

Автоматизация процесса моделирования резьбовых соединений в MSC Patran/Nastran

© А.Ф. Георгиев, С.С. Верзилин, Д.С. Никулин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Конструкция практически каждого современного летательного аппарата содержит множество резьбовых соединений — от небольшого электронного блока до целого космического аппарата, поэтому при проектировании, как правило, требуется оценивать прочность нескольких вариантов конструкции. При расчетах прочности конструкций, имеющих резьбовые соединения, значительное время приходится затрачивать на подготовку расчетной модели этих соединений. Предложены методика расчета и созданный эффективный алгоритм, реализованный в утилите для программного пакета MSC Patran, которые помогают повысить эффективность прочностных расчетов, а именно в несколько раз сократить время на подготовку конечно-элементных моделей с болтовыми и винтовыми соединениями и проводить вычисления в рамках проектно-конструкторских работ. Это подтверждается приведенным примером. Таким образом, внедрение автоматизации процесса моделирования резьбовых соединений дает возможность рассмотреть большее количество конструктивных вариантов в отведенное на проектирование время и выбрать оптимальный с точки зрения минимизации веса конструкции изделий ракетно-космической техники.

Ключевые слова: моделирование резьбовых соединений, метод конечных элементов, болтовое соединение, летательный аппарат, Patran Command Language, PCL, утилита в MSC Patran

Введение. Резьбовые соединения, как и любые другие соединения, являются не самыми прочными местами конструкции, и там высока вероятность разрушения. Поэтому крайне важно при выполнении прочностных расчетов, особенно высоконагруженных ответственных изделий, проводить их моделирование [1]. Повышенное внимание уделяется моделированию болтовых и винтовых соединений в трубопроводах, газопроводах, пневматических и топливных системах, где требуется высокая степень герметичности. В космической отрасли для валидации расчетных моделей применяют масштабные модели изделий, в которых очень много резьбовых соединений, например, модель ракеты-носителя УР-700, также имеющая болтовые соединения (рис. 1).

Ситуация становится более сложной при разработке летательных аппаратов (ЛА), поскольку процесс корректировки и улучшения конструкции изделий не останавливается даже во время проведения испытаний [2]. Следовательно, может изменяться геометрия деталей или будут появляться новые, и поэтому в MSC Patran придется заново

строить конечно-элементную сетку, что приводит к обновлению нумерации узлов сетки, принятой в исходном варианте, а значит, необходимо будет снова создавать элементы для моделирования крепежа.



Рис. 1. Масштабная модель ракеты-носителя УР-700

Цель данной статьи — представить авторскую методику автоматизации процесса моделирования болтовых и винтовых соединений (крепежа) и способ реализации этого алгоритма в виде дополнительной утилиты (модуля) к программе конечно-элементного моделирования (КЭМ) MSC Patran. Использование ее на практике позволит сократить время моделирования и проведения прочностных расчетов при проектировании конструкций ЛА.

Объект моделирования. Схемы болтового и винтового соединений представлены на рис. 2. В инженерной практике определено [3], что при нагружении, как правило, раньше разрушается болт, а не гайка.

Крепежные элементы моделируются в MSC Patran/Nastran с помощью объекта Connector типа Fastener [4]. Основное требование, предъявляемое к таким элементам, — их высокая жесткость, направленная к конструкции в целом. Следует отметить, что в предлагаемой методике вложено в алгоритм работы требование учитывать это явление.

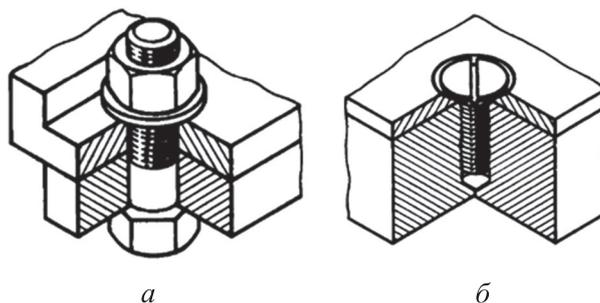


Рис. 2. Болтовое (а) и винтовое (б) соединения

Основные допущения. Болтовое или винтовое соединение моделируется балочными 1D-элементами. Так, в данном алгоритме выбран балочный элемент Beam [5], что позволяет отследить изгибные напряжения стержня болта или винта. При моделировании были приняты следующие допущения:

- торцы крепежа (у болтового соединения — гайка и головка болта, у винтового — головка винта) абсолютно жесткие и недеформируемые;

- болт или винт жестко связан с деталью;

- отверстия соединяемых деталей не деформируются, а значит, вся нагрузка приходится только на цилиндрический стержень крепежного элемента, в связи с чем данный стержень будет более нагруженным, и, как следствие, это приведет к дополнительному запасу прочности при ее расчете для самого болта или винта.

Следует отметить, что расчетные напряжения можно получить только в балочном элементе, моделирующем цилиндрический стержень болта либо винта.

Методика моделирования. Описываемый метод моделирования основан на применяемой в инженерной среде методике, приведенной в работе [6].

Стержень крепежного элемента моделируется балочным 1D-элементом Beam с круглым сплошным сечением диаметром, равным диаметру болта или винта. Элемент создается по линии Curve 1, соединяющей две точки — Point 1 и Point 2, являющихся центрами окружностей Edge 1 и Edge 2, очерчивающих отверстия деталей с торцевых сторон (рис. 3).

Поскольку принято допущение об абсолютно жестком соединении деталей с крепежным элементом (стержнем), на следующем этапе создаются списки узлов конечно-элементной (КЭ) сетки, лежащих на внутренних цилиндрических поверхностях отверстий Face 1 и Face 2 деталей (рис. 4) для формирования MPC (Multi-Point Constraint — мультиточечных конструктивных) связей.

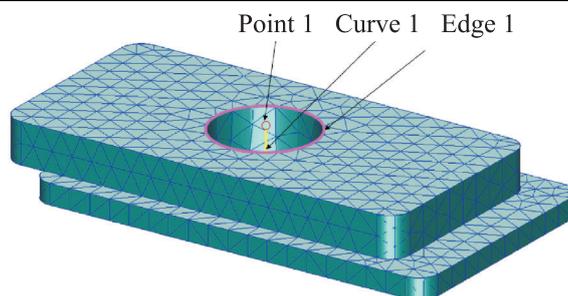


Рис. 3. Схема моделирования стержня болта или винта элементами Beam

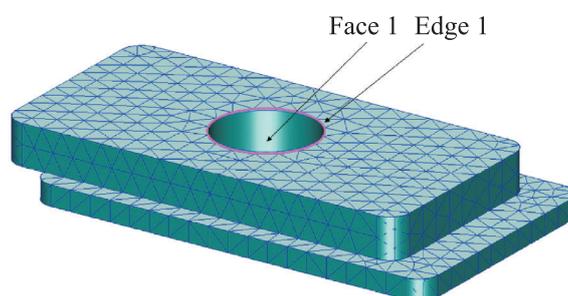


Рис. 4. Поверхность Face 1 для создания списка узлов

Если исходить из принятого допущения об абсолютно жестких торцах, создается связь балочного 1D-элемента Beam с ассоциированными узлами поверхностей Face 1 и Face 2 через элементы MPC 1 и MPC 2 типа RBE2 соответственно. Схема создания MPC 1 представлена на рис. 5.

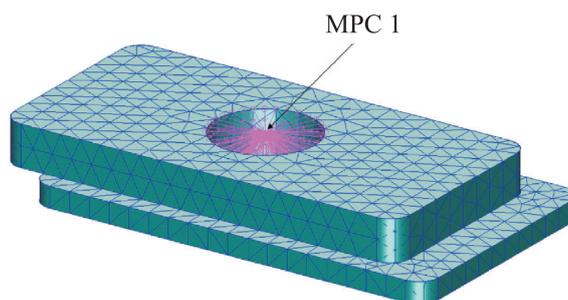


Рис. 5. Схема создания MPC 1

Таким образом, крепеж моделируется одним балочным 1D-элементом типа Beam и двумя жесткими связями типа RBE2 (элементы MPC 1 и MPC 2), схема соединения которых представлена на рис. 6. Для моделирования резьбовых соединений с зазором следует вместо поверхности Face 1 выбрать окружность Edge 1.

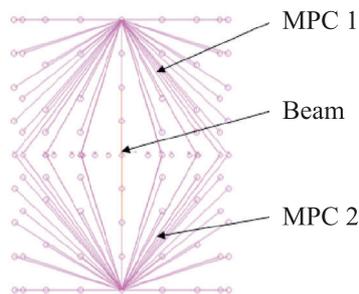


Рис. 6. Общая схема связи Beam, MPC 1, MPC 2

Рассчитанные по представленной методике значения напряжений в 1D-элементах с точностью до 5 % совпадают со значениями напряжений в крепежных элементах, полученными в результате экспериментальной отработки.

Описанную выше последовательность действий необходимо вручную выполнять для каждого резьбового соединения, что приводит к значительным временным затратам, т. е. на моделирование одного болтового соединения потребуется не менее 5 мин. С целью автоматизации процесса создания модели резьбового соединения была разработана специализированная утилита.

Алгоритм работы утилиты. Данная утилита позволяет упростить и ускорить процесс создания КЭ-модели, что особенно актуально при моделировании болтовых и винтовых соединений, когда требуется выполнять однообразные действия.

Для создания утилиты использовался язык PCL (Patran Command Language) — внутренний язык программирования MSC Patran [7], с помощью которого инженеры сами смогут разрабатывать удобные утилиты с целью автоматизации различных задач. В языке PCL имеются стандартные функции для создания полей ввода и различных кнопок, подробное описание этих функций и команд приведено в [8]. Язык PCL построен на базе объектно-ориентированного программирования (ООП) [9], в программе создаются классы и функции, которые применяются к конкретным объектам.

При разработке алгоритма работы утилиты на основе изложенной выше методики было определено, что для минимизации затрат на создание болтового или винтового соединения достаточно выбрать четыре геометрических объекта: Edge 1, Edge 2, Face 1, Face 2, а также установить параметр разбиения сетки Element Size для 1D-элемента Beam. Форма ввода данных (интерфейс) и расположение кнопки вызова утилиты показаны на рис. 7.

Разработка утилиты и интерфейса для нее начинается с определения основных команд, используемых при создании крепежных элементов по описанной выше методике. Создано два класса команд:

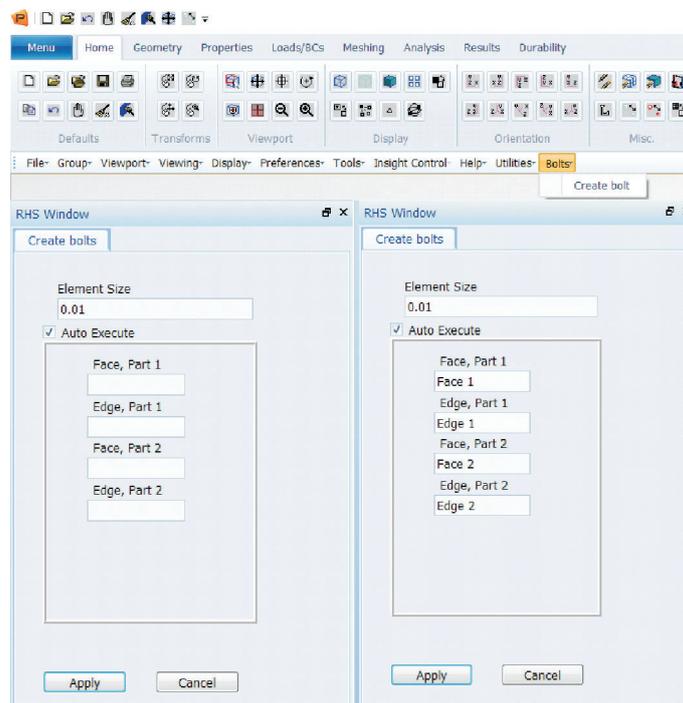


Рис. 7. Общий вид утилиты и ее расположение в меню

CLASS form_create, который отвечает непосредственно за создание утилиты, и CLASS bolts, добавляющей утилиту в основное меню MSC Patran. В полях ввода формы заложены ограничения на выбор объектов, которые позволяют сразу выбирать только нужные геометрические примитивы [10]. При выполнении моделирования было выявлено, что данный алгоритм имеет ограничение на соединение двух пластинчатых элементов, когда в отверстиях отсутствуют объекты Face 1 и Face 2. Для решения данной проблемы было добавлено расширение MESH_SWEEP на ограничения по выбору объектов. MESH_SWEEP позволяет выбирать объекты не только типа Face, но и типа Edge и Curve, что дает возможность моделировать соединение как объемных тел, так и пластин. Схема работы утилиты показана на рис. 8.

На основе выбранных пользователем кривых Edge 1 и Edge 2 создаются с помощью функции asm_const_grid_arccenter() две точки — Point 1 и Point 2, которые соединяются прямой Curve 1 с использованием функции asm_const_line_2point(). Разбиение прямой Curve 1 на 1D-элементы Beam происходит через функцию fem_create_mesh_curv_1 с размером элемента, заданным пользователем в поле Element Size. Отслеживание номера последнего созданного узла выполняется через функцию db_get_max_node_id().

Модель соединения

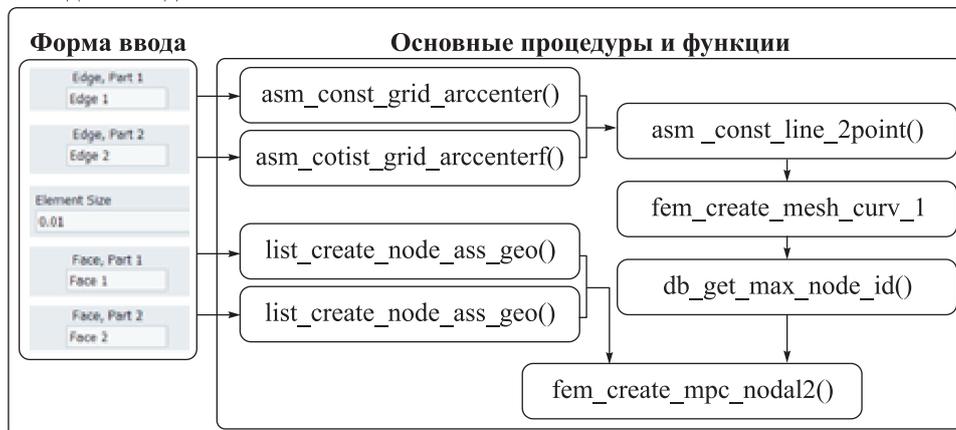


Рис. 8. Схема работы утилиты

На основе выбранных пользователем поверхностей Face 1 и Face 2 создаются списки ассоциированных с геометрией узлов через функцию `list_create_node_ass_geo()`. Основная особенность работы с языком PCL — строчный тип STRING передаваемых данных. В случае перевода значения из строкового STRING в целочисленный INTEGER тип данных используется функция `str_from_integer()`. При формировании списка ассоциированных узлов создавались строковые массивы [11], определяемые функцией STRING `list1 [200](2)`, `list2 [200](2)`. Такой переход необходим для задания узлов в функции создания MPC элементов.

После формирования списка ассоциированных узлов создаются MPC элементы MPC 1, MPC 2 типа RBE2 с помощью функции `fem_create_mpc_nodal2()`. Для создания поля ввода Element Size использовалась функция `ui_databox_create`, имеющая возможность установить тип вводимых данных. Для поля Element Size выбран вещественный тип значений — REAL.

Поля выбора, в которые пользователь может не только ввести объект, но и выбрать его в графическом интерфейсе, создаются с помощью стандартной функции `ui_selectdatabox_create`. Именно здесь вводится расширение MESH_SWEEP. Для создания кнопок используется функция `ui_button_create`.

После завершения процесса создания внешнего интерфейса были написаны функции, которые активируются при нажатии кнопок. Для кнопки Cancel добавлена функция `select_focus.exit()`, активирующая выход из рабочего окна формы. Кнопка Apply запускает работу алгоритма и активирует процесс непосредственного создания модели резьбового соединения. Auto Execute использована для автоматического переключения ввода на следующее поле, но создание самой

модели резьбового соединения выполняется только при нажатии кнопки Apply. Кнопка Cancel закрывает окно. В случае неверного задания значений, неправильного выбора объектов предусмотрена однократная возможность отменить общее создание модели через кнопку Undo, расположенную на базовой панели в MSC Patran.

Заключение. Утилита, разработанная к программе КЭ-моделирования MSC Patran и основанная на приведенных методике и алгоритме моделирования болтовых и винтовых соединений, позволяет создавать крепеж для деталей, представленных не только объемными, но и поверхностными КЭ. В результате применения данной утилиты при создании расчетной КЭ-модели типового фланцевого соединения трубопровода (Flange 1 и Flange 2), часто встречающегося в топливных системах ракетно-космической техники (рис. 9), получено сокращение времени разработки КЭ-модели в 6 раз — с 1 ч до 10 мин.

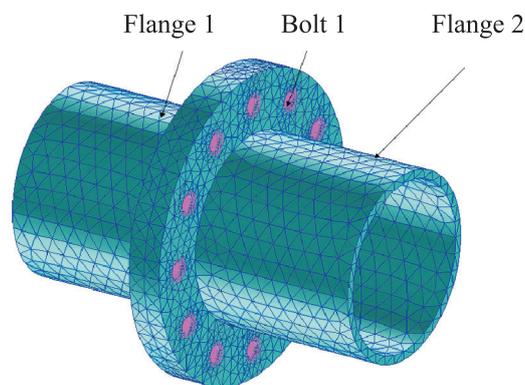


Рис. 9. Общий вид фланцевого соединения с крепежными элементами

Рассмотренная методика автоматизации процесса моделирования болтовых и винтовых соединений, представленная в форме утилиты Patran, позволяет существенно сократить время разработки КЭ-модели и повысить эффективность проведения проектно-конструкторских работ. Это, в свою очередь, дает возможность оценить большее количество конструктивных вариантов в рамках ограниченного времени, отведенного на проектирование, уменьшить массу и повысить качество конструкций летательных аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Vilela P.M.L., Carvalho H., Filhob O.T.B. Numerical simulation of bolted connections. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2018, no. 15, 15 p.
- [2] Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. *Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики*. Красноярск, СибГАУ, 2006, 84 с.

- [3] Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. *Расчет на прочность деталей машин*. Москва, Машиностроение, 1979, 639 с.
- [4] *MSC PATRAN Quick User Guide*.
- [5] *MSC/NASTRAN 120 Exercise Workbook - Version 70*. MSC/PATRAN 7.5.
- [6] Titarenko F.V. Optimalnaya raschetnaya konechno-elementnaya model. Sposoby soedineniya chastey KE modeli [The optimal computational finite element model. Ways to connect parts of the FE model]. *CADMASTER*, 2021, no. 1, 6 p.
- [7] *PATRAN 2021.2 PCL and Customization*.
- [8] *PATRAN 2021.4 PCL Reference Manual. Vol. 1: Function Descriptions*.
- [9] *PATRAN 2020 PCL Reference Manual. Vol. 2: Code Examples*.
- [10] *PATRAN 304 Exercise Workbook. Properties Form. EXERCISE 14*.
- [11] *PATRAN 304 Exercise Workbook. Mesh Lug Model. EXERCISE 5*.

Статья поступила в редакцию 17.04.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Георгиев А.Ф., Верзилин С.С., Никулин Д.С. Автоматизация процесса моделирования резьбовых соединений в MSC Patran/Nastran. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 7. EDN DNDYWP

Георгиев Александр Федорович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, факультет «Специальное машиностроение». e-mail: ageorgiev@bmstu.ru

Верзилин Станислав Сергеевич — студент 6-го курса, МГТУ им. Н.Э. Баумана, факультет «Аэрокосмический», кафедра «Пилотируемые и автоматические космические аппараты». e-mail: verzilins@student.bmstu.ru

Никулин Данил Сергеевич — студент 6-го курса, МГТУ им. Н.Э. Баумана, факультет «Специальное машиностроение», кафедра «Аэрокосмические системы». e-mail: nikulinds@student.bmstu.ru

Automating the threaded joint simulation process in the MSC Patran/Nastran

© A.F. Georgiev, S.S. Verzilin, D.S. Nikulin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Structure of almost every modern flying vehicle contains many threaded joints (from a small electronic unit to the entire spacecraft), which number could reach several thousands. Within the design, it becomes naturally required to estimate strength of several design options. In computing the strength of structures containing the threaded joints, significant time is spent on preparing a computation model and simulating the threaded joints themselves. Methodology considered in the paper and the created efficient algorithm implemented in the MSC Patran software package utility are making it possible to increase efficiency of the strength computation. Besides, it reduces the time in preparing the finite element models for the bolted and screw joints, as well as in computing, as part of design and development by several times, which is confirmed by the considered example. Thus, introduction of automating the process of the threaded joints simulation makes it possible to consider a wider number of design options within the limited design time, which becomes important in minimizing weights of the rocket and space technology products.

Keywords: threaded joint simulation, finite element method, bolted connection, flying vehicle, Patran command language, PCL, MSC Patran utility

REFERENCES

- [1] Vilela P.M.L., Carvalho H., Filhob O.T.B. Numerical simulation of bolted connections. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2018, no. 15, 15 p.
- [2] Shatrov A.K., Nazarova L.P., Mashukov A.V. *Mekhanicheskie ustroystva kosmicheskikh apparatov. Konstruktivnye resheniya i dinamicheskie kharakteristiki* [Mechanical devices of spacecraft. Design solutions and dynamic characteristics]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2006, 84 p.
- [3] Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost detaley mashin* [Strength calculation of the machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 639 p.
- [4] *MSC PATRAN Quick User Guide*.
- [5] *MSC/NASTRAN 120 Exercise Workbook - Version 70*. MSC/PATRAN 7.5.
- [6] Titarenko F.V. Optimalnaya raschetnaya konechno-elementnaya model. Sposoby soedineniya chastey KE modeli [The optimal computational finite element model. Ways to connect parts of the FE model]. *CADMASTER*, 2021, no. 1, 6 p.
- [7] *PATRAN 2021.2 PCL and Customization*.
- [8] *PATRAN 2021.4 PCL Reference Manual. Vol. 1: Function Descriptions*.
- [9] *PATRAN 2020 PCL Reference Manual. Vol. 2: Code Examples*.
- [10] *PATRAN 304 Exercise Workbook. Properties Form. EXERCISE 14*.
- [11] *PATRAN 304 Exercise Workbook. Mesh Lug Model. EXERCISE 5*.

Georgiev A.F., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: ageorgiev@bmtu.ru

Verzilin S.S., 6th year Student, Faculty of Aerospace, Department of Piloted and Automatic Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: verzilins@student.bmstu.ru

Nikulin D.S., 6th year Student, Faculty of Special Mechanical Engineering, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University.
e-mail: nikulinds@student.bmstu.ru