

А. М. Тонконоженко, В. Ю. Кожарин, канд. техн. наук Г. Ю. Мартыненко,
канд. техн. наук М. В. Чернобрышко, д-р техн. наук К. В. Аврамов

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ КРЕПЛЕНИЯ БРОСКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КАССЕТНОЙ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ ПРИ НАЗЕМНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Предложен эффективный подход в технологии отработки ракетных конструкций, основанный на методе численного моделирования, позволяющий до начала экспериментальной отработки проводить виртуальные эксплуатационные испытания по проверке работоспособности штатных конструкций и прогнозировать проблемные вопросы. Метод реализован на базе компьютерных моделей, разработанных в среде программного комплекса ANSYS Workbench. На основе предложенного метода проведены виртуальные испытания сложной механической системы крепления бросковых элементов кассетной головной части в условиях температурных и циклических воздействий, возникающих при наземной транспортировке ракеты. Разработаны расчетные модели, критерии и практические технологии испытаний, необходимые для анализа механического состояния и прогноза работоспособности реальной конструкции головной части. При этом расчетные модели учитывают все конструктивные и технологические особенности конструкции: компоновку креплений бросковых элементов, начальное напряженно-деформированное состояние системы после затяжки резьбовых соединений, трение между составными элементами системы и их взаимное смещение, зависимость от температуры физико-механических характеристик и предельных напряжений материалов. Для заданных режимов нагружения при наземной эксплуатации головной части определены наиболее опасные расчетные случаи, которые реализованы при проведении виртуальных испытаний. По результатам испытаний проведен статический анализ механического состояния, прочности и условий, обеспечивающих работоспособность реальной конструкции крепления при эксплуатационных уровнях температурных и циклических воздействий. Результаты виртуальных испытаний подтверждают работоспособность системы крепления бросковых элементов кассетной головной части. Они внедрены в практику предприятия на этапе конструкторской разработки.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, расчетные модели, наземная эксплуатация, механическое состояние, работоспособность.

Запропоновано ефективний підхід у технології відпрацювання ракетних конструкцій, який ґрунтується на методі числового моделювання, що дозволяє до початку експериментального відпрацювання проводити віртуальні експлуатаційні випробування для перевірки працездатності штатних конструкцій і прогнозувати проблемні питання. Метод реалізовано на базі комп'ютерних моделей, розроблених у середовищі програмного комплексу ANSYS Workbench. На основі запропонованого методу проведено віртуальні випробування складної механічної системи кріплення кидкових елементів кассетної головної частини в умовах температурних і циклічних впливів, що виникають під час наземного транспортування ракети. Розроблено розрахункові моделі, критерії та практичні технології випробувань, які необхідні для аналізу механічного стану та прогнозу працездатності реальної конструкції головної частини. При цьому розрахункові моделі враховують усі конструктивні і технологічні особливості конструкції: компонування кріплення кидкових елементів, початковий напружено-деформований стан системи після затягування нарізних з'єднань, тертя між складовими елементами системи та їх взаємне зміщення, залежність від температури фізико-механічних характеристик і граничних напруг матеріалів. Для заданих режимів навантаження під час наземної експлуатації головної частини визначено найнебезпечніші розрахункові випадки, які реалізовано під час проведення віртуальних випробувань. За результатами випробувань проведено статичний аналіз механічного стану, міцності й умов, що забезпечують працездатність реальної конструкції кріплення на експлуатаційних рівнях температурних і циклічних впливів. Результати віртуальних випробувань підтверджують працездатність системи кріплення кидкових елементів кассетної головної частини. Їх запроваджено у практику підприємства на етапі конструкторського розроблення.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, розрахункові моделі, наземна експлуатація, механічний стан, працездатність.

This paper describes the effective approach for the technology of the rocket airframe development testing, based on the method of numerical modelling, which enables the virtual experimental runs prior to the beginning of the development testing to check the performance of the standard airframes and predict issues of concern. The method is realized based on the computer models developed in the ANSYS Workbench environment. Based on the offered method the complex mechanical system, which attaches the cluster projectiles in the conditions of the temperature exposure and heat cycling, underwent the virtual tests. Computational models, criteria and test procedures necessary for the analysis of the mechanical condition and prediction of the performance of the actual airframe of the warhead were developed. Moreover, computational models consider all the design and technological features of the airframe: layout of the projectiles attachments, initial stress-strain state of the system after the tightening of the threaded connections, friction between the components of the system and their mutual displacement, temperature dependence of the physical and mechanical characteristics and ultimate stress of materials. For the specified loading conditions during the ground operations with the warhead, the most dangerous computational cases are determined which have been implemented during the virtual tests. Test results were used to conduct the static analysis of the mechanical condition, strength and conditions for performance of the actual structure of the attachment under the impact of the operating levels of temperature exposure and heat cycling. Results of the virtual tests confirm the performance of the projectiles attachment system and are introduced into production in the phase of engineering development.

Keywords: computer modelling, computational models, ground operations, mechanical condition, performance.

Введение

На этапе экспериментальной отработки систем крепления бросковых элементов кассетной головной части (КГЧ) необходима комплексная проверка работоспособности штатной конструкции в условиях циклических и температурных воздействий, возникающих при наземной эксплуатации ракеты. Натурные экспериментальные исследования значительно увеличивают сроки и стоимость проводимых работ. В связи с этим особую важность приобретает возможность проведения до начала натурной отработки виртуальных испытаний, чтобы определить проблемные вопросы для обеспечения работоспособности конструкции и доработать ее при необходимости.

Предлагается метод компьютерного анализа, позволяющий численным моделированием проводить виртуальные испытания по исследованию работоспособности ракетных конструкций. Метод практически реализован с целью анализа работоспособности и механического состояния систем крепления бросковых элементов КГЧ при нагружении в условиях наземной эксплуатации штатной конструкции. Этот метод базируется на двух этапах исследований.

Первый этап включает в себя анализ всех эксплуатационных нагрузок и температурных режимов, позволяющий определить максимальные нагрузки. Для рассматриваемой конструкции был проведен анализ всех возможных при наземной эксплуа-

тации нагрузок на предмет нахождения самых опасных их конфигураций и максимальных значений [1, с. 331], что позволило определить расчетные случаи, которые в полной мере дадут возможность сделать выводы о работоспособности рассматриваемого изделия во время эксплуатации.

Расчетные случаи для температурных режимов определяли на основании анализа максимальной и минимальной температур при эксплуатации. Виртуальные испытания проводили как для предельных случаев, так и для номинальных условий эксплуатации.

На втором этапе исследований проводили виртуальный эксперимент по проверке работоспособности сложной конструкции систем креплений для выбранных расчетных случаев нагружения в статической постановке. Выводы о работоспособности конструкции были сделаны на основе численного анализа механического состояния всех элементов систем креплений. Анализ механического состояния креплений включает в себя комплексное исследование напряженно-деформированного состояния (НДС), вызванного рядом факторов: технологическими особенностями сборки конструкции, напряженным состоянием элементов креплений в рабочем диапазоне температур и механическими нагрузками (перегрузками) при наземной эксплуатации. Анализ работоспособности и усталостной прочности систем крепления бросковых элементов КГЧ при максимальном

режиме циклического нагружения проведен на основании определения средних и амплитудных значений напряжений и расчета по ним предельных значений напряжений.

Определение расчетных случаев и моделей

Рассматриваемая конструкция приведена на рис. 1



Рис. 1. Ракетная конструкция

Компьютерные модели и программные расчетные модули разработаны в универсальной системе конечно-элементного анализа ANSYS Workbench (рис. 2).

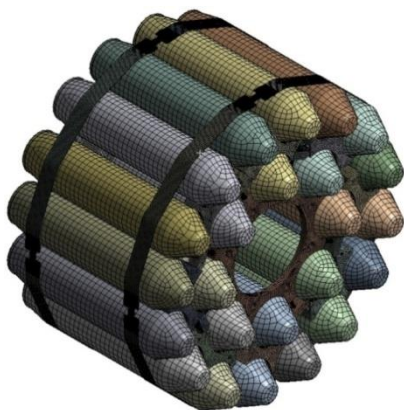


Рис. 2. Конечно-элементная модель ракетной конструкции

Рассмотрим более подробно конструкцию болтового соединения бросковых элементов первого яруса. На рис. 3 представлена геометрическая модель этого соединения. Втулка 4 неразрывно соединена с ложементом первого яруса. Соединение шайбы 1 с элементом прижима 2 моделируется с учетом трения. Болт 3 имеет момент затяжки 0,85 кгс·м (8,338 Н·м).

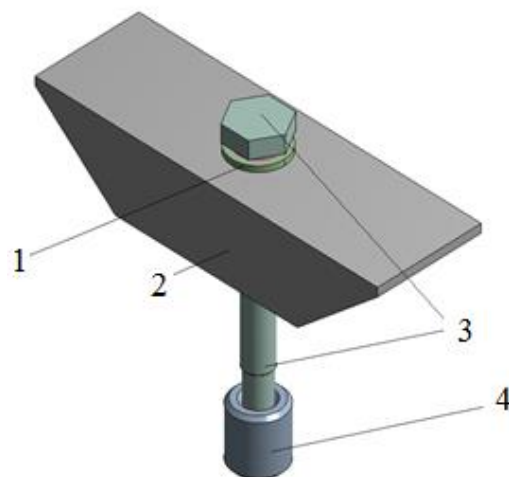


Рис. 3. Схема болтового соединения:
1 – шайба; 2 – элемент прижима; 3 – болт; 4 – втулка

Закрепление бросковых элементов второго яруса осуществляется крепежной лентой. Части крепежной ленты соединены шпилечным соединением, показанным на рис. 4. Лента 1 переходит в шпилечные соединения 2 и 4. Центральная часть болтового соединения имеет шпильку 3. Момент затяжки шпильки равен 2,25 кгс·м (22,073 Н·м).

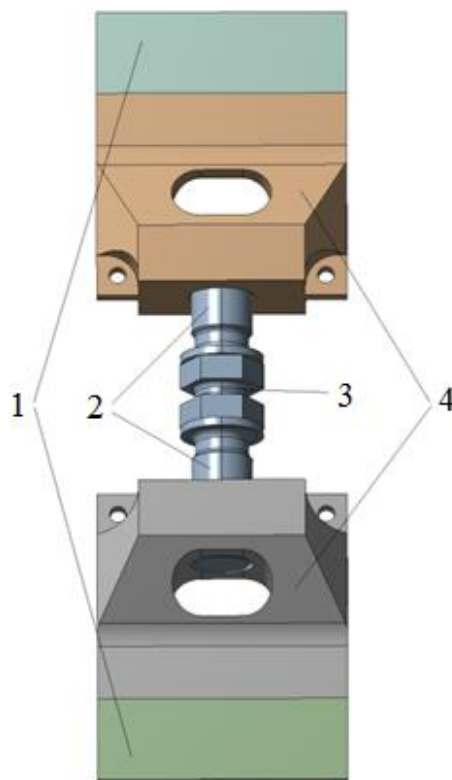


Рис. 4. Схема соединения крепежной ленты:
1 – лента; 2, 4 – шпилечные соединения; 3 – шпилька

При численном моделировании определяют НДС ракетной конструкции (рис. 1), вызванное затяжкой болтовых соединений (рис. 3) и стяжкой шпилечного соединения крепежной ленты (рис. 4). Также при моделировании сборки элементов конструкций (рис. 1) учитывают коэффициент трения в парах [2, 3]

– покоя, μ_0 :

а) "сталь-сталь" – 0,15;

б) "сталь-алюминий" – 0,61;

– скольжения (сухого), μ :

а) "сталь-сталь" – 0,1;

б) "сталь-алюминий" – 0,47.

Напряженное состояние конструкции, вызванное сборкой, рассматривается в качестве начальных условий для всех последующих этапов численного анализа работоспособности.

Под проверкой работоспособности системы крепления бросковых элементов при эксплуатационных воздействиях предполагается:

– проверка возможности «выскальзывания» бросковых элементов из соединений;

– проверка условий упругой работы конструкции при эксплуатационных нагрузках, что подтверждает прочность системы крепления и сохранность начальных уровней затяжки резьбовых соединений.

Исследуются три расчетных случая, которые определяются температурными режимами: -40 , $+20$ (нормальные условия) и $+50^\circ\text{C}$. Расчеты проводят по этим режимам с учетом зависимости всех физико-механических свойств материалов от температуры (модулей упругости, плотности, коэффициентов Пуассона, линейного расширения, трения и др.) и предельных уровней напряжений, учтенных в условиях прочности (пределов текучести, прочности).

Первый расчетный случай требует выполнения прочностного связанного анализа только при действии нагрузок затяжки и температурного деформирования [4]. Для второго и третьего расчетных случаев к этим нагрузкам добавляются перегрузки заданных значений в различных направлениях. Во втором расчетном случае рассматривается действие только продольных перегрузок. Этот случай является наиболее кри-

тичным для оценки работоспособности конструкции при возможном «выскальзывании» бросковых элементов из креплений. Выводы о работоспособности конструкции, то есть о надежности крепления бросковых элементов КГЧ в прижимах и лентах, возможны на основе анализа напряжений в штифтах, которые вставлены в ложементы и на которые опираются бросковые элементы, а также по осевым перемещениям самих бросковых элементов.

Анализ работоспособности и механического состояния систем крепления бросковых элементов КГЧ в рабочем диапазоне температур

Конечно-элементная модель, созданная для проведения анализа напряженного состояния конструкции при нагреве до температур -40 , $+20$ и $+50^\circ\text{C}$ и представляющая собой 1/8 геометрической модели, показана на рис. 5. Расчетная модель учитывает затяжку резьбовых соединений и циклическую симметрию конструкции [5].

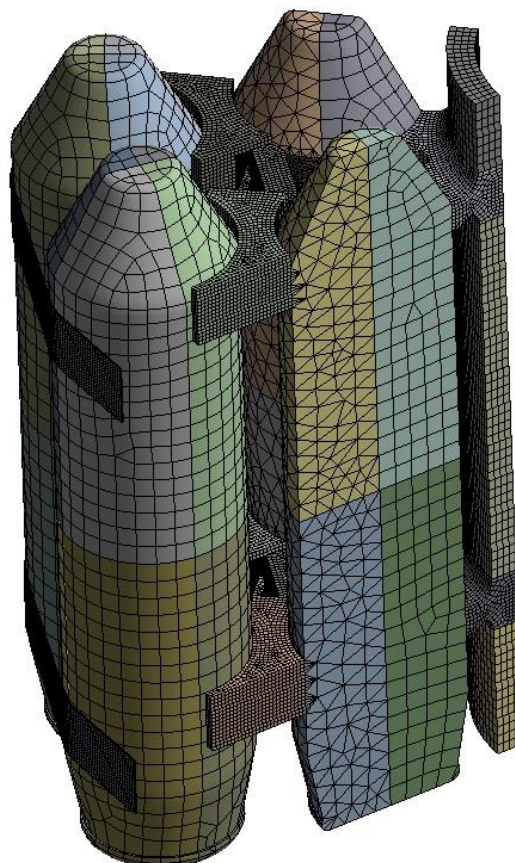


Рис. 5. Конечно-элементная модель для проведения анализа напряженного состояния при нагреве

На рис. 6 показаны эквивалентные по Мизесу напряжения в резьбовых соединениях креплений бросковых элементов первого яруса.

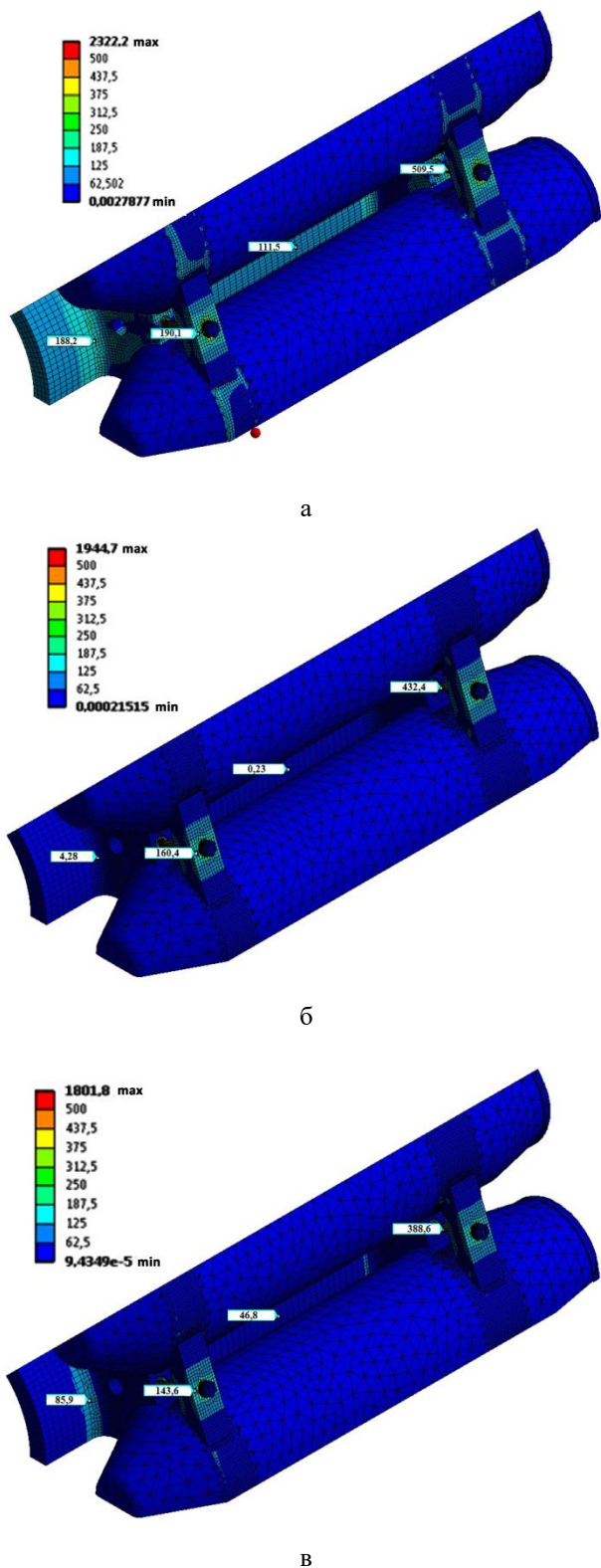


Рис. 6. Напряжения в первом ярусе при температурах: а) -40°C ; б) $+20^{\circ}\text{C}$; в) $+50^{\circ}\text{C}$

Анализ результатов исследований показал, что для всего рабочего диапазона температур напряжения превышают значения предела текучести только в локальной зоне под шайбой болта прижима бросковых элементов. Эти напряжения возникают при сборке конструкции, что приводит к локальному смятию материала, не влияющему на общую прочность крепежных элементов. Во всех остальных элементах конструкции деформирование происходит в упругой области, что соответствует критериям ее работоспособности.

На рис. 7 показаны эквивалентные по Мизесу напряжения в крепежных лентах, а на рис. 8 – в шпилечных соединениях лент.

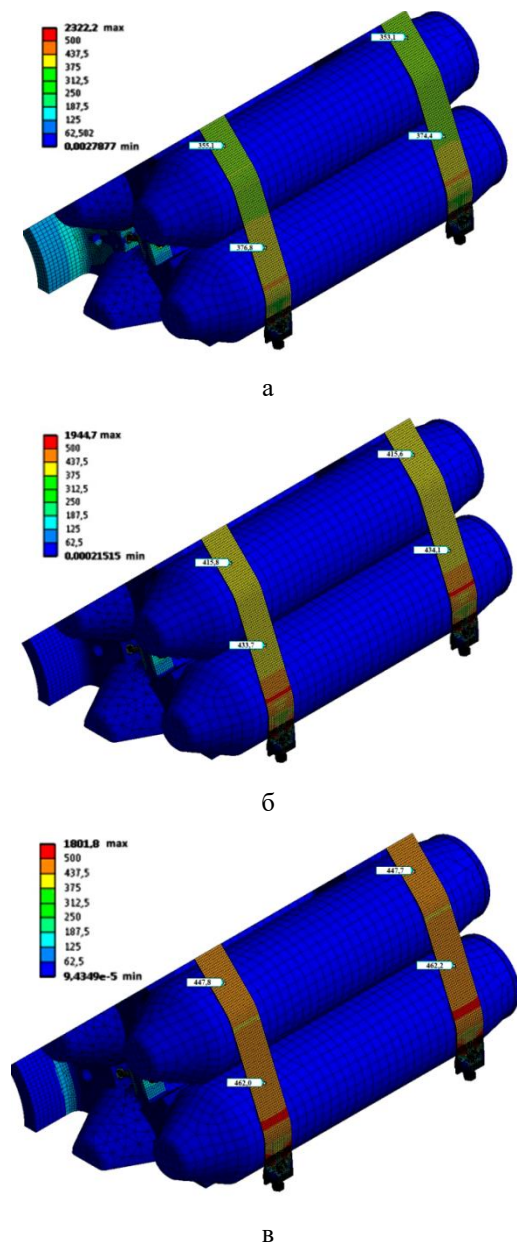
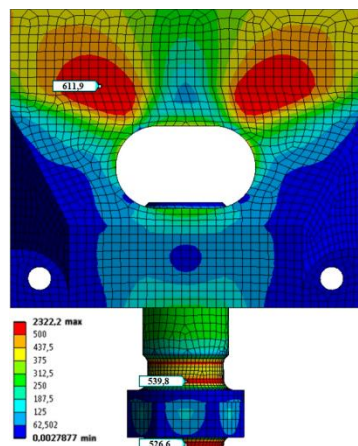
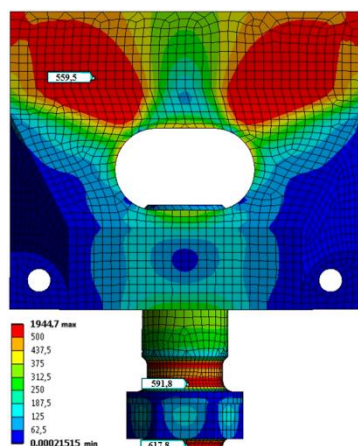


Рис. 7. Напряжения во втором ярусе при температурах: а) -40°C ; б) $+20^{\circ}\text{C}$; в) $+50^{\circ}\text{C}$

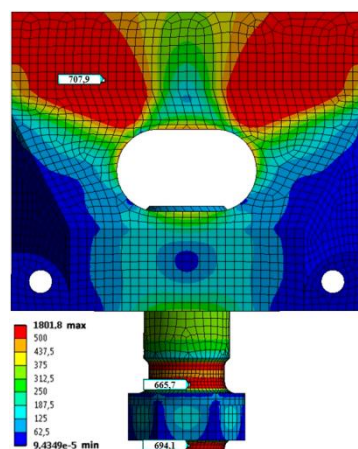
По результатам расчета можно сделать вывод, что напряжения от температурных воздействий не приводят к возникновению пластических деформаций в элементах крепления бросковых элементов второго яруса.



а



б



в

Рис. 8. Эквивалентные напряжения в замке при температурах: а) -40°C ; б) $+20^{\circ}\text{C}$; в) $+50^{\circ}\text{C}$

Обобщенные результаты численного анализа напряженного состояния конструкции в рабочем диапазоне температур представлены в табл. 1. На основании расчетных данных, представленных в ней, можно сделать выводы по данному расчетному случаю.

Таблица 1

Напряжения по Мизесу в зависимости от температур

Элемент конструкции	Напряжения при -40°C , МПа	Напряжения при $+20^{\circ}\text{C}$, МПа	Напряжения при $+50^{\circ}\text{C}$, МПа
Лента	375	435	462
Шпилька	540	590	670
Болт	509	433	388
Прижим	190	160	143
Труба	111	1	47
Сварное соединение	190	5	86

При повышении температуры напряжения в ленте и шпильке возрастают, в болте и прижиме понижаются, а в трубе и ее сварном соединении с ложементами первого яруса переходят через нулевую отметку при температуре $+20^{\circ}\text{C}$.

При учете зависимых от температуры упругопластических свойств материалов напряжения превышают значения предела текучести только в локальных зонах под шайбой болта прижима бросковых элементов КГЧ первого яруса, что приводит к локальному смятию материала, не влияющему на общую прочность крепежных элементов.

При повышении температуры до $+50^{\circ}\text{C}$ возрастают напряжения в лентах и шпильках крепления бросковых элементов КГЧ второго яруса, в трубе и сварном соединении трубы и ложементов первого яруса, а в других крепежных элементах напряжения понижаются. Однако при понижении температуры до -40°C напряжения повышаются в болте и прижиме бросковых элементов КГЧ первого яруса. При этом во всех случаях максимальные эквивалентные напряжения, определенные по критерию Мизеса, не превышают предельных значений.

Анализ работоспособности и механического состояния систем крепления бросковых элементов при максимальной осевой нагрузке в рабочем диапазоне температур

Для данного расчетного случая допустимо использование симметричной конечно-элементной модели (см. рис. 5).

Из виртуального эксперимента следует, что наиболее напряженная зона – в креплении между ложементом и бросковыми элементами второго яруса.

На рис. 9 представлены результаты расчетов напряженного состояния штифта крепления бросковых элементов второго яруса при номинальной и предельных температурах. Расчеты проводились при заданной максимальной осевой нагрузке.

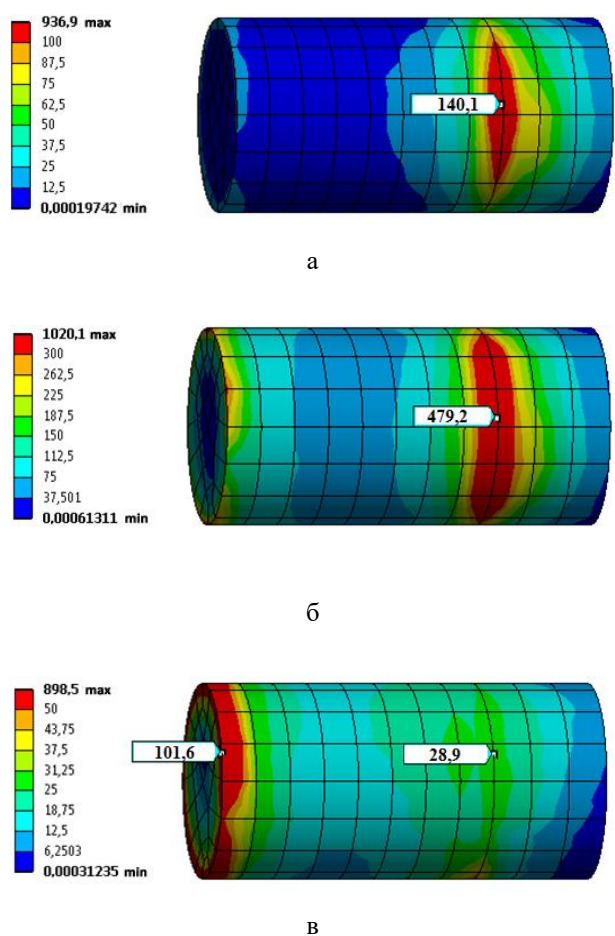


Рис. 9. Напряжения в креплении между ложементом второго яруса и бросковыми элементами второго яруса при температурах: а) -40°C ; б) $+20^{\circ}\text{C}$; в) $+50^{\circ}\text{C}$

Виртуальный эксперимент позволил сделать следующие выводы о работоспособности конструкции КГЧ при действии продольных инерционных нагрузок.

Напряжения в штифтах для пар "ложемент первого яруса – бросковые элементы первого яруса", "бросковые элементы первого яруса – ложемент второго яруса", "ложемент второго яруса – бросковые элементы второго яруса" не превышают допустимых значений для каждого материала, определяемых пределами текучести.

Наиболее опасным состоянием при рассмотрении всех элементов является равномерный нагрев конструкции до температуры $+50^{\circ}\text{C}$, для которого минимальный коэффициент запаса прочности равен 1,2. Это объясняется снижением допустимых напряжений для каждого из материалов при повышении температуры.

В случае снижения температуры конструкции до -40°C минимальный коэффициент запаса прочности равен 1,8. При этом появление деформаций сжатия приводит к ослаблению натяжения в крепежных элементах – прижимах, болтах, лентах, замках и штифтах, перераспределению и некоторому снижению в них напряжений, а значит, к переносу основной нагрузки от действия осевой инерционной нагрузки на штифты между бросковыми элементами и ложементом.

Максимальные напряжения порядка 500 МПа в этом случае возникают в шпильке между ложементом и бросковым элементом первого яруса, что соответствует коэффициенту запаса ~ 2 .

При остальных температурных режимах коэффициенты запаса по прочности во всех штифтах превышают 3, что в целом говорит о работоспособности конструкции при нагрузках, соответствующих данному расчетному случаю.

Анализ работоспособности и механического состояния систем крепления бросковых элементов для максимальной пространственной нагрузки с учетом технологических и температурных воздействий

Для анализа влияния пространственной нагрузки, как вектора компонент эксплуатационных перегрузок, осесимметричная часть расчетной модели не применима. Использовалась расчетная модель полной конструкции системы крепления. На рис. 10 показан вид сверху полной расчетной модели с усилиями от затяжки в болтовых соединениях (см. рис. 3) и шпильках (см. рис. 4). Модель учитывает затяжку болтовых соединений таким же образом, как и в предыдущей модели. Контакты между лентой и бросковыми элементами, а также между прижимами и боевыми элементами учитывают трение в парах.

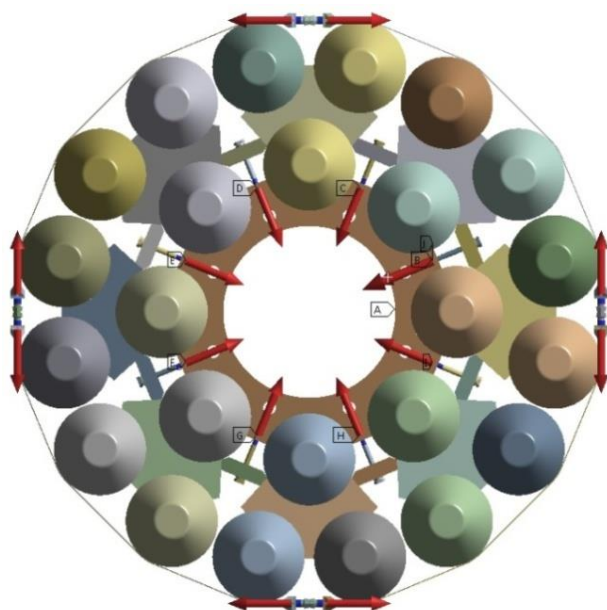


Рис. 10. Схема полной расчетной модели с усилиями от затяжки

Так же, как и в предыдущем расчетном случае при действии только продольной осевой нагрузки, напряжения в штифтах для пар "ложемент первого яруса – бросковый элемент первого яруса", "бросковый элемент первого яруса – ложемент второго яруса", "ложемент второго яруса – бросковый эле-

мент второго яруса" не превышают допустимых значений для каждого материала, определяемых пределами текучести. При этом разница между напряжениями в соответствующих конструктивных элементах для рассмотренных расчетных случаев не превышает 7-8%, и поэтому все выводы о прочности, сделанные ранее, справедливы и для этого расчетного случая.

Результаты численного анализа напряженного состояния в конструктивных элементах креплений приведены в табл. 2.

На рис. 11 показаны эквивалентные по Мизесу напряжения для максимальной пространственной нагрузки.

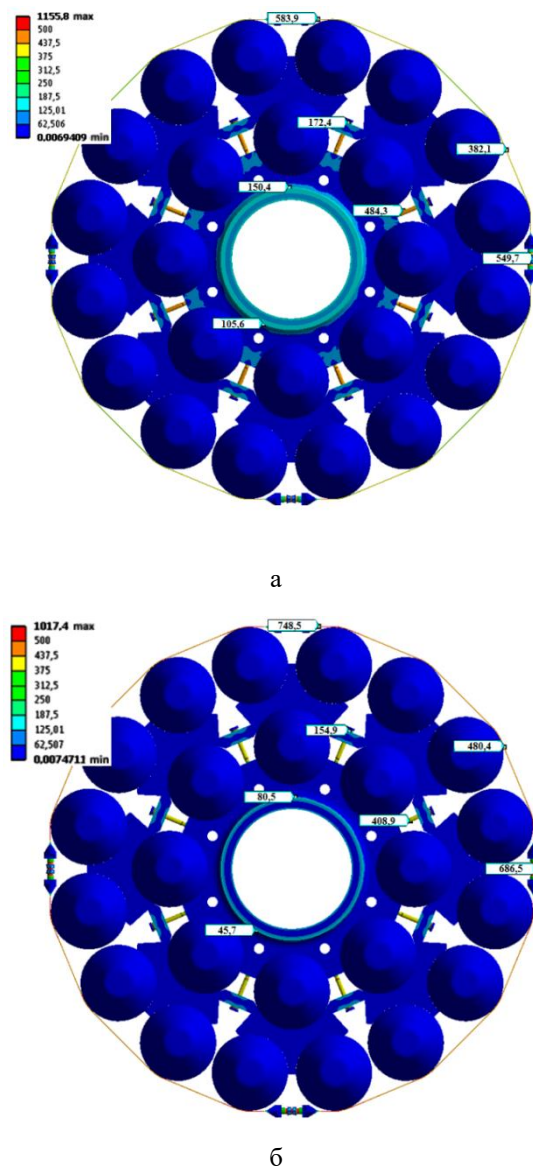


Рис. 11. Эквивалентные по Мизесу напряжения в полной конструкции для температур:
а) -40°C ; б) $+50^{\circ}\text{C}$

Таблица 2

Напряжения, возникающие от наиболее опасных эксплуатационных нагрузок

Расчетный случай	T, °C	Усредненные напряжения в конструктивном элементе, МПа						
		ленте	шпильке	замке	болте	прижиме	трубе	свар. шва
Температурное воздействие в рабочем диапазоне температур	-40	375	540	612	509	190	111	190
	+20	435	590	660	433	160	1	5
	+50	462	670	710	388	143	47	86
Наземная эксплуатация с максимальной осевой нагрузкой	-40	379	550	632	550	166	116	172
	+20	434	591	712	434	160	3	12
	+50	460	681	750	385	155	51	82
Наземная эксплуатация с максимальной пространственной нагрузкой	-40	388	577	586	484	174	110	149
	+20	457	607	710	433	161	5	3
	+50	492	689	746	410	162	46	77
Материал элемента		30ХГСА				АМг6		
Предельные значения напряжений (предел текучести)	-40	1048				166		
	+20	932				162		
	+50	855				160		

Заключительный анализ

Результаты расчетных исследований по проверке прочностных свойств конструкции на различных режимах работы и транспортировки сведены в табл. 2. Представлены максимальные значения напряжений для каждого из рассматриваемых конструктивных элементов и для каждой из указанных температур эксплуатации. Также представлены для проверки условия прочности – допускаемые значения, определяемые пределами текучести для каждого материала при каждой температуре эксплуатации. Анализ показывает, что наиболее критичной с точки зрения прочности для всех элементов является температура -40°C , при которой для замка ленты коэффициент запаса минимален и равен 1,14. Однако в большинстве случаев запас находится в диапазоне значений 1,4-2,8. Это свидетельствует о выполнении условий прочности и сохранении исходных моментов затяжки резьбовых соединений. Превышение же допускаемых напряжений в прижиме из алюминия носит ло-

кальный характер и приводит к возникновению пластических деформаций только под шайбами болтов при затяжке, что не влияет на общий вывод о прочности конструкции в целом. Уровень напряжений в сварном шве крепления ложементов высокий, но не превышает предельных значений. С учетом результатов виртуальных испытаний для исключения пластических деформаций под шайбой болтов прижима была проведена необходимая доработка конструкции.

Выводы

На основе разработанных методов и практических компьютерных технологий проведены виртуальные испытания для исследования механического состояния и работоспособности штатной системы крепления бросковых элементов КГЧ. Результаты испытаний подтверждают работоспособность системы крепления бросковых элементов при наземной эксплуатации ракеты и внедрены в практику на этапе конструкторской разработки до начала экспериментальной отработки.

Список использованной литературы

1. Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1985. – 520 с.
3. Никольский Б. П., Рабинович В. А. Справочник химика. Т. 6. – Л.: Химия, 1967. – 1009 с.
4. Стали и сплавы. Марочник: Справ. изд. / Под ред. В. Г. Сорокина, М. А. Гервасьева. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 608 с.

5. Numerical simulation of missile warhead operation / G. Martynenko, M. Chernobryvko, K. Avramov, V. Martynenko, A. Tonkonozhenko, V. Kozharin, D. Klymenko // *Advances in Engineering Software*. – 2018. – Vol. 123. – P. 93-103.

Статья поступила 03.01.2019