

УДК 539.4: 621.81

В.В. Сатокин, П.Б. Мусиенко

ВИРТУАЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОРПУСА СОПЛА РДТТ

Представлены результаты виртуальных испытаний корпуса сопла ракетного двигателя на твердом топливе. Проведено сравнение результатов виртуальных и реальных статических испытаний на прочность корпуса сопла ракетного двигателя на твердом топливе. Описан открытый авторами метод галогена.

Наведено результати віртуальних випробувань корпусу сопла ракетного двигуна на твердому паливі. Проведено порівняння результатів віртуальних і реальних статичних випробувань на міцність корпусу сопла ракетного двигуна на твердому паливі. Описано метод галогену, відкритий авторами.

The paper presents the results of virtual tests of solid-propellant rocket motor nozzle body. The results of virtual tests are compared to the results of real static tests for strength of solid-propellant motor nozzle body. The Halogen method, discovered by the authors, is described.

Введение

Статические испытания конструкций на прочность для оценки их работоспособности, применимости и определения предельных характеристик – одна из наиболее затратных статей расходов при разработке. В свою очередь, конструкция испытываемых объектов налагает требования к применимости испытательной оснастки.

Эффективным направлением снижения указанных затрат и анализа применимости является проведение виртуальных испытаний для моделирования эксплуатационного состояния конструкций и испытательной оснастки.

Постановка задачи

Государственным предприятием "Конструкторское бюро "Южное" были проведены гидравлические разрушающие испытания (ГРИ) корпуса сопла ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) внутренним давлением без превышения заданного уровня. Заданный уровень внутреннего давления при испытаниях был достигнут, корпус сопла в оснастке разрушен не был, но претерпел неупругое деформирование.

В виртуальном эксперименте рассматриваются конструкция корпуса сопла РДТТ с оснасткой для статических испытаний на прочность и проведение на этой основе виртуальных испытаний при эксплуатаци-

онных и нерасчетных нагрузках в условиях натуральных гидроиспытаний.

Численное моделирование

Геометрия корпуса сопла РДТТ в оснастке представляет собой шпильчное фланцевое соединение конусно-цилиндрической конструкции сопла с цилиндрической оснасткой.

Фактическая конструкция корпуса сопла РДТТ в испытательной оснастке приведена на рис. 1.

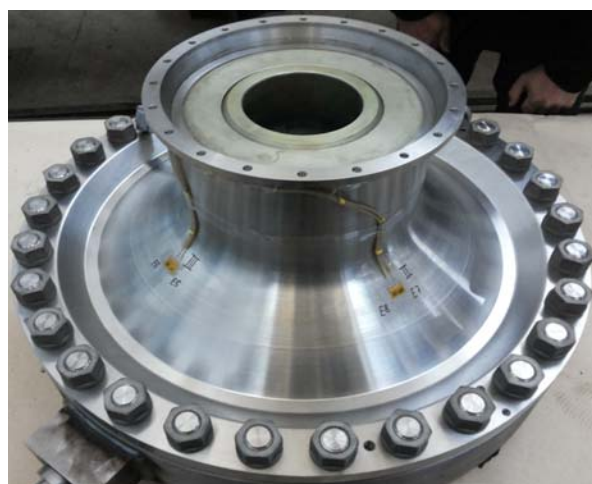


Рис.1. Корпус сопла РДТТ в испытательной оснастке

При гидроиспытаниях корпуса сопла РДТТ система "оснастка-шпильки-корпус-гайки" подвергается воздействию внутреннего давления, имитирующего воздействие внутрикамерного давления РДТТ.

Моделирование состояния корпуса сопла РДТТ в испытательной оснастке было реализо-

вано на основе разработанной компьютерной технологии, реализующей поэтапно построение конечно-элементной 3D-модели конструкции, задание реальных физико-механических характеристик материалов, фактических нагрузок, имитацию условий закрепления и проведение расчета механического состояния. Был использован специальный метод построения регулярной сетки конечных элементов*, позволяющий значительно сократить время, необходимое для проведения расчетов в программном комплексе ANSYS.

Базовые конечно-элементные модели, соответствующие заданным в документации геометрическим и механическим параметрам конструкции, в том числе в зонах сварных швов, создавались с использованием трехмерных элементов типа SOLID.

Расчет проводился в нелинейной постановке, при которой одновременно учитывались:

– зависимость физико-механических свойств материала корпуса сопла и испытательной оснастки – модуля упругости, предела текучести;

– контактное взаимодействие между корпусом сопла, шпилечным соединением и оснасткой.

Конечно-элементная модель корпуса сопла РДТТ в испытательной оснастке представлена на рис. 2.

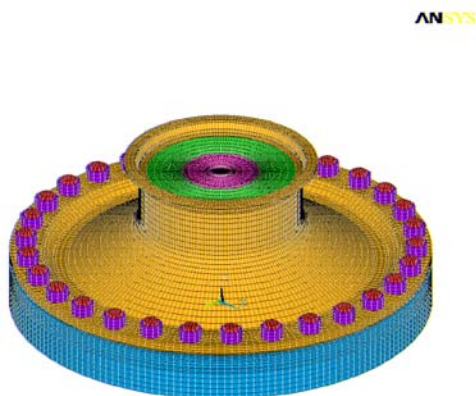


Рис. 2. Конечно-элементная модель системы

* Сатокин В.В. Разработка и апробация "Метода Микеланджело" // САПР и Графика. – № 7. – М.: ООО "КомпьютерПресс", 2013.

Виртуальные испытания

Задачами проводимых виртуальных статических испытаний были определены:

1. Подтверждение прочности и работоспособности корпуса сопла РДТТ.

2. Подтверждение прочности и работоспособности испытательной оснастки и шпилечного соединения.

3. Оценка возможности многократного применения шпилечного соединения.

4. Оценка влияния момента затяжки шпилечного соединения на напряженно-деформированное состояние (НДС) системы при испытаниях.

На этапе практической реализации виртуальных испытаний были проведены исследования механического состояния всех элементов системы крепления для основного расчетного случая.

Картина НДС конструкции корпуса сопла РДТТ с испытательной оснасткой при нагрузках, действующих во время гидроразрушающих испытаний, представлена на рис. 3.

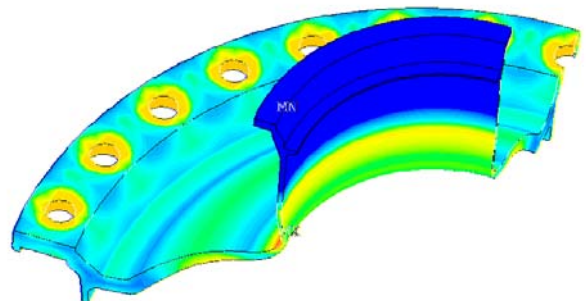


Рис. 3. Эквивалентные напряжения в корпусе сопла

По результатам расчетов была подтверждена работоспособность корпуса, шпилечного соединения и испытательной оснастки. Однако, как показал виртуальный эксперимент и анализ результатов реального эксперимента, при заданном уровне момента затяжки многократное применение шпилечного соединения недопустимо. Шпильки работают не в упругой зоне. Более того, дефектация испытанной системы показала наличие задиров и следов воздействия шпилечного соединения на корпус сопла.

И если в условиях гидроразрушающих испытаний допустимо наличие задиров на

корпусе сопла и неупругая деформация шпилечного соединения, то при статических гидроиспытаниях для оценки прочности и герметичности корпуса сопла и сварных швов это недопустимо.

Были проведены виртуальные эксперименты по оценке НДС системы "корпус сопла РДТТ – шпилечное соединение – испытательная оснастка" от действия различных уровней затяжки шпилечного соединения.

Анализ НДС показал, что выбор затяжки на уровне 1/3 максимально допустимой обеспечивает работоспособность системы и не приводит к контактному деформированию корпуса сопла при гидроиспытаниях.

При максимальном уровне затяжки после ГРИ наблюдалось ее снятие (гайки шпилечного соединения откручивались рукой без усилия).

Эквивалентные напряжения в корпусе сопла при виртуальных испытаниях без затяжки приведены на рис. 4.

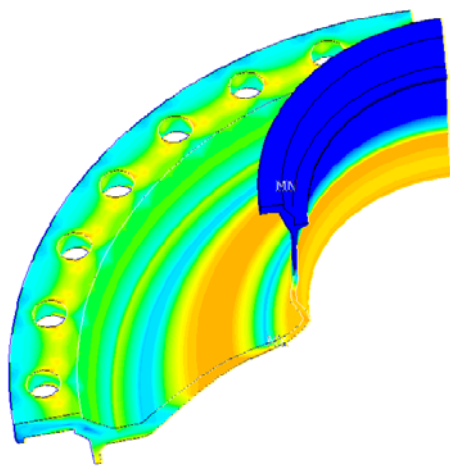


Рис. 4. Эквивалентные напряжения в корпусе сопла без затяжки

Как видим из сравнения данных на рис. 3 и 4 наличие затяжки кардинальным образом меняет картину НДС.

Таким образом, проведение виртуальных экспериментов позволило сократить натурную отработку испытаний корпуса сопла и минимизировать расходы на изготовление материальной части.

Результатом виртуального моделирования являются рекомендации по уровню затяжки и однократная применимость шпилечного соединения, реализованные при

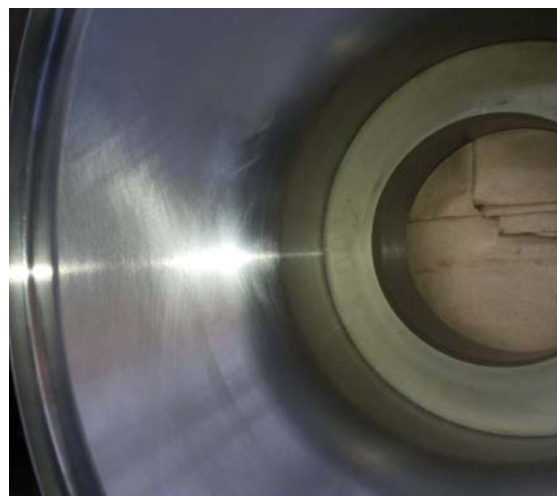
последующих гидроиспытаниях корпуса сопла РДТТ.

Метод галогена

При проведении дефектации корпуса сопла РДТТ проводилось фотографирование исследуемого объекта до и после ГРИ, фотографии приведены на рис. 5-6.



Рис. 5. Дефектация корпуса сопла РДТТ, корпус до ГРИ



а



б

Рис. 6. Дефектация корпуса сопла РДТТ, корпус после ГРИ: а – вид сбоку; б – вид сверху

Анализ изображений до и после ГРИ привел к открытию метода галогена.

При фотографировании корпуса сопла использовалась встроенная в телефон Samsung LED-лампа для освещения (ее свет похож на свет галогенового освещения). Оказалось, что данный вид освещения позволяет определить визуально зоны остаточных деформаций.

Как видим из сравнения фотографий корпуса сопла до ГРИ (рис. 5) и корпуса сопла после ГРИ (рис. 6, а и б, б), световой след на корпусе сопла от LED-лампы меняет свою форму от непрерывной до прерывистой и размеры от линейных до криволинейных.

Прерывистость светового следа наблюдается именно в местах неупругого деформирования исследуемой конструкции. В этой зоне наблюдаются максимальные перемещения, что подтверждается данными датчиков, а также результатами виртуального моделирования, приведенными на рис. 3.

Выводы

Проведенные виртуальные испытания подтверждают:

– работоспособность корпуса сопла РДТТ, шпилечного соединения и испытательной оснастки;

– рекомендованный уровень затяжки элементов крепления корпуса в оснастке.

Проведение виртуальных испытаний разрабатываемых изделий позволяет в ряде практических случаев дополнить системный анализ работоспособности ответственных ракетных конструкций при штатных и нерасчетных условиях эксплуатации без проведения натурных экспериментальных исследований.

Открытый метод галогена позволяет проводить анализ эксплуатационного состояния различных систем как аналог метода лазерной интерферометрии, но со значительно меньшим количеством требований по установке, условиям и объектам испытаний, так как таковые вообще не выдвигаются, поскольку для реализации данного метода достаточно наличия LED-освещения, фиксирующей системы и отражающей способности исследуемого объекта.

Конечно же, данный метод требует детального и всестороннего анализа на других конструкциях.

Авторами уже проверено, что использованный вид освещения оставляет световой след на композитных конструкциях.

Метод был открыт в октябре 2014 года.

Статья поступила 23.11.2015