

Пересыпкин В.П., Пересыпкин К.В., Иванова Е.А.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В КОНСТРУКЦИЯХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ТРЕБУЮЩИХ РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

### Введение

Работоспособность современных космических аппаратов (КА) зависит от размерной стабильности используемых конструкций, особенно в устройствах ориентации, приемно-передающих устройствах и других прецизионных узлах и деталях.

В данной работе рассматривается конкретная конструкция, выполненная, в основном, из алюминиевого сплава. Одной из причин, которые могут привести к недопустимым изменениям формы конструкции, является возможность появления микропластических деформаций, возникающих в узлах и деталях конструкции в условиях эксплуатации, предвещающих этап функционирования прибора по прямому назначению, но следующих после наладки и юстировки прибора. Имеется в виду воздействие нагрузок на изделие в процессе транспортировки его на стартовую позицию и нагрузок, неизбежных при старте и выводе на орбиту. Эти нагрузки, вызывая в узлах и деталях сравнительно малые напряжения, могут вызвать, тем не менее, необратимые изменения формы и размеров в прецизионных узлах и деталях, что может нарушить их штатную эксплуатацию. Факт появления пластических деформаций при напряжениях много меньших предела текучести известен [1]. Обычно при расчетах напряженно-деформированного состояния этими деформациями пренебрегают из-за их малости. Однако в рассматриваемой ситуации, как будет показано ниже, они оказываются недопустимыми.

Определение изменения размеров с учетом упруго-пластических свойств материалов в достаточно сложных конструкциях требует подробного и точного моделирования и использования для расчетов мощных вычислительных систем, реализующих метод конечных элементов. В работе используется одна из лучших систем такого рода – MSC.NASTRAN.

### Постановка задачи

Ставится задача определения характеристик размерной стабильности конкретного высокоточного изделия от микропластических деформаций, возникающих от нагрузок транспортировки на стартовую позицию и вывода на орбиту. Расчеты проводятся для эксплуатационных нагрузок без учета накопления пластических деформаций при многократном нагружении.

Объектом исследования является платформа чувствительных элементов (ЧЭ) КА. Платформа представляет собой конструкцию, на которой устанавливается несколько приборов системы ориентации и которая прикреплена статически неопределимо к корпусу КА в нескольких точках, разнесенных довольно далеко друг от друга, что требует при расчете ее деформаций учитывать и деформации КА. Конструкция платформы состоит из большого количества деталей сложной формы, соединенных между собой дискретным образом - болтами и штифтами.

Конечно-элементная модель конструкции должна учитывать сложную форму всех деталей, дискретность соединения их между собой и деформации КА.

Взаимное положение приборов и корпуса КА при функционировании не должно отличаться от положения в момент установки больше, чем на допустимую величину. Для обеспечения этого требования остаточные перемещения приборов для наиболее тяжелых случаев нагружения не должны превышать допустимых величин.

#### Метод решения

Для выполнения необходимых расчетов и прогнозирования выполнения требований стабильного положения платформы ЧЭ с учетом упругопластических характеристик материала конструкции в среде программного продукта MSC NASTRAN разработана конечно-элементная модель (КЭ-модель) конструкции (рис. 1).

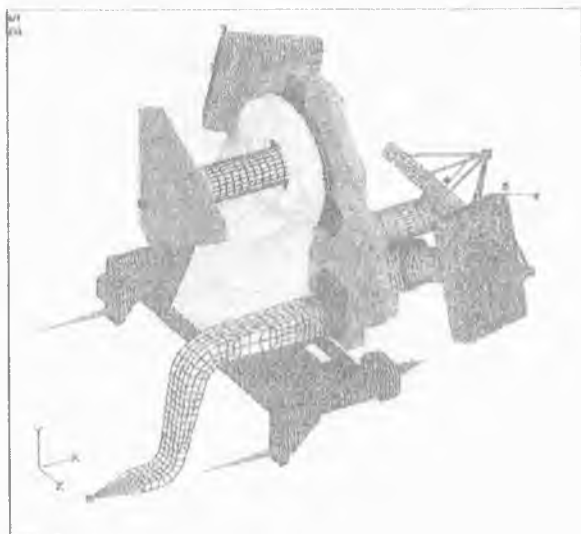


Рис. 1. Общий вид конечно-элементной модели конструкции платформы ЧЭ  
Количество узлов – 108528, элементов – 75844

Детали конструкции моделировались объемными и оболочечными элементами. Массивные части этих деталей моделировались объемными элементами SOLID с топо-

логией восьми узлового гексаэдра. Тонкостенные элементы конструкции моделировались конечными элементами тонкостенной оболочки PLATE. Болты, винты, шпильки – балочными элементами BEAM. Балочные элементы крепежа соединялись с КЭ-сетками деталей с помощью конечных элементов абсолютно жесткого тела RIGID. Штифты моделировались конечными элементами абсолютно жесткого тела. При построении модели предполагалось, что во фланцевых соединениях силы, нормальные плоскости фланца, и моменты вокруг осей в плоскости фланца передаются только через болты, шпильки и винты. Силы в плоскости фланца передаются только через штифты. Это допущение может привести к завышению расчетных деформаций конструкции (т.е. в запас). Однако считать, что силы передаются по всей поверхности контакта между деталями, нельзя, особенно, когда фланцевое соединение осуществляется малым количеством болтов.

Приборы моделировались конечными элементами сосредоточенной массы и присоединялись к остальной конструкции элементами абсолютно жесткого тела.

Для адекватного моделирования условий опирания платформы ЧЭ на КА в расчетах КЭ-модель платформы ЧЭ присоединялась к КЭ-модели КА, представленной в виде конденсированных матриц жесткости и масс.

При решении поставленной задачи требуется учет физической нелинейности и не требуется учет геометрической нелинейности, поскольку пластические деформации ожидаются небольшими по сравнению с упругими деформациями. Использовалась изотропная теория пластичности. Диаграмма  $\sigma$ - $\epsilon$  для пластических деформаций при напряжениях, меньших условного предела текучести  $\sigma_{02}$ , взята из [2] и приведена на рис.2.

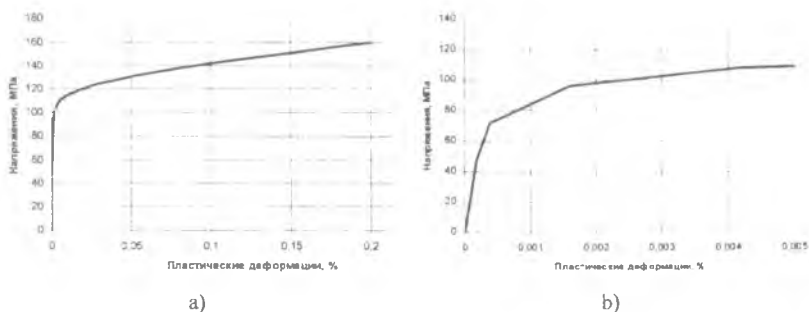


Рис.2. Диаграмма напряжения – пластические деформации для материала АМГ6  
 а) ниже предела текучести;  
 б) начальный участок диаграммы для деформаций ниже 0,05%

Задача решалась с помощью алгоритмов нелинейного анализа системы MSC.NASTRAN [3], представляющих собой итерационный процесс, подобный методу

Пьютона-Рафсона. Решение состоит из двух этапов – вычисление перемещений конструкции при приложении эксплуатационной нагрузки и вычисление перемещений конструкции при последующем снятии нагрузки. Полученные остаточные деформации сравнивались с допускаемыми по техническим требованиям.

Так как конструкция платформы ЧЭ создавалась с учетом различных требований, таких как обеспечение теплового режима приборов, удобство сборки и юстировки и др., жесткость и прочность не являлись определяющими в выборе силовой схемы конструкции платформы ЧЭ. Из-за этого конструкция содержит концентраторы напряжений (среди них несколько фланцевых соединений), в которых могут появляться напряжения, приводящие к пластическим деформациям даже при общем низком уровне напряжений в конструкции. Это сделало необходимым подробное моделирование геометрии деталей конструкции и привело к значительным размерам конечно-элементной модели (количество узлов – 108528, количество элементов – 75844).

Так как нелинейный анализ требует многократного решения системы линейных уравнений, оказалось необходимым принять меры по снижению объема вычислений. Это сделано следующим образом. Конечно-элементная модель разбита на части, которые соответствуют деталям конструкции, дискретно соединенным друг с другом (детали показаны на рис. 1 оттенками черного цвета). Нелинейный расчет проводился для каждой детали отдельно. При этом остальные детали присутствовали в модели в виде скомпенсированных матриц жесткости и масс, и пластичность в них не учитывалась. В каждом таком расчете вычислялись остаточные перемещения приборов, обусловленные пластическими деформациями одной детали. Общие остаточные деформации приборов находились как сумма остаточных деформаций, обусловленных пластичностью во всех деталях конструкции платформы ЧЭ. Другими словами, при решении нелинейной задачи был применен принцип суперпозиции, справедливый для линейных систем. Это можно считать справедливым, если пластические деформации одной детали не влияют на напряженно-деформированное состояние остальных деталей, что возможно при малых значениях пластических деформаций по сравнению с упругими деформациями или при соединении деталей статически определимым образом.

В рассматриваемой конструкции детали соединены между собой небольшим числом болтов и пинифитов и, если эти соединения не являются статически определенными, то близки к этому. Поэтому границы между частями конструкции проводились по стыкам между деталями. Это не только увеличивало обоснованность используемого подхода, но и сокращало число интерфейсных степеней свободы частей конструкции,

что уменьшало количество коэффициентов в сконденсированных матрицах жесткости и масс.

### Анализ результатов

Анализ результатов расчетов показывает, что требования по величине относительных угловых перемещений приборов не выполняются. Максимальное угловое перемещение приборов превышает ограничения в несколько раз.

Распределение пластических деформаций в конструкции подтверждает предположение, что наибольшие пластические деформации возникают в концентраторах и в областях фланцевых стыков. Примерно 95% материала конструкции во всех случаях нагружения испытывают напряжения от 0 до 20 МПа. При таких напряжениях можно считать, что микропластичность отсутствует. Однако оставшихся 5% материала, работающего с напряжениями выше 20 МПа, достаточно для нарушения геометрической стабильности конструкции. Конструкция оказалась перетяжелена, но при этом не обладает требуемой размерной стабильностью.

Анализ результатов расчетов позволил выявить следующие недостатки конструкции:

1. Большое количество разъемных соединений (стыков). Каждый стык – это увеличение массы, снижение жесткости и увеличение неоднородности напряжений (концентрации напряжений, пластические деформации).
2. Выполнение стыков в виде фланцевых соединений, а не фитингов.
3. Статическая определимость стыков, которые не увеличивают совместной жесткости соединенных деталей, в отличие от статически неопределимых.
4. Большинство деталей выполнено в виде подкрепленных плит (например, как на рис. 3), а плиты в качестве силовых конструкций, как правило, проигрывают тонкостенным пространственным конструкциям типа кессонов, коробов, оболочек и т. п. по массе, жесткости и прочности.

На рис. 3 и 4 показаны пластические деформации некоторых деталей конструкции.

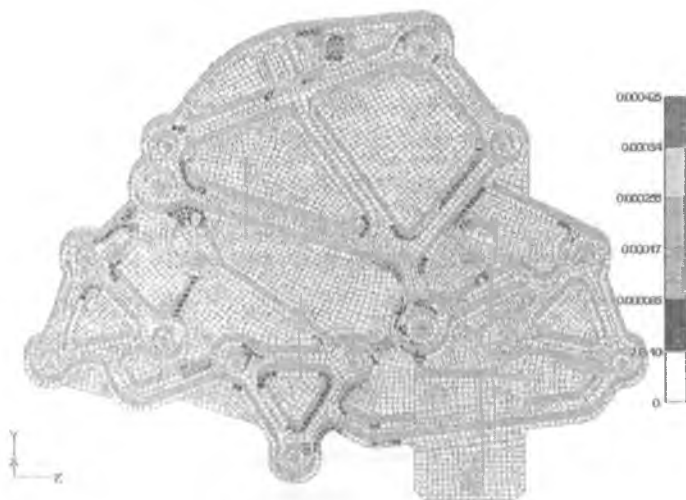


Рис. 3. Часть конструкции платформы ЧЭ "Термоплата". Цветом показаны уровни относительных пластических деформаций для одного из случаев нагружения

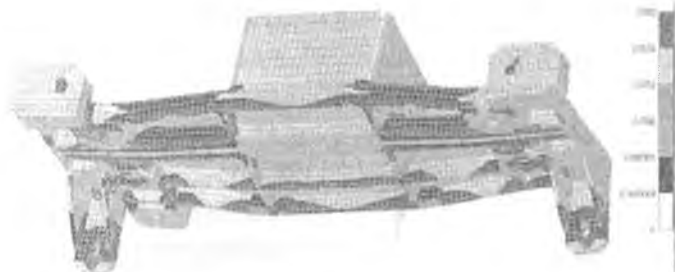


Рис. 4. Часть конструкции платформы ЧЭ "Основание". Остаточные перемещения для одного из случаев нагружения (в увеличенном масштабе). Цветом показаны уровни относительных пластических деформаций

#### Модификации конструкции

На основе анализа результатов расчетов предложены меры по уменьшению остаточных деформаций конструкции платформы ЧЭ: установить четыре подкоса и два раскоса по схеме, изображенной на рис. 5. Повторный КЭ-расчет показал, что эти доработки снижают остаточные перемещения приборов до допустимых величин. Деформации модифицированной конструкции платформы ЧЭ в одном из случаев нагружения показаны на рис. 6.



Рис. 5. Усиление конструкции платформы ЧС четырьмя подкосами и двумя раскосами



Рис. 6. Деформации модифицированной конструкции платформы ЧС для одного из случаев нагружения (в масштабе)

Работа поддержана грантом РФФИ №07-08-97611.

#### Библиографический список

1. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел, Белл Ф. Дж. В двух частях. Часть 1. Малые деформации: Пер. с английского / Под ред. А.П.Филина. -- М.:Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.
2. Авиационное материаловедение, Оборонизд, М. 1962.
3. MSC/NASTRAN 70.5 Quick reference guide. " The MacNeal-Schwendler Corporation, 1993.