

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ОТРАБОТКЕ ПРОЧНОСТИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В.В. Каверин, И.Ю. Пугач
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Рассматривается применение современной технологии сквозного проектирования, которая заключается в тесной интеграции процессов разработки конструкции, проведения расчетов, а также изготовления и сборке конструкции, на примере создания МКА «Университетский – Татьяна-2».

Ключевые слова: космический аппарат, прочность, динамика.

Создание малых КА имеет следующие особенности: сжатые сроки разработки и изготовления, малый бюджет, малочисленный коллектив разработчиков.

Классический подход разработки: «Конструкция => Техническая документация => Расчёты => Изготовление», труднореализуем.

Современный подход к проектированию – это тесная интеграция процессов разработки конструкции, проведении расчетов, изготовлении и сборке конструкции. Был применен при создании МКА «Университетский – Татьяна-2», что позволило полностью исключить из процесса проектирования бумажную часть (выпуск бумажной конструкторской документации (КД), нормоконтроль, службу технологического обеспечения).

Конструирование, расчеты и изготовление ведутся с использованием единой 3D модели в единой среде, что позволяет оперативно вносить изменения в конструкцию на всех стадиях проектирования, и таким образом в кратчайшие сроки создавать оптимальные конструкции. При этом бумажная КД может выпускаться, если это требуется, также на базе этой 3D модели, но ее выпуск осуществляется независимо от процесса проектирования и не увеличивает сроки разработки КА.

Метод сквозного проектирования

Основой метода сквозного проектирования является комплексное применение CAD/CAM/CAE технологий [1].

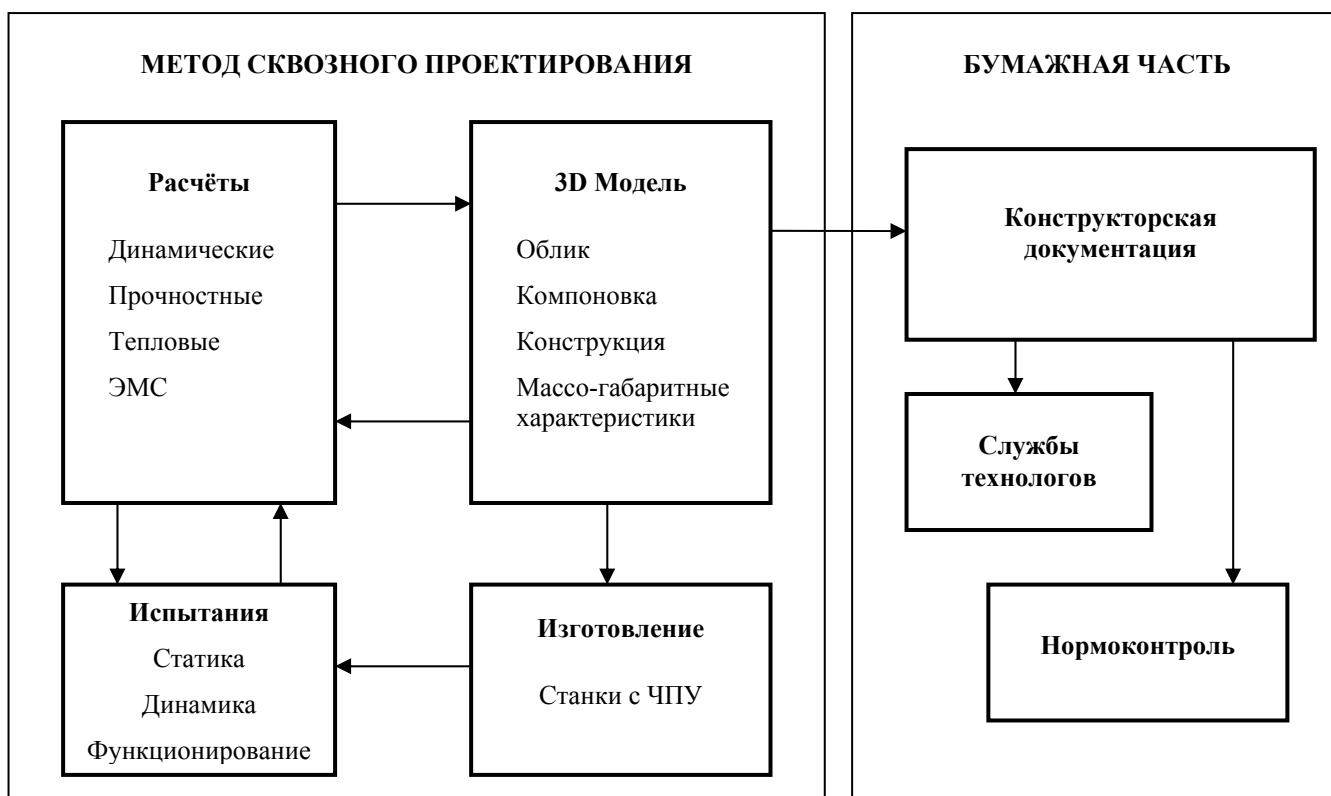


Рис. 1. Этапы проектирования МКА

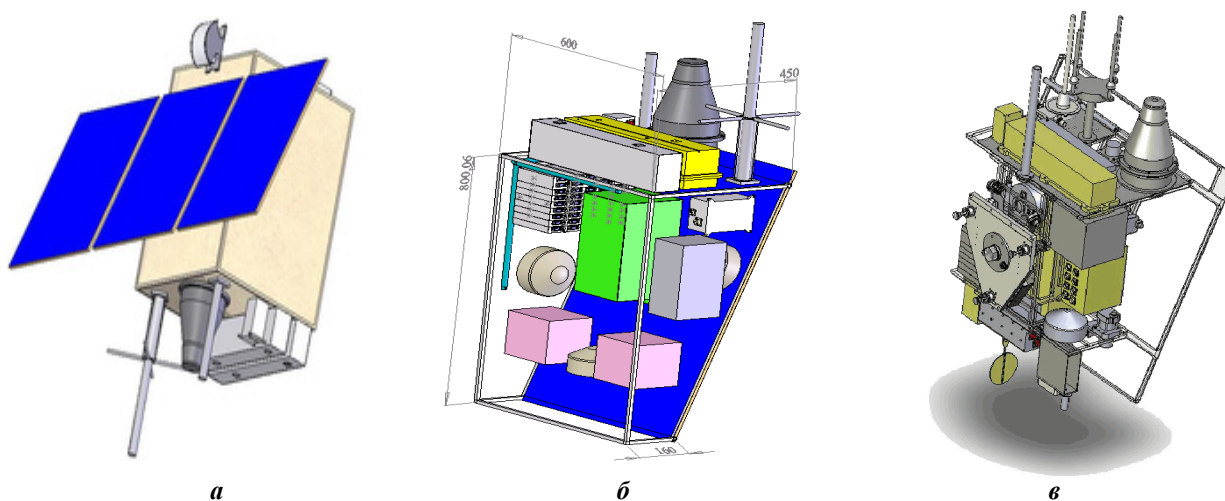


Рис. 2. МКА «Университетский – Татьяна-2»: а – первоначальный вариант; б – окончательный вариант компоновки; в – 3D модель

CAD-системы (computer-aided design – компьютерная поддержка проектирования) предназначены для решения конструкторских задач и оформления конструкторской документации (обычно они называются системами автоматизированного проектирования – САПР). Как правило, в современные CAD-системы входят модули моделирования трехмерной объемной конструкции (детали), оформления чертежей и текстовой конструкторской документации (спецификаций, ведомостей и т. д.). Ведущие трехмерные CAD-системы позволяют реализовать идею сквозного цикла подготовки и производства сложных промышленных изделий.

CAM-системы (computer-aided manufacturing – компьютерная поддержка изготовления) предназначены для проектирования процессов обработки изделий на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и выдачи программ для этих станков (фрезерных, сверлильных, эрозионных, пробивных, токарных, шлифовальных и др.). CAM-системы еще называют системами технологической подготовки производства. В настоящее время они являются практически единственным методом для изготовления сложнопрофильных деталей и сокращения цикла их производства. В CAM-системах используется трехмерная модель детали, созданная в CAD-системе.

CAE-системы (computer-aided engineering – поддержка инженерных расчетов) представляют собой обширный класс систем, каждая из которых позволяет решать определенную расчетную задачу (группу задач), начиная от расчетов на прочность,

анализа и моделирования тепловых процессов до расчетов гидравлических систем и машин, расчетов процессов литья. В CAE-системах также используется трехмерная модель изделия, созданная в CAD-системе. CAE-системы еще называют системами инженерного анализа.

В качестве базового программного комплекса использовался САПР среднего уровня SolidWorks. На основе 3D модели, построенной в SolidWorks, осуществлялись все этапы создания и отработки конструкции МКА «Университетский – Татьяна-2», такие как:

- формирование облика МКА;
- компоновка;
- определение массогабаритных характеристик и инерционных свойств;
- расчёты;
- изготовление;
- создание конструкторской документации.

Этапы проектирования приведены на рис. 1.

Создание конструкции МКА

Сначала вырабатывалась концепция облика КА, тип и материал несущей конструкции, способ изготовления.

Особенности орбиты, по которой движется МКА «Университетский – Татьяна-2», определяют угол установки панели солнечной батареи (СБ) относительно оси, направленной в сторону Земли. При этом сама СБ не имеет механизма ориентации. Было решено отказаться от классического варианта компоновки, когда СБ консольно закреплена на

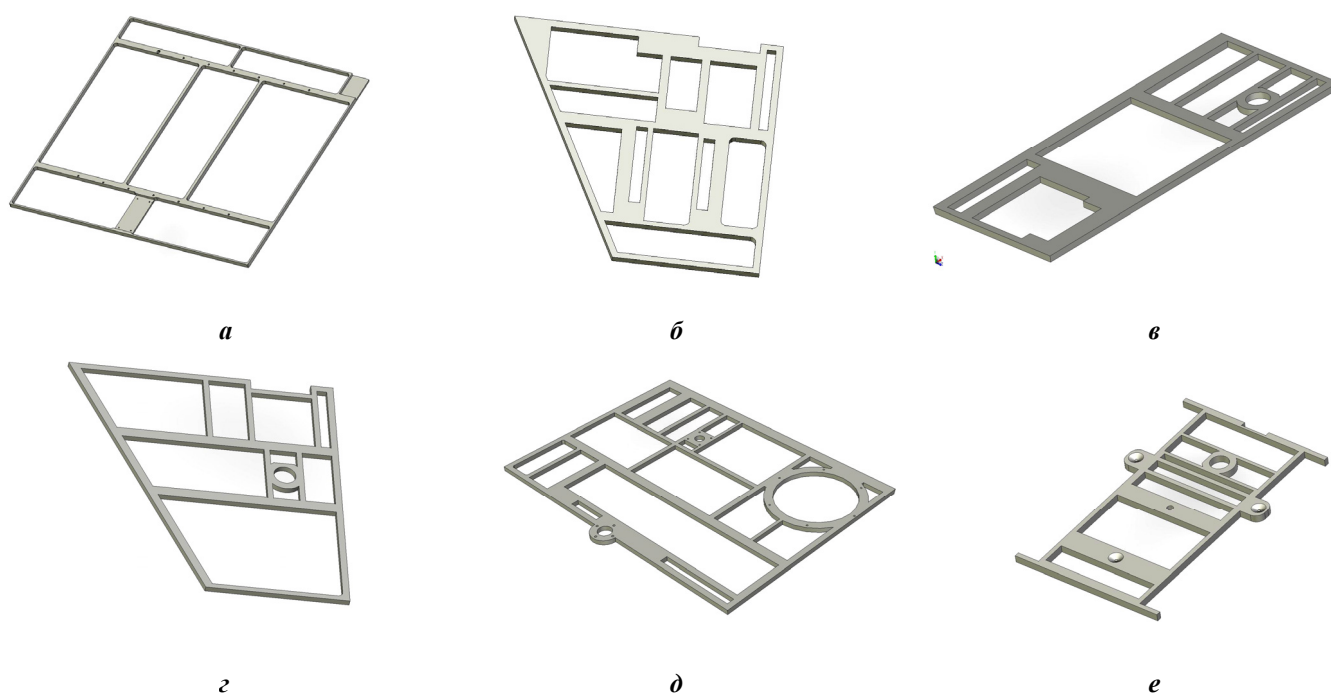


Рис. 3. Элементы несущей конструкции МКА «Университетский – Татьяна-2»

корпусе аппарата и имеет складную конструкцию (рис. 2, а), в пользу варианта, когда панель СБ является частью конструкции аппарата (рис. 2, б, в). При этом МКА имеет форму призмы с трапецией в плане, углы которой определяются углом между СБ и направлением на Землю. Габариты определяются потребной площадью СБ.

Основные критерии при компоновке блоков и создании конструкции:

– *обеспечение прочности конструкции*. Расчет производился методом конечных элементов. 3D модель SolidWorks импортируется в расчетный комплекс MSC. Nastran/Patran. В соответствии с результатами расчета корректируется несущая конструкция;

– *тепловой баланс*. При проведении тепловых расчетов производится определение теплового баланса. Входными данными являются входящий тепловой поток от солнца, коэффициенты теплопроводности и излучения материала конструкции. По результатам теплового расчета производится раскрой матов теплоизоляции и установка излучающих поверхностей;

– *электромагнитная совместимость компонентов*. Учет электромагнитной совместимости проводился по рекомендациям производителей компонентов. Основное требование – расстояние до частей магнитных материалов;

– *специфическое расположение компонентов*. (Расположение вдоль заданных осей, установка в центре масс). Ряд компонентов предъявляют специфические требования к местам установки и установке вдоль осей, например, чувствительный элемент блока МАС должен быть расположен в центре масс КА;

– *учет полей обзора*. При проектировании учитывались поля обзора антенн телескопа и видеокамер, блоков системы ориентации.

Кроме указанных выше требований, при проектировании конструкции особое внимание было уделено возможности быстрой сборки, разборки, обеспечению удобства монтажа блоков и жгутов, минимальному количеству операций при производстве.

В результате нескольких итераций была сформирована пространственная несущая конструкция, состоящая из шести плоских рам:

– рамы, направленной на землю (рис. 3, д). На ней устанавливается научное оборудование и приборы системы ориентации;

– рамы солнечных батарей (рис. 3, а), которая является элементом несущей конструкции и плоскостью для крепления элементов СБ;

– промежуточных рам (рис. 3, б, г, в), которые являются элементами несущей конструкции, по ним производится отток тепла на холодную сторону;

– рамы системы отделения (рис. 3, е), которая является наиболее нагруженной рамой в конструкции.

При проектировании конструкции основной упор делался на отработку современных методов проектирования и производства.

Рамы были изготовлены из одного листа титана с использованием гидроабразивной резки. Использование этой технологической операции позволило значительно сократить время и стоимость изготовления рам. После резки были проведены следующие операции:

- отжиг для выравнивания плоскости рам;
- фрезеровка посадочных плоскостей;
- сверление отверстий и нарезание резьб для сбор-

ки конструкции;

– сверление отверстий и нарезание резьб для крепления блоков. В качестве исходных данных для резки использовалась модель SolidWorks.

Из этих рам на высокопрочном не магнитном крепеже была собрана несущая конструкция (рис. 4).

Достоинства рамной конструкции – возможность производства без использования сложных производственных операций, высокая точность проводимых расчетов вследствие отсутствия мест с трудно прогнозируемыми свойствами (сварка, клепка, футорки, кинематические пары, места с большими контактными напряжениями), удобство сборки, а также возможность оперативной дора-

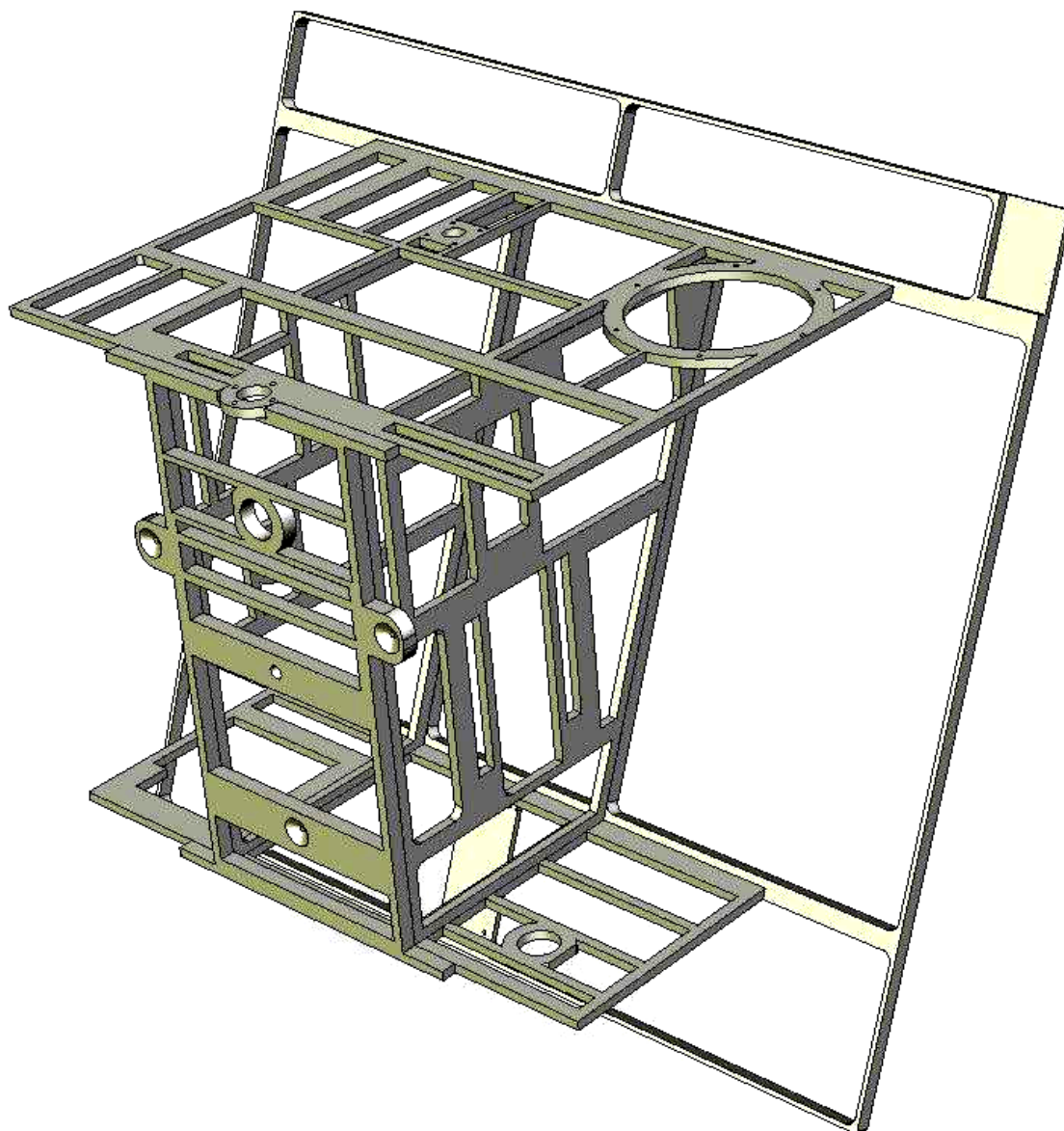


Рис. 4. Несущая рама МКА «Университетский – Татьяна-2»

ботки. Использование титана позволило уменьшить массу спутника и отказаться от применения закладных элементов, требуемых для конструкции из АМг.

Для обеспечения теплового режима на несущие титановые рамы накладываются тонкие алюминиевые листы.

Расчёты на прочность

На всех этапах разработки конструкции проводились расчеты на прочность и определялись собственные частоты колебаний конструкции. По результатам расчётов рамы многократно дорабатывалась, что в итоге позволило получить максимально эффективную с точки зрения прочности, жесткости и веса конструкцию. Расчеты на прочность [2, 3] проводились для двух наихудших для конструкции нагружений.

Выведения на орбиту (режим максимальной продольной перегрузки):

– эксплуатационная продольная перегрузка

$$nz = 4,7 g;$$

– эксплуатационная поперечная перегрузка

$$nx = ny = 0,7 g;$$

– коэффициент безопасности 1,3.

Авиатранспортирования:

– эксплуатационная продольная перегрузка

$$nz = 0,65 g;$$

– эксплуатационная поперечная перегрузка

$$nx = 4,0 g;$$

– эксплуатационная поперечная перегрузка

$$ny = 1,2 g;$$

– коэффициент безопасности 1,5.

Для расчета на прочность была создана конечно-элементная модель в MSC. Patran [4, 5]. Все рамы корпуса КА моделировались с помощью объемных элементов второго порядка тетраэдральной формы типа Tet10.

Приборы смоделированы в виде точечных масс, расположенных в центрах масс приборов, и прикреплены на несущей конструкции посредством элементов MPC типа RBE2. Масса легких приборов ($m < 1$ кг), которые не оказывают существенного влияния на распределение параметров напряженно-деформированного состояния, распределена по соответствующим рамам и учтена в плотности материала.

Солнечная батарея смоделирована посредством оболочечных элементов типа Quad4, которые также

прикреплены к раме батареи посредством MPC связей.

В штатных местах крепления системы отделения МКА к разгонному блоку введены заделки по всем степеням свободы.

Конечно-элементная модель включает 129623 объемных элементов и 253294 узла.

Основой для создания модели являлась та же самая 3D модель SolidWorks, которая использовалась на остальных этапах создания конструкции.

Максимальные расчетные напряжения, возникающие при заданных нагрузках в окончательном варианте рам, для двух расчетных случаев и коэффициенты запаса для сплава ВТ1-0 ($\sigma_T = 300$ МПа, $\sigma_B = 375$ МПа) представлены в таблице.

Характеристика	Выведение на орбиту	Транспортирование
Максимальное расчетное напряжение σ_{max} , МПа	75	55
Максимальное перемещение, мм	1,93	0,875
Коэффициент запаса по пределу текучести σ_T/σ_{max} прочности σ_B/σ_{max}	4,0 5,0	5,45 6,8

Выводы

1. Впервые в НПП ВНИИЭМ при создании КА был реализован метод сквозного проектирования, т. е. на базе единой 3D модели осуществлялись все этапы разработки конструкции (формирование облика, компоновка, определение массогабаритных характеристик и инерционных свойств, расчеты, изготовление, выпуск конструкторской документации).

2. Изготовление МКА осуществлялось с использованием современных технологий производств (оборудование с ЧПУ). В частности, использование гидроабразивной резки позволило значительно сократить время и стоимость изготовления рам.

3. Конструкция спроектирована таким образом, что расчётная модель позволяет получать результаты с большой достоверностью за счет отсутствия эле-

ментов, прочность которых трудно подтвердить расчётно и инструментально (сварка, клёпка, футорки).

4. Максимальное упрощение конструкции, соблюдение всех требований и использование современных методов производства позволило создать конструкцию в очень сжатые сроки.

5. Результаты работы вошли в НИР предприятия как этап «Создание экспериментального участка разработки и изготовление МКА».

Литература

1. Виртуальная разработка изделий – технологии XXI века // MSC.Software. – 2006. – 165 с.
2. Биргер И.А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И.А. Биргер, Б.А. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
3. Шелофаст В.В. Основы проектирования машин / В.В. Шелофаст – М.: АПМ, 2000. – 427 с.
4. MSC.Nastran 2005 Quick Reference Guide // MSC.Software Corporation. – 2004. – 2159 с.
5. MSC.Patran 2005 Quick Reference Guide // MSC.Software Corporation. – 2004. – 1560 с.

Поступила в редакцию 24.02.2009

Владимир Викторович Каверин, мл. науч. сотрудник, т. 366-33-61.
Игорь Юрьевич Пугач, мл. науч. сотрудник, т. 366-33-66.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.