

УДК 629.764.023

Канд. техн. наук В. Г. Данченко, Е. И. Шевцов, канд. техн. наук В. В. Гусев

СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ МАССЫ ЛОКАЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ОТСЕКОВ РАКЕТ ВАФЕЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Рассмотрен новый метод оптимизации массы отсеков ракет вафельной конструкции, опирающихся при эксплуатации на локально расположенные стояночные опоры, разработанный авторами. Метод позволяет за счет более рационального распределения материала в конструкции в соответствии с действующей нагрузкой уменьшить массу отсеков до 20%.

Розглянуто розроблений авторами новий метод оптимізації маси відсіків ракет вафельної конструкції, які обпираються під час експлуатації на локально розташовані стоянкові опори. Метод дозволяє за рахунок більш раціонального розподілу матеріалу в конструкції відповідно до діючого навантаження зменшити масу відсіків до 20%.

The paper addresses a new, authors- developed method of mass optimization of rocket bays of wafer structure bearing during operation on locally disposed parking supports. The method allows, due to more rational distribution of materials in the structure in accordance with acting load, decreasing the mass of bays by up to 20%.

Введение

Возрастающие требования к улучшению массово-энергетических характеристик ракет вызывают необходимость поиска новых нетрадиционных решений снижения массы конструкции и минимизации затрат на изготовление.

Так, стоянка ракеты на пусковой установке (ПУ) с традиционным локальным опиранием на четыре силовых кронштейна (рис. 1) характеризуется неравномерностью нагружения корпуса хвостового отсека (ХО) преимущественно вафельной конструкции, при котором максимальные погонные сжимающие усилия сосредоточены в локальных зонах опирания.

Предлагаемый метод снижения массы отсеков вафельной конструкции, нагруженных локально, основан на уменьшении площади подкрепления участков оболочки и стыковочных шпангоутов, расположенных вне зон нагружения сосредоточенными силами.

Известны несколько методов оптимизации массы оболочек.

В [1] снижение массы обеспечивается изготовлением вафельных ячеек с минимальными допусками по отклонениям толщин ребер и полотна. Такое решение, во-первых, существенно удорожает конструкцию, во-вторых – не обеспечивает

существенного снижения массы из-за малой чувствительности силового набора к его конструктивно-технологическим несовершенствам.

В [2] снижение массы достигается изменением шага расположения продольных и кольцевых ребер. Такая технология достаточно сложна, так как содержит большой объем фрезерных операций, осуществляемых вручную.

Снижение массы при реализации упомянутых методов не превышает 10%.

Анализ конструкций вафельных оболочек показал, что оболочки и шпангоуты, в том числе нагруженные локально, изготавливали с равномерной жесткостью по периметру [3], а участки, имеющие люки и сварные швы, ослабляющие конструкцию, выполняли с усилением подкрепления, что сопровождалось неоправданным завышением массы конструкции.

Постановка задачи

Обобщение результатов оптимизации массы конструкции за счет более рационального в зависимости от нагрузки распределения конструкционного материала в вафельных обечайках и стыковочных шпангоутах.

Особенности проектирования и изготовления облегченных отсеков

Проектирование и изготовление оболочек вафельных ХО уменьшенной массы проводятся в два этапа [4].

На первом этапе определяются зоны локального нагружения оболочек. Люки и сварные швы располагаются вне упомянутых зон нагружения, а размеры ячеек полок шпангоутов и окантовок люков выполняются из условия прочности и устойчивости конструкции при равномерно распределенной нагрузке.

На втором этапе в локальных зонах нагружения оболочки оставляются сектора увеличенной (расчетной) жесткости с первоначальными размерами ребер стенки полотна в ячейках и полках шпангоутов, а в соседних с ними участках отсека фрезеровкой уменьшается толщина стенки полотна в ячейках в 1,6–2 раза, а окантовок люков – в 1,2–1,5 раза по сравнению с первоначальными размерами (рис. 2-4).

Сектора повышенной жесткости выполняются в зонах нагружения отсека площадью от 6 до 10% каждый относительно его общей площади. Поверхности секторов при этом разделяются по высоте на два одинаковых участка, на верхнем из которых уменьшается фрезеровкой толщина стенки полотна в ячейках в 1,2 – 1,4 раза по сравнению с толщиной аналогичной стенки нижних участков.

В менее нагруженных зонах полки карманов верхнего и нижнего шпангоутов фрезеровкой также уменьшаются в местах стыковочных отверстий в 1,2–1,4 раза, а в промежутках между ними – в 2,3–2,5 раза (рис. 5).

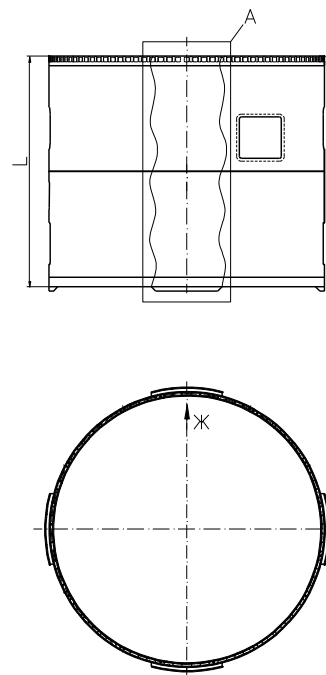


Рис. 1. Хвостовой отсек, состоящий из двух полукорпусов и четырех усиленных участков опирания

Приведенные конструктивно-технологические улучшения позволяют существенно снизить массу отсека при обеспечении его прочности и устойчивости.

Результаты расчетов

Возможность снижения массы хвостового отсека вафельной конструкции за счет более рационального распределения материала конструкции при обеспечении его прочности подтверждается сравнением результатов расчетов инженерной методики, применяемой на этапе проектирования, и метода конечно-элементного определения напряженно-деформированного состояния конструкции.

Таблица 1
Распределение напряжений в зоне и вне зоны действия локальной нагрузки

Обозначение поясов напряжений в отсеке на длине L	Критические напряжения $N_{кр}$, кгс/см/см, по длине L корпуса ХО		
	в зонах секторов повышенной жесткости на длине L_0	в переходных зонах на длине от $0,2 L_0$ до $0,3 L_0$	в зоне минимальных нагрузок на длине $1,5 L_0$
Нижний 1	$1,0 N_{кр}(1600)$	$0,28 N_{кр}$	$0,14 N_{кр}$
Средний 2	$0,6 N_{кр}$	$0,30 N_{кр}$	$0,14 N_{кр}$
Верхний 3	$0,38 N_{кр}$	$0,31 N_{кр}$	$0,14 N_{кр}$

В соответствии с данными табл. 1 мак-

симальные значения напряжений $N_{кр}$ (зона 1) имеют место в нижней части отсека над стояночными кронштейнами. Длина этих участков (секторов повышенной жесткости) соответствует длине L_0 кронштейна, а высота пояса – $1/3$ высоты L отсека. В среднем поясе отсека над кронштейном (зона 2) значение напряжений составляет $0,6 N_{кр}$, а в верхнем (зона 3) – $0,38 N_{кр}$ на высоте $1/3 L$ каждый.

В переходных зонах (4) длиной от $0,2 L_0$

до $0,3L_0$, расположенных по обе стороны от зон максимальных напряжений, действующие нагрузки составляют $\sim 0,3 N_{кр}$ и существенно не отличаются от напряжений в зонах (5) минимальных нагрузок, которые составляют $0,14 N_{кр}$. Поэтому толщины элементов конструкции, расположенные вне зон действия локальных нагрузок, могут быть уменьшены при обеспечении прочности отсека.

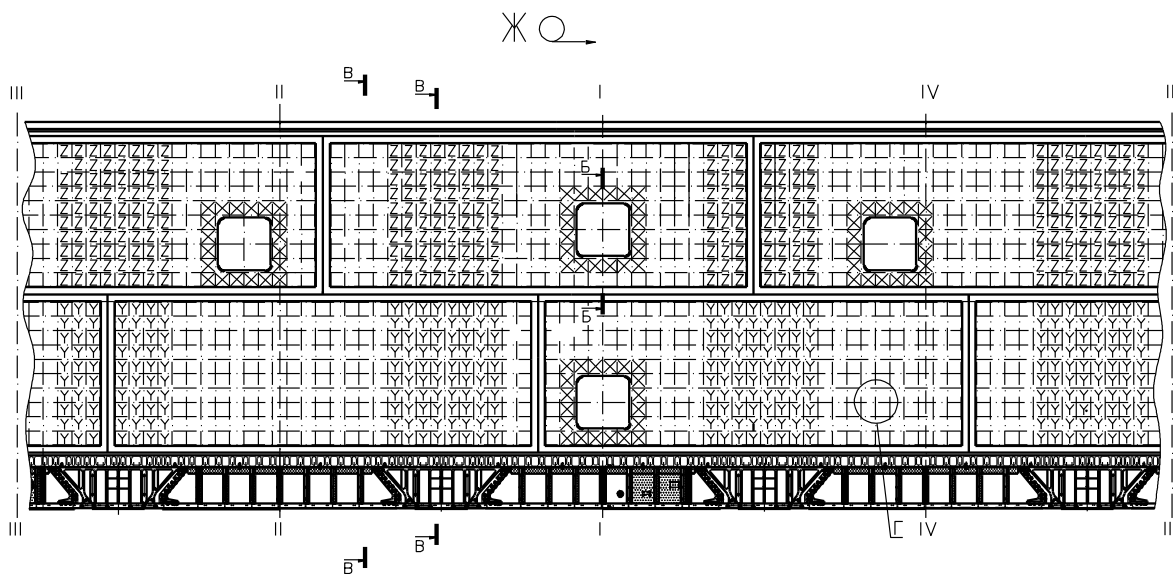


Рис. 2. Развертка ХО уменьшенной массы с выделенными буквами Y и Z участками (секторами повышенной жесткости) действия локальной нагрузки над стояночными кронштейнами

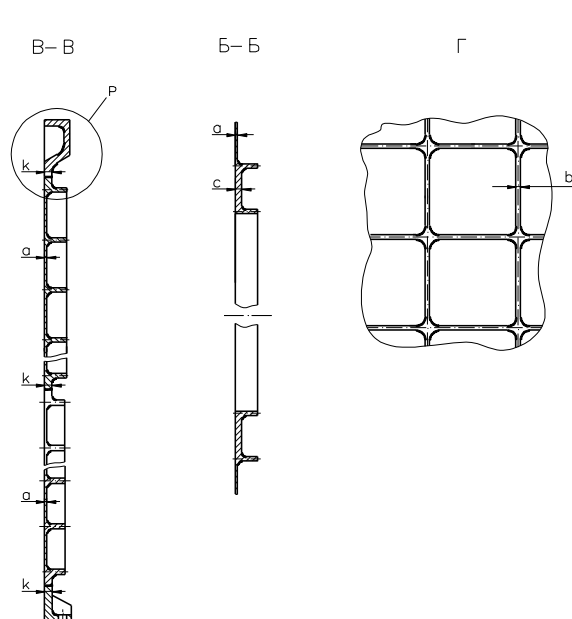


Рис. 3. Продольный разрез ХО (В-В), в том числе по луку (Б-Б), конструкция вафельной ячейки (Г)

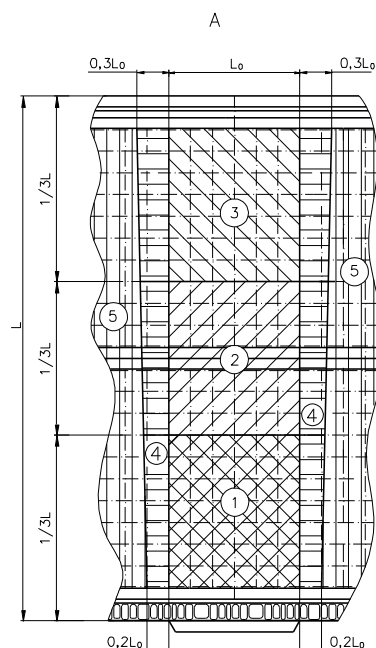


Рис. 4. Схема распределения критических напряжений в зоне и вне зоны действия локальной нагрузки

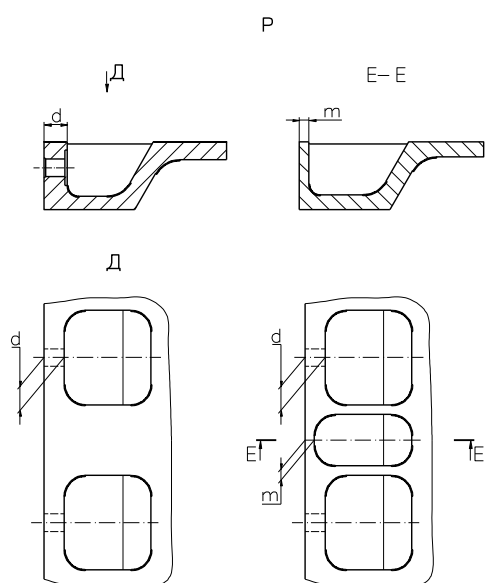


Рис. 5. Конструкция шпангоута корпуса ХО, текущая слева и облегченная справа

Критерием устойчивости облегченного ХО является его соответствие допустимому коэффициенту запаса устойчивости η , определяемому как отношение критического погонного усилия к действующему погонному усилию для случая расчетных нагрузок при стоянке. Конструкция имеет достаточный запас устойчивости, если $\eta(X, \varphi) \geq 1$:

$$\eta(X, \varphi) = N_{кр}(X, \varphi) / N(X, \varphi),$$

где $\eta(X, \varphi)$ – коэффициент запаса устойчивости в зоне нагружения отсека с координатами X, φ ;

$N(X, \varphi)$ – значение продольного погонного усилия, соответствующего действующей расчетной нагрузке на ХО, определяемое методом конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции;

$N_{кр}(X, \varphi)$ – критическое значение продольного погонного усилия;

X – продольная координата, отсчитываемая от нижнего торца ХО;

φ – угловая координата, отсчитываемая от оси стояночного кронштейна.

Распределение погонных сжимающих усилий в ХО текущей конструкции при его нагружении продольной силой через четыре стояночных кронштейна длиной в кольцевом направлении 32° и значение критического погонного усилия при равномерном сжатии показаны на рис. 6.

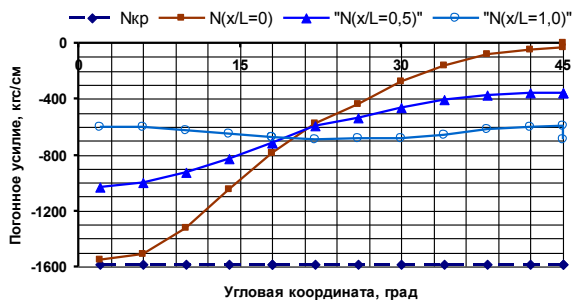


Рис. 6. Изменение погонных сжимающих усилий в поперечных сечениях ХО регулярной конструкции

Распределение погонных сжимающих усилий в нижнем и верхнем полукорпусах ХО облегченной конструкции и значения критических погонных усилий в разных зонах нагружения показаны на рис. 7, 8.

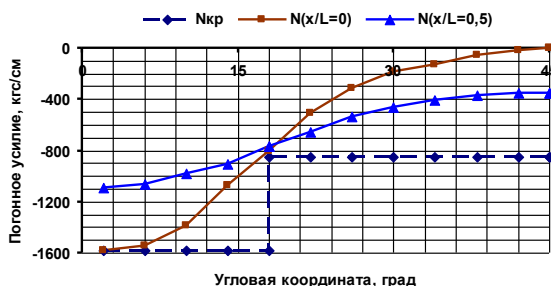


Рис. 7. Изменение погонных сжимающих усилий в поперечных сечениях нижнего полукорпуса ХО уменьшенной массы

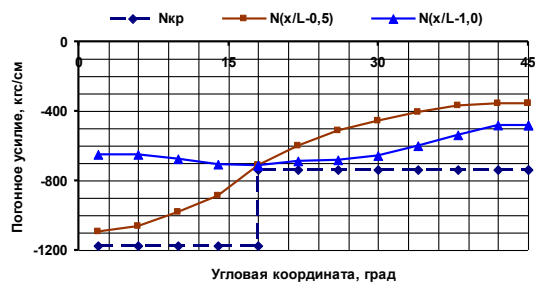


Рис. 8. Изменение погонных сжимающих усилий в поперечных сечениях верхнего полукорпуса ХО уменьшенной массы

Силовая схема усиленной зоны нижнего полукорпуса отсека при этом не отличается от силовой схемы текущей конструкции. Расчетные толщины элементов текущей и облегченной конструкции ХО: стенок ячеек (а), продольных ребер жесткости (б), окантовок люков (с), концевых участков стыков обечайки под сварку (к), полок торцевых шпангоутов (д, м) ХО – представлены на рис. 3, 5 и соответствующие им расчетные коэффициенты запаса прочности η – в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные толщины элементов текущей и облегченной конструкции

Зона нагружения		Толщина <i>a</i> стенок ячеек, мм	Толщина <i>b</i> продольных ребер, мм	Толщина <i>k</i> законцовок, мм	Толщина <i>c</i> окантовок, мм	Толщина <i>d, m</i> полки шпангоутов, мм	$N_{кр}$, кгс/см	N , кгс/см	η	
Исходная (текущая) конструкция										
Нижняя обечайка	над опорой	5,0	8,5	13,0	–	17,0	17,0	1680	1650	1,02
	вне опоры	5,0	8,5	13,0	13,0	17,0	17,0	1680	790	2,12
Верхняя обечайка	над опорой	5,0	8,5	13,0	–	17,0	17,0	1680	850	1,97
	вне опоры	5,0	8,5	13,0	13,0	17,0	17,0	1680	720	2,33
Облегченная конструкция										
Нижняя обечайка	над опорой	5,0	8,5	13,0	–	16,0	7,0	1680	1680	1,0
	вне опоры	2,7	8,5	13,0	9,5	14,0	7,0	850	830	1,02
Верхняя обечайка	над опорой	4,0	6,0	11,0	–	14,0	7,0	1170	1100	1,06
	вне опоры	2,7	6,0	11,0	9,5	12,0	7,0	740	730	1,01

Каждый из двух полукорпусов отсека имеет зоны повышенной жесткости над

стояночными кронштейнами и зоны облегчения между ними.

При изготовлении алюминиевого ХО вафельной конструкции диаметром 3,9 м, высотой 3,2 м и начальной массой 1100 кг уменьшение массы отсека после фрезеровки участков между зонами нагружения в соответствии с толщинами, приведенными в табл. 2, составило 220 кг, что соответствует 20% экономии массы.

Выводы

Сравнение напряженно-деформированного состояния текущей и облегченной конструкций ХО показало:

1. Характер распределения сжимающих погонных усилий, действующих на корпус ХО по мере удаления от плоскости стыка с ПУ, становится более равномерным, а их значения уменьшаются. В нижней части локальных зон нагружения над четырьмя опорами значения напряжений составляют $1 N_{кр}$, а на высоте ХО 3,2 м – $0,38 N_{кр}$. Между локальными зонами значения напряжений в нижней и верхней частях ХО составляют $0,14 - 0,3 N_{кр}$, т. е. втрое ниже, чем в локальных зонах над опорами.

2. Введение в конструкцию отсека зон облегчения с уменьшенными толщинами элементов подкрепления не привело к существенному изменению топографии вафельного поля и увеличению максимальных погонных усилий в нагруженной зоне. Прочность и устойчивость облегченного ХО с учетом действия на него всех видов эксплуатационных нагрузок обеспечиваются при значительно меньшей массе конструкции.

3. Увеличенная (расчетная) площадь подкрепления отсека выполняется только в ограниченных зонах действия максимальных нагрузок, суммарная площадь которых составляет примерно 35% общей площади. Уменьшение дополнительной фрезеровкой на площади 65% между зонами нагружения толщин элементов конструкции – стенок полотна в ячейках подкрепляющих ребер, люков окантовок, полок шпангоутов – позволяет до 20% снизить массу отсека и при этом минимизировать затраты на облегчение конструкции, сведя их главным образом к корректировке ком-

пьютерной программы для управления станком.

4. Снижение массы конструкции корпуса ХО достигнуто за счет более рационального распределения конструкционного материала [4] в вафельных обечайках и стыковочных шпангоутах, при этом общие габаритные размеры корпуса ХО и конфигурация его интерфейсов не изменяются.

Список использованной литературы

1. Линник А. К. Конструирование корпусов жидкостных баллистических ракет. – Днепропетровск: ДГУ, 1994. – С. 65, 66.
2. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1985. – С.14, 93.
3. Джур Е. А., Вдовин С. И. и др. Технология производства космических ракет. – Днепропетровск: ДГУ, 1992. – С. 35, 36.
4. Пат. 112339 Україна, МПК F_{D2} К 9/32 (2006.1), F_{D2} К 9/60 (2006/1), B_{G4} G 1/22 (2006.1). Спосіб виготовлення полегшених відтисків вафельної конструкції, що навантажуються локально /В. Г. Данченко, Є. І. Шевцов, В. В. Гусев (Україна); Заявник і власник ДП «КБ «Південне». – № а 201408785; Заявлено 04.08.2014; Опубл. 25.08.2016, Бюл. № 16.

Статья поступила 27.06.2017