптимальное количество в шпангоуте переходном.

Результаты макетных исследований

Проведенными испытаниями была подтверждена работоспособность изделий конструкций вариантов исполнения №№4 и 5 (см. рис. 6) с оболочками из кварцевой керамики НИАСИТ с объемной пропиткой составом МФСС-8 при воздействии знакопеременных высокочастотных нагрузок, климатических факторов (повышенная влажность, термоциклирование от -50 до $+150$ °С), повторно-статических нагрузок, статических нагрузок с нагревом по заданным тепловым режимам, а также при воздействии нагрева по заданным максимальным режимам эксплуатации.

Однако при проведении испытаний на герметичность изделий (одно из условий функционирования антенного обтекателя как защитной оболочки) с приведенными на рис. 9 и 10 узлами соеди-

нения четырех изделий из десяти, собранных для испытаний, не соответствовали требованиям ТЗ по заданному уровню герметичности.

Определение причин отсутствия герметичности в изделиях с указанным узлом соединения велось по трем направлениям:

— отсутствие герметичности в сборных шпангоутах по месту байонетного соединения входящих в его состав деталей;

— отсутствие герметичности в собранных изделиях из-за наличия в шпангоуте сквозных продольных пазов в непосредственной близости к зоне напуска и к плоскости установки технологических дистанционных прокладок, обеспечивающих заданный торцовый зазор;

— отсутствие герметичности в оболочках из-за наличия пор, не закрытых при объемной пропитке составом МФСС-8.

После дополнительной герметизации большинство изделий стали соответствовать требованиям по герметичности, однако в одном изделии достичь заданных требований по герметичности не удалось.

После испытаний изделий их шпангоуты были подвергнуты разборке, в ходе которой определялось состояние герметика и качество его заполнения пазов, проточек и пространства в сопрягаемых деталях шпангоутов. При разборке деталей было выявлено:

— герметик свободно отделяется от поверхностей металлических деталей, фрагменты герметика из пазов и проточки кольца упорного извлекаются без затруднений, разборка шпангоутов производится легко от руки, без нагрева шпангоута и применения приспособлений для разборки;

— в извлеченных из пазов фрагментах герметика имеются обширные воздушные полости (рис. 11), образование которых может происходить как в про-

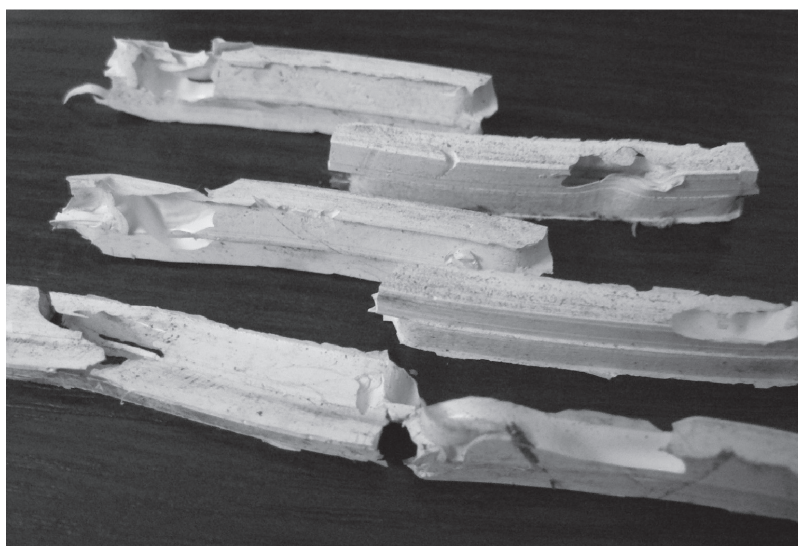


Рис. 11. Наличие воздушных полостей в фрагментах герметика, извлеченных из пазов шпангоута

цессе полимеризации герметика, так и при заполнении пазов герметиком при сборке шпангоутов.

С учетом полученных при разборке шпангоутов результатов было решено внести дополнения в техпроцесс сборки изделия с применением герметика «Виксинт» У-2-28 в части предварительной обработки подслоями сопрягаемых поверхностей и определения параметров полимеризации клея-герметика, минимизирующих образование в нем пор.

С учетом наличия несоответствий изделий и оболочек требованиям разработки по герметичности в дальнейшем особое внимание уделялось ее проверке на изделиях.

Результаты испытаний на герметичность изделий и проверка состояния герметика в пазах байонетного соединения шпангоутов данных изделий указывают на необходимость обеспечения герметичности шпангоутов:

— либо технологическим путем — с ужесточением требований к сборке шпангоутов, разработке и изготовлению специальной оснастки для заполнения пазов герметиком и проверке на герметичность каждого шпангоута после сборки, что является нежелательным в условиях последующего серийного производства;

— либо конструктивным путем — с изменением конструкции шпангоута.

После анализа достоинств и недостатков конструкции шпангоута планируется разработка уточненного варианта, в котором будут учтены:

— обеспечение герметичности изделия вне зависимости от условий сборки шпангоута;

— обеспечение минимальных напряжений в керамической оболочке;

— обеспечение минимальной массы шпангоута;

— уменьшение количества подлежащих сборке с применением герметика деталей, упрощение сборки шпангоута (предлагаемый усовершенствованный вариант конструкции шпангоута).

Выводы

1. С учетом результатов исследовательских испытаний макетных изделий класса воздух-воздух проведено уточнение конструкции шпангоута изделия и определение максимальных напряжений в оболочке для конструкции изделия в составе со шпангоутом уточненной конструкции. Применение в конструкции изделия шпангоута уточненной конструкции наряду с обеспечением герметичности способствует снижению массы изделия и напряжений в керамической оболочке, улучшается технологичность сборки шпангоута.

2. На режиме длительностью 110 секунд максимальная температура прогрева внутреннего переходного шпангоута составляет от 220 °С (у торца оболочки) до 340 °С (в тонкой части шпангоута). Максимальные растягивающие напряжения в оболочке от воздействия температуры составляют 15 МПа, максимальные растягивающие напряжения воздействия силовых факторов не превышают 9,5 МПа. Суммарные максимальные растягивающие напряжения в оболочке в конце режима составляют 17,3 МПа в окружном направлении и 15,85 МПа — в меридиональном.

3. С учетом выводов по п.п. 1 и 2 планируется принять предложенную конструкцию шпангоута и произвести ее доработку с целью определения оптимальных геометрических параметров и выработки технологического процесса, который обеспечит удовлетворение всех требований технического задания на разработку изделия.

Библиографический список

1. Ромашин А.Г., Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Русин М.Ю. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. — Харьков: Изд-во «ХАИ», 2003. — 239 с.
2. Волкинд Д.К., Рогов Д.А. Напряженно-деформированное состояние обтекателя высокоскоростного ЛА // Пользовательская конференция ANSYS2013: Труды междунар. науч.-техн. конф. (15-17 июня 2013г.). - М., 2013. С. 78-80.
3. Русин М.Ю. Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов: Учеб. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — 64 с.
4. Бруяка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А. и др. Инженерный анализ в Ansys Workbench. Ч. 1. — Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. — 271 с.
5. Суздальцев Е.И., Хора А.Н., Куракин В.И. Пат. 2005/2258283, МПК 7 Н 01 Q 1/42 Узел соединения керамической оболочки с внутренним металлическим шпангоутом /Бюл. №28,опубл. 10.08.2005.
6. Рогов Д.А., Коваленко П.В. Задача многопараметрической оптимизации конструкции соединения керамической оболочки с металлическим корпусом летательного аппарата // Новые огнеупоры. 2014. №10. С. 24-30.

DEVELOPMENT AND DESIGN CHOICE OF CERAMIC ROCKET FAIRING AND METAL BULKHEAD JOINT

Rogov D.A.* , Latysh S.I., Vasyukov M.V.**

*Obninsk Research and Production Enterprise "Technologiya",
15, Kievskoe shosse, Obninsk, Kaluga region, 249031, Russia*

*e-mail: rogov.dmitry.76@yandex.ru

**e-mail: fantol@yandex.ru

Abstract

The paper considers problems of selection of the joint of ceramic shell and metal bulkhead of nose antenna dome, that meets the condition of available analog design rethink minimum, while maintaining all the geometric dimensions of parts used. We show by calculations the process of design styles selection with further optimization of their geometrical parameters. Application of the other constructional materials used for a given assembly is inadmissible on radio engineering and mass considerations. The results of computational optimization have been proved by the field tests of prototype items.

Based on the results of the prototype air-to-air missile tests, the frame design has been corrected, and the maximum stresses in the ceramic shell of the fairing with the frame of corrected design have been determined. Application of modified frame together with the maintenance of air-tightness contributes to the product weight saving and stresses reduction in the ceramic shell, as well as improves the production effectiveness of the frame assembly.

At operation mode of 110 s duration maximum temperature of the inner attachment frame heating changes from 220 °C (at the shell edge) to 340 °C (in a thin part of the frame). The maximum tensile stress in the shell caused by the temperature is 15 MPa, and the maximum tensile stress caused by the force factors does not exceed 9.5 MPa. The total maximum tensile stress in the shell at the end of the operation mode is 17.3 MPa in the circumferential direction and it is 15.85 MPa in the meridian direction.

With all abovementioned taken into account, we recommend to accept the proposed design of the frame and to refine it with the aim to determine optimal geometrical parameters and develop the technological process which will make it possible to meet all the requirements of the frame design specification.

After analysis of frame design advantages and disadvantages, we plan to develop a new variant of the frame design with the following positive characteristics of previously analyzed structures, which will provide:

- air-tightness regardless of the frame assembly conditions;
- minimum stress in the ceramic shell;
- minimum frame weight;
- fewer parts to be assembled with the use of the sealant, simplified frame assembly.

Keywords: aircraft, missile, ceramic, fairing shell, frame assembly, optimization, designing.

References

1. Romashin A.G., Gaidachuk V.E., Karpov Ya.S., Rusin M.Yu. *Radioprozrachnye obtekateli letatel'nykh apparatov* (Radiotransparent fairing of aircraft), Kharkov, KhAI, 2003, 239 p.
2. Volkind D.K., Rogov D.A. *Trudy XX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii ANSYS 2013*, Moscow, 2013, pp. 78-80.
3. Rusin M.Yu. *Proektirovanie golovnykh obtekatel'ei raket iz keramicheskikh i kompozitsionnykh materialov* (Design of rocket head fairings made of ceramic and composite materials), Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2005, 64 p.
4. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A. *Inzhenernyi analiz v Ansys Workbench* (Engineering analysis in Ansys Workbench), Samara, Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010, part 1, 271 p.
5. Suzdal'tsev E.I., Khora A.N., Kurakin V.I. *Patent RU 2258283*, 10.08.2005.
6. Rogov D.A., Kovalenko P.V. *Novye ogneupory*, 2014, no. 10, pp. 24-30.