

**XXI Российская конференция
«Компьютерные системы инженерного анализа MSC Software»
Форум MSC 2018**

Расширение возможностей MSC.Patran в задачах моделирования конструкций с большим числом элементов крепежа

Козлов Михаил Владимирович

**МГУ имени М.В. Ломоносова
(Институт новых углеродных материалов и технологий – АО «ИНУМиТ»)**



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА**



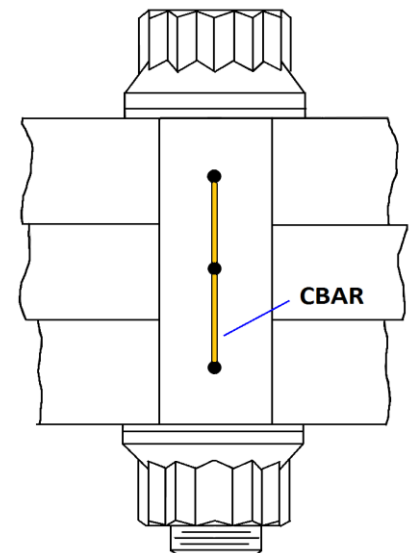
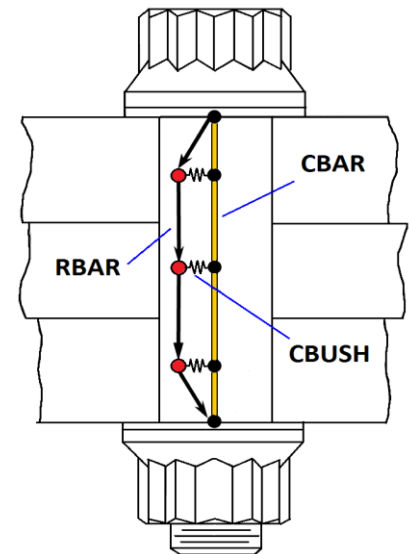
24 – 25 октября 2018 г.



Разновидности крепежа в КЭ моделях

Среди инженеров-прочнистов отечественных КБ сложилась практика использования в КЭ моделях, создаваемых в MSC.Patran, крепежа двух типов:

- Крепеж по методике Рутмана [1–3] хорошо разрешает статическую неопределимость в зонах болтовых соединений.
- Крепеж из балочных элементов применяют в расчетах конструкций на потерю устойчивости, а также в проектировочных расчетах, когда детальная проработка зон крепежа не требуется.

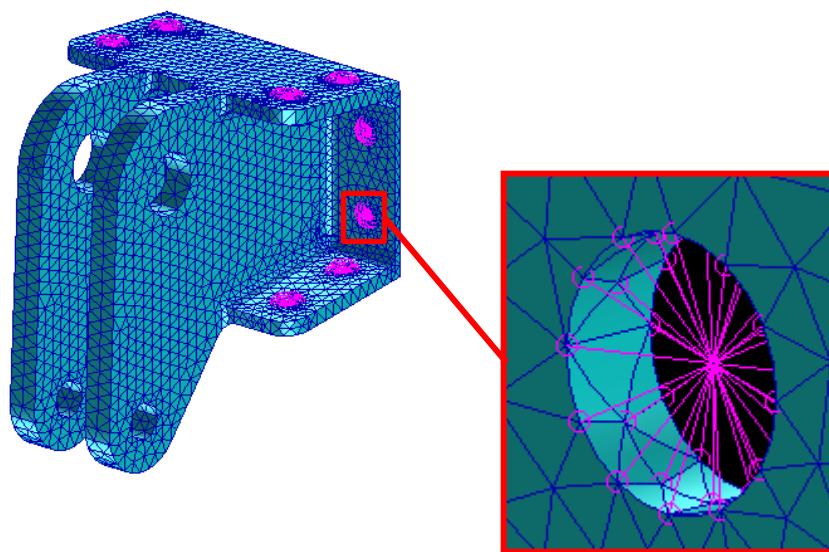


- [1] A. Rutman, A. Viisoreanu, J. A. Parady. Fasteners Modeling for MSC.Nastran Finite Element Analysis. Paper No. 2000-01-5585. Proceedings of the 2000 World Aviation Conference, San Diego, CA, October 2000.
- [2] A. Rutman, C. Boshers, L. Pearce, J. Parady. Fastener Modeling for Joining Parts Modeled by Shell and Solid Elements. Paper No. 2007-08. Proceedings of the 2007 Americas Virtual Product Development Conference, Detroit, MI, October, 2007.
- [3] A. Rutman, C. Boshers, L. Pearce, J. Parady. Fastener Modeling for Joining Composite Parts. Paper No. AM-VPD09-006. 2009 Americas Virtual Product Development Conference, April 21-22, 2009, Phoenix, AZ.

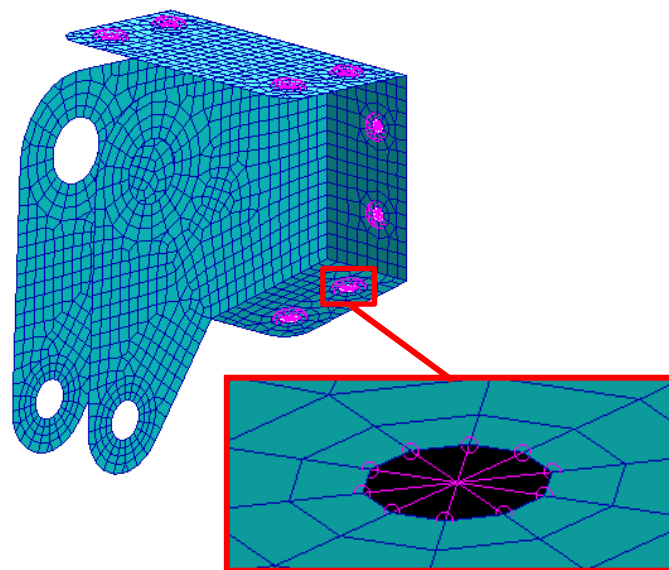
Проблемы при расстановке крепежа

Установка крепежа Рутмана в отверстия в сетке

Отверстия в кронштейнах,
набранных твердотельными
элементами



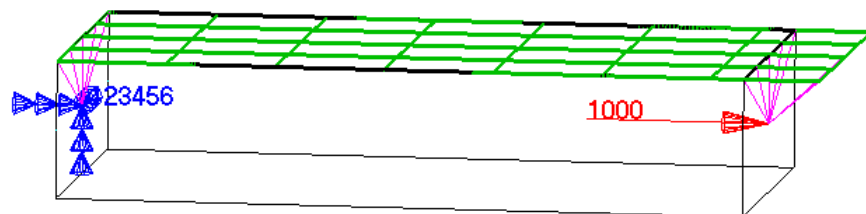
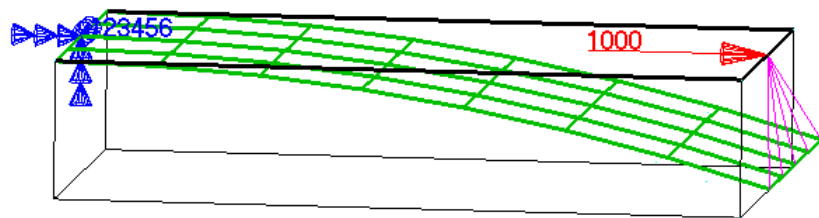
Явные отверстия в
плоской сетке



Стандартные утилиты не позволяют расставлять крепеж Рутмана в отверстия в сетке. Решение данной проблемы вручную весьма трудоемко (метод фиктивной сетки). Чаще всего инженеры за неимением других вариантов обходятся балочным крепежом.

Проблемы при расстановке крепежа (2)

Учет офсетов оболочечных элементов



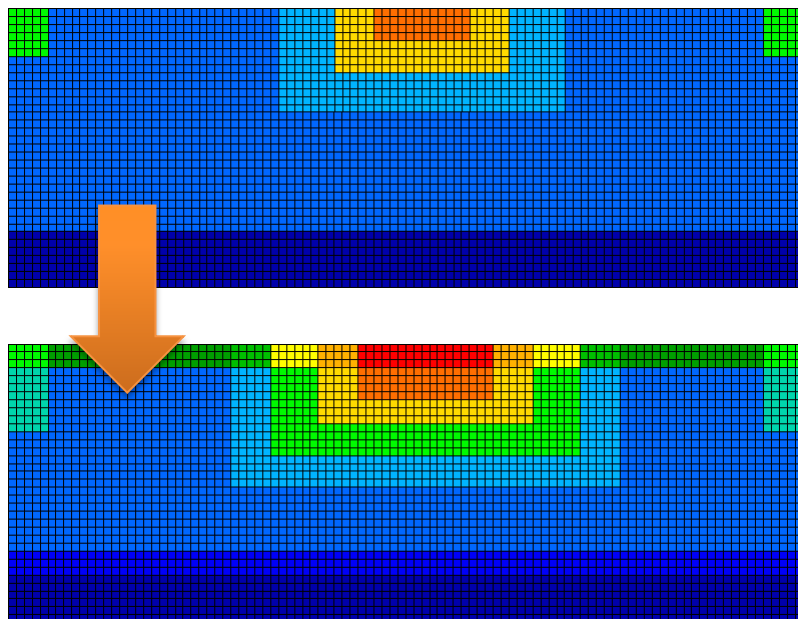
- Пластина с офсетом испытывает **паразитный изгиб**, если силы смятия действуют на уровне элементов.
- Длины сегментов стержней крепежа между ярусами соединения в этом случае не соблюдаются => изгиб крепежа моделируется **некорректно**.
- Точки действия сил смятия в пластине с офсетом должны располагаться на уровне срединной плоскости пластины.
- Длины сегментов стержней крепежа между ярусами соединения в этом случае соблюдаются => изгиб крепежа моделируется корректно.

Стандартные утилиты для установки крепежа не поддерживают офсеты. Решение этой проблемы вручную (добавление MPC + перенос узлов) даже для балочного крепежа очень трудоемко. Чаще всего инженеры за неимением других вариантов игнорируют данную проблему.

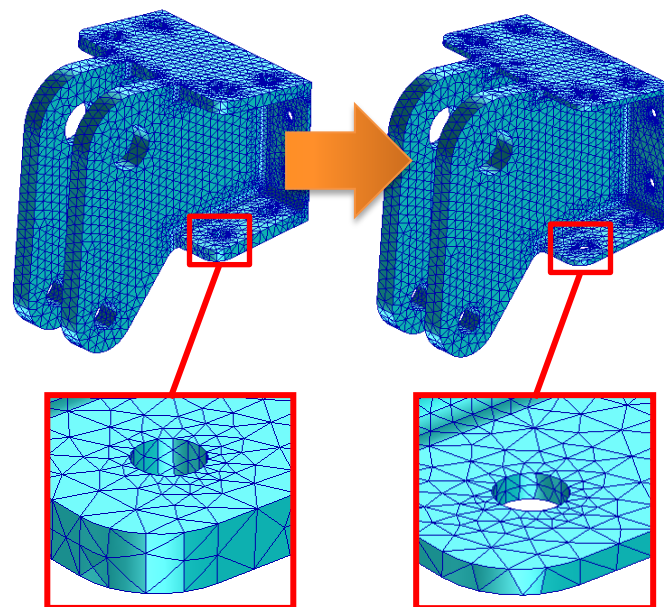
Проблемы при расстановке крепежа (3)

Изменения в моделируемой конструкции

Изменения толщин, укладок, офсетов, ориентации слоев



Изменения толщин в кронштейнах

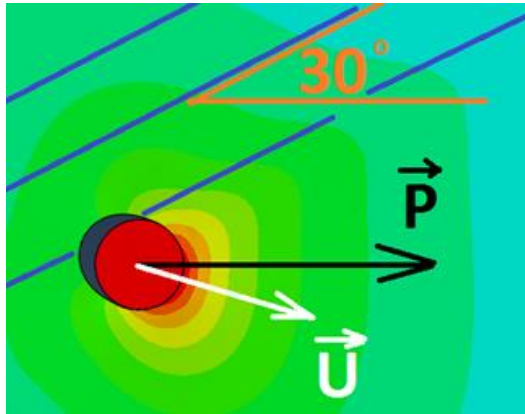


Единственный выход для инженера заключается в ручном исправлении крепежа: жесткостей смятия (для крепежа Рутмана) и положений узлов (для обоих вида крепежа). Трудоемкость таких исправлений чрезвычайно высока.

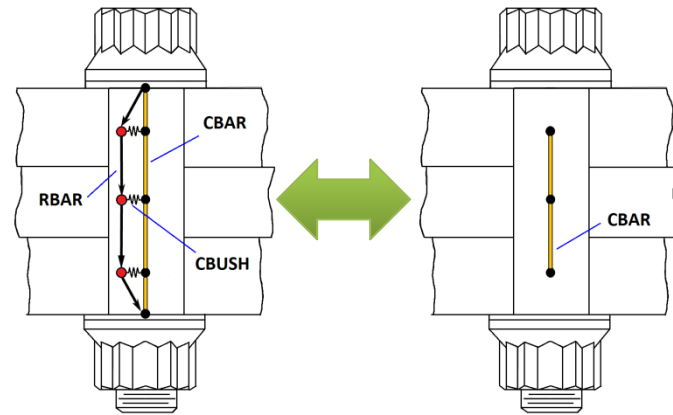
Проблемы при расстановке крепежа (4)

Иные проблемы

Необходимость правильного расчета жесткостей смятия в ПКМ



Потребность в конвертации крепежа для некоторых типов расчетов



Когда перед инженером стоит задача создания модели с большим числом элементов крепежа, он сталкивается с рядом серьезных проблем, разрешение которых в случае большой модели значительно затруднено ввиду крайне высокой трудоемкости. В этом случае на практике часто происходит игнорирование данных проблем в ущерб качеству расчетов.

Существует ли инструмент, способный автоматически, «нажатием одной кнопки», решить все вышеперечисленные проблемы?

Fastener Doctor

Программа для лечения и конвертации крепежа в MSC Patran



- Написана на языке Matlab
- Автоматически распознает и чинит крепеж
- Конвертирует крепеж из одного вида в другой
- Решает перечисленные выше проблемы!

Схема работы:

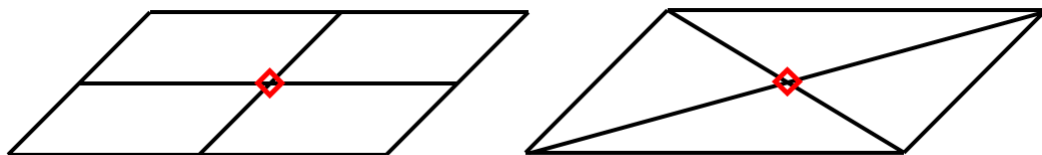


1. Пользователь создает файл BDF со всей моделью или ее частью.
2. Программа Fastener Doctor считывает файл BDF, воссоздает у себя в памяти модель, находит в ней крепеж и выполняет необходимые действия.
3. Внесение изменений в базу Patran осуществляется с помощью проигрывания полученного в результате работы программы сессионного файла.

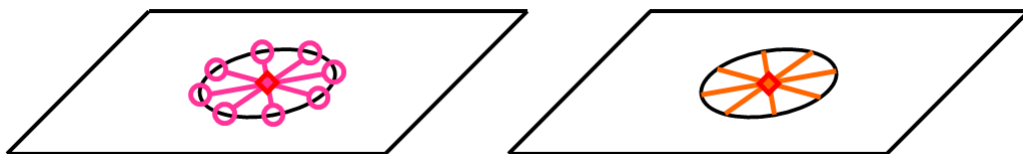
Распознавание крепежа

Поддерживаемые типы сеток

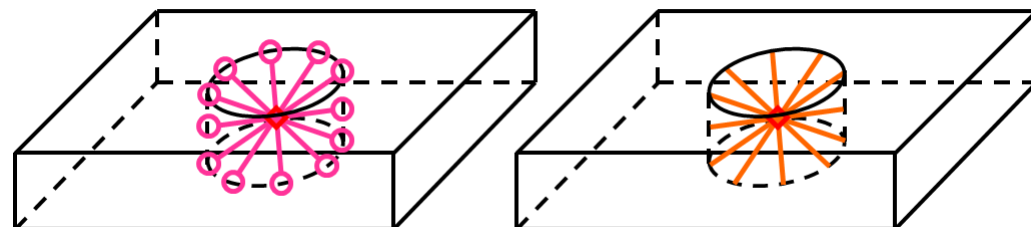
Сетка из оболочечных элементов



Плоские отверстия («паук» из RBE2 / BAR)



Объемные отверстия («паук» из RBE2 / BAR)



Поддерживаемые типы крепежа

Крепеж Рутмана



Балочный крепеж



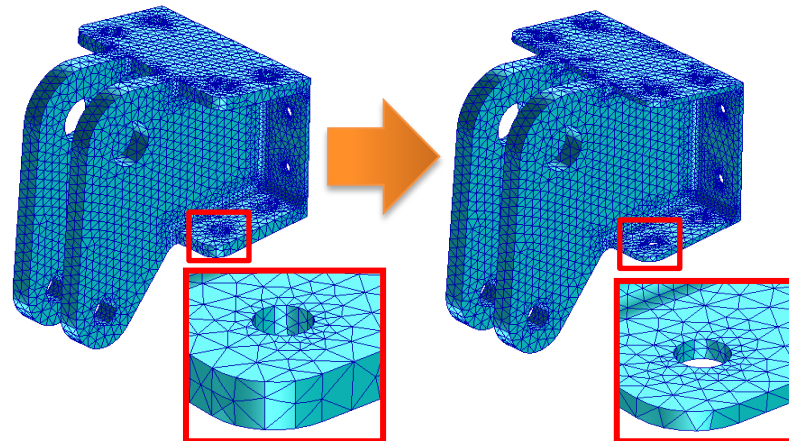
Размер модели и число элементов крепежа в ней не ограничены!

Возможности программы Fastener Doctor

1. Починка крепежа Рутмана:

- Жесткости BUSH-элементов (металл, композит)
- Системы координат в узлах
- Степени свободы RBAR
- Офсеты точек смятия
- «Пауки» в отверстиях

*Пример изменения толщины
пояса кронштейна*



2. Починка балочного крепежа:

- Офсеты точек смятия
- «Пауки» в отверстиях

*Болт до
изменения*

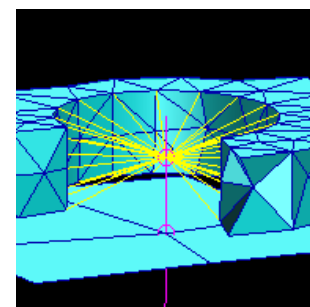
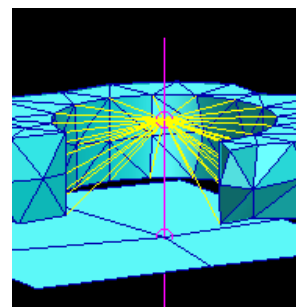
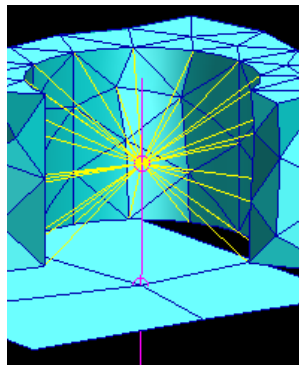
*Болт после
изменения*

*Болт после
починки*

3. Конвертация крепежа:

- Балочный в Рутмана
- Рутмана в балочный

4. Построение в Patran осей распознанного крепежа



- Узел «паука» перенесен в центр нового отверстия
- Исправлена длина болта

Возможности программы Fastener Doctor

1. Починка крепежа Рутмана:

- Жесткости BUSH-элементов (металл, композит)
- Системы координат в узлах
- Степени свободы RBAR
- Офсеты точек смятия
- «Пауки» в отверстиях

2. Починка балочного крепежа:

- Офсеты точек смятия
- «Пауки» в отверстиях

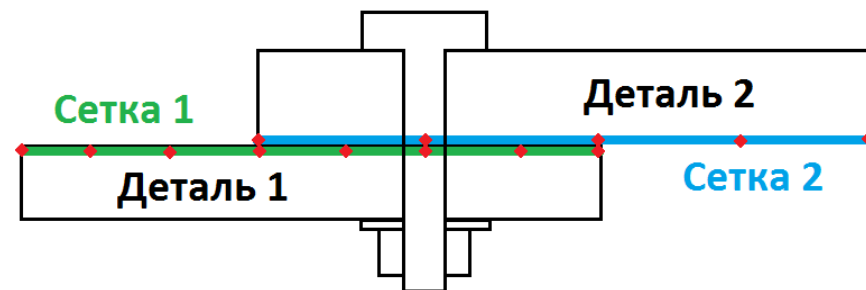
3. Конвертация крепежа:

- Балочный в Рутмана
- Рутмана в балочный

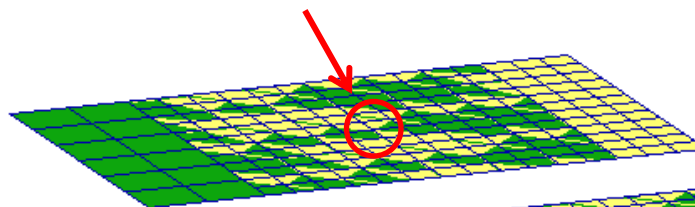
4. Построение в Patran осей распознанного крепежа

Пример лечения болта нулевой длины

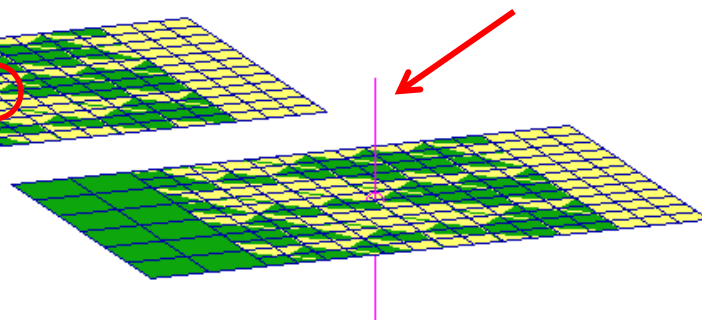
Такое возникает, когда для построения сеток выбраны смежные поверхности двух деталей:



Балочный болт нулевой длины



Болт после починки офсетов



Возможности программы Fastener Doctor

1. Починка крепежа Рутмана:

- Жесткости BUSH-элементов (металл, композит)
- Системы координат в узлах
- Степени свободы RBAR
- Офсеты точек смятия
- «Пауки» в отверстиях

2. Починка балочного крепежа:

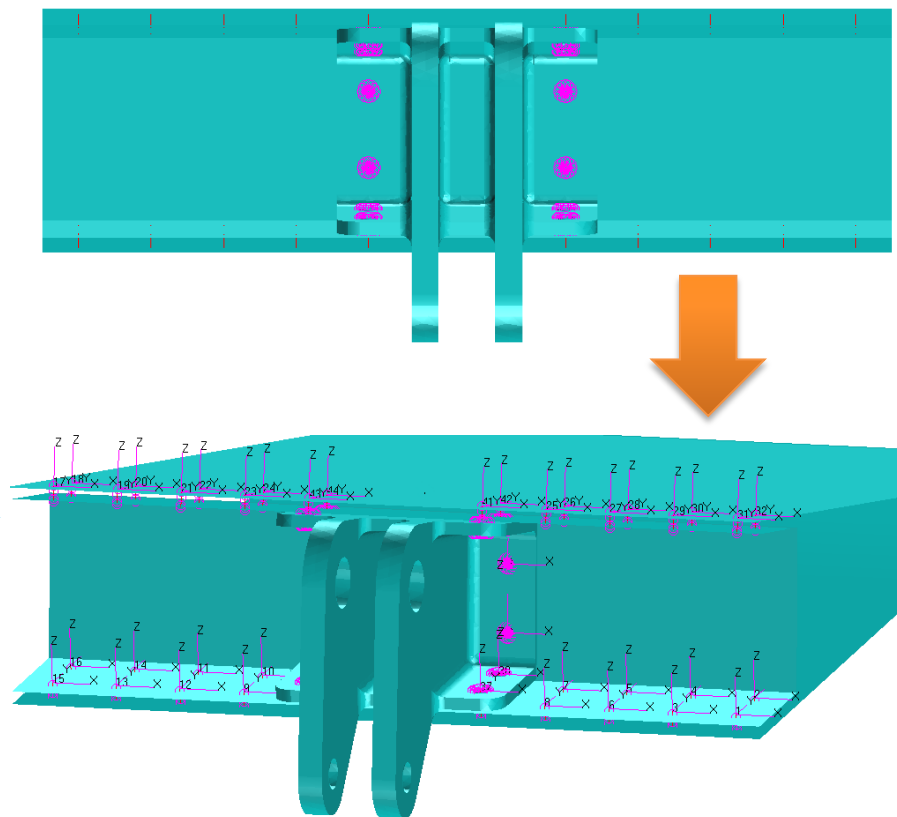
- Офсеты точек смятия
- «Пауки» в отверстиях

3. Конвертация крепежа:

- Балочный в Рутмана
- Рутмана в балочный

4. Построение в Patran осей распознанного крепежа

Пример установки балочного крепежа и его конвертации в крепеж Рутмана



Возможности программы Fastener Doctor

1. Починка крепежа Рутмана:

- Жесткости BUSH-элементов (металл, композит)
- Системы координат в узлах
- Степени свободы RBAR
- Офсеты точек смятия
- «Пауки» в отверстиях

Пример построения осей распознанного крепежа

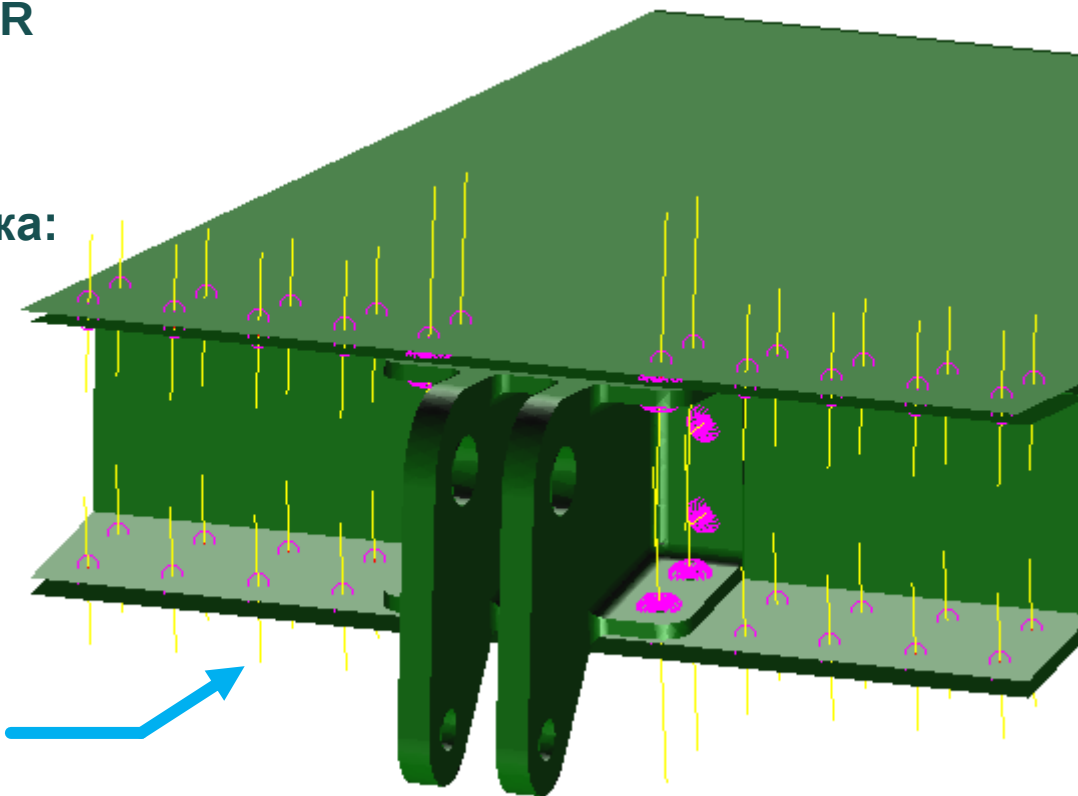
2. Починка балочного крепежа:

- Офсеты точек смятия
- «Пауки» в отверстиях

3. Конвертация крепежа:

- Балочный в Рутмана
- Рутмана в балочный

4. Построение в Patran осей распознанного крепежа



Возможности программы Fastener Doctor

1. Починка крепежа Рутмана:

- Жесткости BUSH-элементов (металл, композит)
- Системы координат в узлах
- Степени свободы RBAR
- Офсеты точек смятия
- «Пауки» в отверстиях

*Пример построения осей
распознанного крепежа*

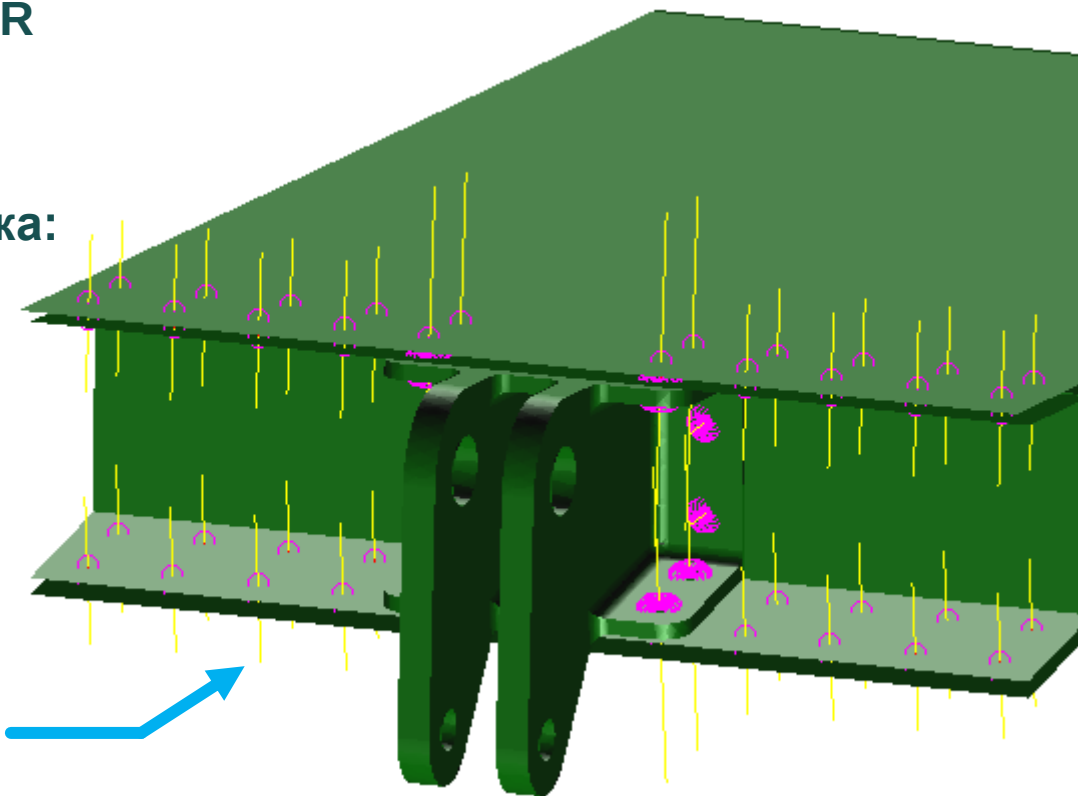
2. Починка балочного крепежа:

- Офсеты точек смятия
- «Пауки» в отверстиях

3. Конвертация крепежа:

- Балочный в Рутмана
- Рутмана в балочный

4. Построение в Patran осей распознанного крепежа

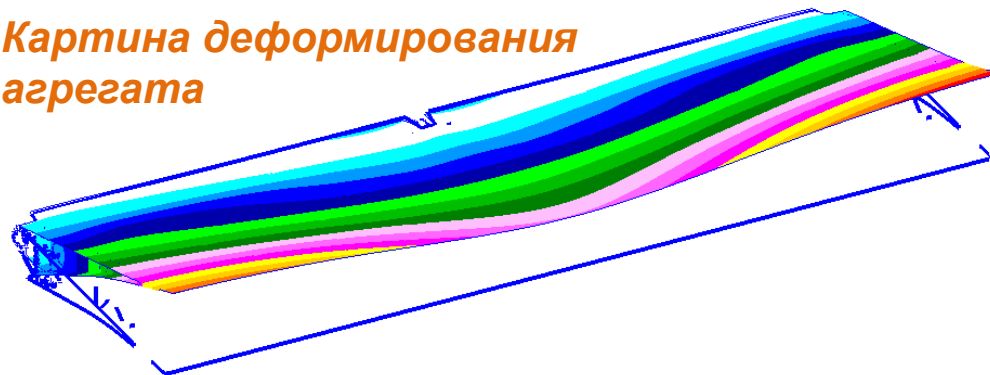


Можно выполнить сразу несколько действий за один запуск программы!

Исследование починки крепежа

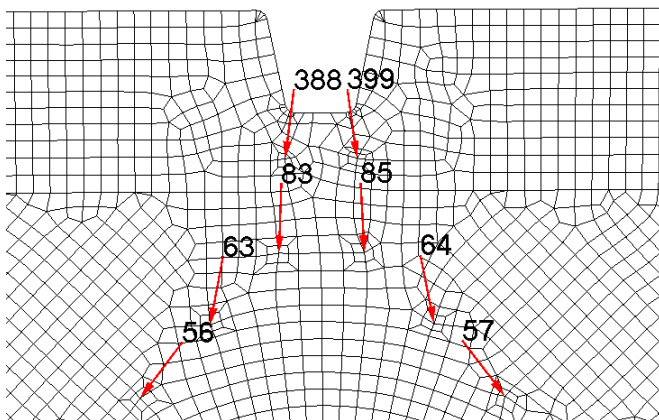
Влияние починки офсетов точек смятия на результат расчета исследовалось на примере воздушного тормоза.

Картина деформирования агрегата



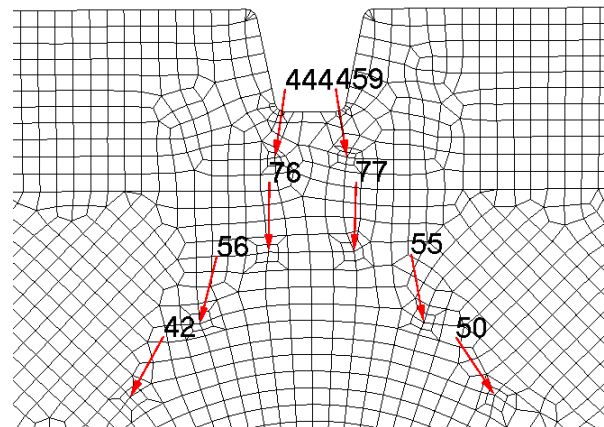
На рисунках ниже показаны силы смятия в верхней панели в районе приводного кронштейна (в модели использован крепеж Рутмана).

До починки офсетов:



*Разница в
максимальных
силах смятия
достигает
15%*

После починки офсетов:



Вывод: учет офсетов точек смятия может существенно повлиять на расчет прочности болтовых соединений.

Программа Fastener Doctor **БЕСПЛАТНА!**

- Программа Fastener Doctor является свободным ПО и распространяется по лицензии GNU GPL версии 3.0.
- Это значит, что каждый может беспрепятственно скачивать, использовать и модифицировать данную программу.



Free as in Freedom



- Программа может работать либо в среде MATLAB (проприетарное ПО), либо в среде GNU Octave – бесплатном свободном ПО (отличается лишь скорость работы).

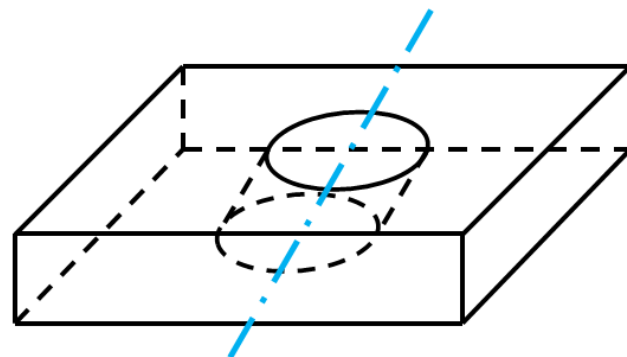
- Программу можно бесплатно скачать на сайте <http://www.fastenerdoctor.ru/>, где помимо нее доступны программа **Aero Load** для нагружения агрегатов самолета аэродинамической нагрузкой и утилита **MPC 2 Bar Converter** для превращения MPC в отверстия в «пауки» из bar-элементов.
- На основе данного кода можно создавать свои инструменты для MSC.Patran!

<http://www.fastenerdoctor.ru/>



Текущие ограничения

- Программа будет неправильно работать на болтах, установленных в скошенные трехмерные отверстия (когда отверстие «просверлено» не по нормали к детали). Необходимо избегать такого крепежа.



- Крепеж Рутмана с симметрией не поддерживается и не распознается программой.

Symmetry Coefficient

☐ 1.0

☒ 0.5

☐ 0.25

- Жесткости смятия в композите вычисляются приближенно, и методика их получения верна только в некоторых случаях (подробности на следующем слайде).

Жесткости смятия в ПКМ

Как считаются жесткости в данной работе:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ k_x \\ k_{xy} \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

$$S_i^{bt} = \frac{1}{\frac{1}{E^f t} + \frac{1}{A_{ii}}}, \quad i = 1, 2$$

$$S_i^{br} = \frac{1}{\frac{12}{E^f t^3} + \frac{1}{D_{ii}}}$$

- Матрица жесткости ламината вычисляется в осях, в которых задана ориентация элементов (как правило, это оси ортотропии ламината).
- Для вращательных жесткостей учитывается положение нейтральной плоскости ламината в каждом направлении с помощью двух отдельных расчетов матриц жесткости.
- В случае металла данные жесткости повторяют формулы Рутмана из работы [3].

Жесткости смятия в ПКМ (2)

Актуальные проблемы:

- Элемент CBUSH в Nastran – это **линейный** оператор, ставящий в соответствие каждому вектору силы смятия вектор перемещений смятия. В ПКМ такое соответствие задается **нелинейным** оператором. Поэтому правильное поведение крепежа в ПКМ нельзя задать в модели заранее и на все возможные расчетные случаи, так как для этого потребуется нелинейный CBUSH, в котором жесткости задаются как функция от направления силы.
- Вариант для Patran / Nastran – это подход с итерациями для нахождения жесткостей CBUSH, описанный в работе [3]. Однако он приводит к тому, что для каждого расчетного случая, фактически, создается отдельная КЭ модель. Вычисляемые в данной работе жесткости можно рассматривать как первую итерацию данного процесса.
- В ПКМ перемещение смятия, в отличие от металла, не совпадает с направлением действия силы смятия. Совпадение достигается лишь в том случае, когда сила смятия действует вдоль одного из направлений ортотропии материала. Методика, примененная в данной работе, корректно описывает поведение крепежа только в этом случае. Поэтому в ходе расчетов требуется контролировать получаемые направления сил смятия.
- Методика получения жесткостей смятия лишь по одному числу из матрицы жесткости ламината хорошо работает для изотропного материала (металл), но является весьма приближенной для ПКМ, где для корректного описания процесса деформирования недостаточно лишь членов A_{11} , A_{22} и D_{11} , D_{22} . Необходимо иметь более сложные аналитические методы расчета жесткостей смятия от элементов крепежа для анизотропных пластин.

Заключение

- В докладе рассмотрены основные трудности создания КЭ моделей конструкций с большим числом крепежных элементов. Целью данной работы является помощь инженерам, работающим в MSC.Patran, в решении этих проблем.
- Разработан бесплатный инструмент для лечения и конвертации крепежа в MSC.Patran – программа Fastener Doctor. Она позволяет преобразовать весь балочный крепеж в базе MSC.Patran в крепеж Рутмана и наоборот, а также осуществить починку любых параметров крепежа, включая жесткости смятия и офсеты. Программа будет полезна инженерам как при создании новых моделей, так и при починке или модификации крепежа в уже имеющихся базах.
- Рассмотрены и проиллюстрированы основные возможности программы по автоматической починке и конвертации крепежа. На примере анализа НДС воздушного тормоза продемонстрирована необходимость соблюдения в модели правильных параметров крепежа.
- Программа Fastener Doctor размещена в свободном доступе в сети Интернет и обладает открытым исходным кодом, позволяющим на ее основе создавать другие инструменты, делающие более эффективной работу в системе MSC.Patran.

Автор проекта и разработчик программы – Михаил Козлов
Связь с разработчиком: doctor.fastener@gmail.com

Спасибо за внимание!

