

РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

программы Fastener Doctor v.1.3



FASTENER DOCTOR

Оглавление

О программе.....	3
1 Список функций и примеры использования программы	5
2 Процедура работы.....	17
2.1 Схема работы программы.....	17
2.2 Описание процедуры работы	18
2.2.1 Подготовка модели в Patran	18
2.2.2 Создание BDF	19
2.2.3 Работа с программой.....	20
2.2.4 Описание настроек программы	20
2.2.5 Проигрывание сессионного файла	33
2.2.6 После проигрывания сессионного файла	33
3 Распознавание крепежа	35
3.1 Поддерживаемые типы сеток и крепежа.....	35
3.2 Устранение проблем с распознаванием крепежа	40
4 Известные проблемы и ограничения	43
5 Теоретическая справка	46
5.1 Вычисление жесткостей смятия в программе Fastener Doctor	46
5.2 Нерешенные проблемы	48
5.3 О BUSH-элементах	49
Список литературы	59

О программе

Что делает программа:

Fastener Doctor – программа для лечения и конвертации крепежа в моделях MSC Patran. С ее помощью инженеры могут автоматически преобразовать весь балочный крепеж в модели в крепеж Рутмана и наоборот, а также осуществить починку любых параметров крепежа, включая жесткости смятия и офсеты.

Правовая информация:

Эта программа распространяется по Универсальной общественной лицензии GNU. Полный текст лицензии поставляется вместе с программой и находится в директории программы в папке License, а также доступен по адресу: <http://www.gnu.org/licenses/>. Основные положения:

- Эта программа является свободным программным обеспечением: Вы можете распространять ее и/или изменять, соблюдая условия Универсальной общественной лицензии GNU, опубликованной Фондом свободного программного обеспечения, либо редакции 3, либо (на Ваше усмотрение) любой редакции, выпущенной позже.
- Эта программа распространяется в надежде на то, что она окажется полезной, но БЕЗ КАКИХ-ЛИБО ГАРАНТИЙ, включая даже подразумеваемую гарантию ТОВАРНОЙ ПРИГОДНОСТИ, либо ПРИГОДНОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ЦЕЛЕЙ. Ознакомьтесь с Универсальной общественной лицензией GNU для получения более подробной информации.

Контакты разработчика:

Copyright (C) 2018 – 2019 Михаил Козлов.

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

Адрес электронной почты для связи с разработчиком:

doctor.fastener@gmail.com

Системные требования:

- ОС: 64-разрядная Windows 7, 8, 8.1, 10.
- Установленный MATLAB (предпочтительно), либо GNU Octave.
- Оперативная память: необходимый объем зависит от размера загружаемой в программу из bdf файла модели. 4 Гб – минимальный объем (небольшие модели), 8 Гб – рекомендуемый объем (большие модели, ~1-2 млн. конечных элементов).

Информация для разработчиков:

- При условии соблюдения положений Универсальной общественной лицензии GNU на основе данной программы можно создавать другое ПО, основанное на чтении модели из bdf файла.
- Список поддерживаемых карточек находится в файле Read_BDF.m.
- Спецификации поддерживаемых в данной версии программы карточек актуальны с Nastran 2010 по Nastran 2018.

ВНИМАНИЕ!

Перед использованием программы ознакомьтесь с разделом
«Известные проблемы и ограничения»!

1 Список функций и примеры использования программы

Список функций программы:

1. Починка крепежа Рутмана:
 - Жесткости BUSH-элементов.
 - 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.
5. Преобразование сеток в местах установки крепежа.
6. Создание в Patran группы с текущим крепежом.
7. Копирование крепежа (создание в Patran группы с дубликатами крепежа в виде балочных болтов).

Починка жесткостей BUSH-элементов

В крепеже Рутмана можно выполнить починку жесткостей BUSH-элементов в металле и в композите. Данная функция может использоваться для обновления жесткостей смятия в крепеже Рутмана после проведения в КЭ модели любых изменений в зонах крепежа: изменения материала, толщины, укладки слоев композита (Рис. 1), либо установки нового твердотельного кронштейна с другими толщинами (Рис. 4).

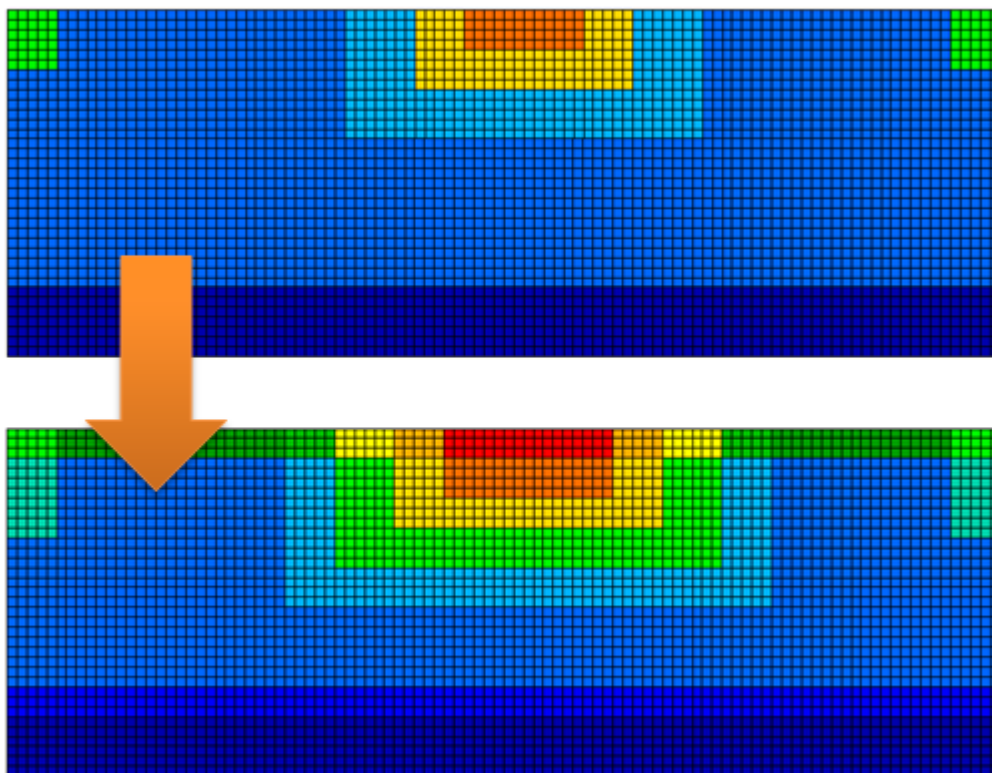


Рис. 1 Изменения толщин материала в процессе проектирования конструкции

Вместе с починкой жесткостей BUSH-элементов также производится починка систем координат в узлах болта.

Внимание! В текущей версии программы жесткости смятия в композите вычисляются приближенно, и методика их получения верна только в некоторых случаях (см. раздел «Теоретическая справка»).

Починка систем координат в узлах болта Рутмана

При починке систем координат во всех узлах болта Рутмана задаются правильные системы координат анализа и референсные системы координат. Данная функция позволит, например, устранить ошибки в случае, когда крепеж Рутмана был импортирован из другой модели, после чего была выполнена операция Equivalence, вследствие которой некоторые узлы крепежа были заменены узлами существующей сетки. В результате этого системы координат анализа в данных узлах окажутся неправильными, что приведет к неправильной работе RBAR в болте. Появление аналогичной

ошибки возможно при установке крепежа Рутмана в отверстия твердотельных кронштейнов с помощью метода фиктивной сетки.

Починка/модификация степеней свободы RBAR

В крепеже Рутмана можно выполнить починку или модификацию степеней свободы RBAR (также автоматически будет произведена починка систем координат в узлах болта). Выполнение починки степеней свободы RBAR может понадобиться, если по каким-то причинам они окажутся неправильными. В этом случае программа присвоит всем RBAR в болте правильные степени свободы. Модификация степеней свободы RBAR может понадобиться, когда пользователь захочет изменить метод закрепления болта Рутмана от поворота вокруг своей оси. Данный параметр контролируется настройкой `RutFast_Axial_Constraint` (см. раздел «Описание настроек программы»). Закрепление может осуществляться:

- Посредством передачи вращательной степени свободы первым RBAR-элементом.
- Через граничное условие, задаваемое пользователем самостоятельно. (Внимание! В этом случае программа освободит стержень болта по осевому вращению. Пользователь должен сам задать граничное условие $R3 = 0$ в одном из узлов стержня болта).

Починка офсетов точек смятия

Пользователь может осуществить починку или удаление офсетов точек смятия в крепеже. Починка офсетов точек смятия нужна для того, чтобы:

- Пластина с офсетом не испытывала паразитный изгиб от действия силы смятия (Рис. 2).
- Длины сегментов стержней крепежа между ярусами соединения соблюдались, и изгиб крепежа моделировался корректно.

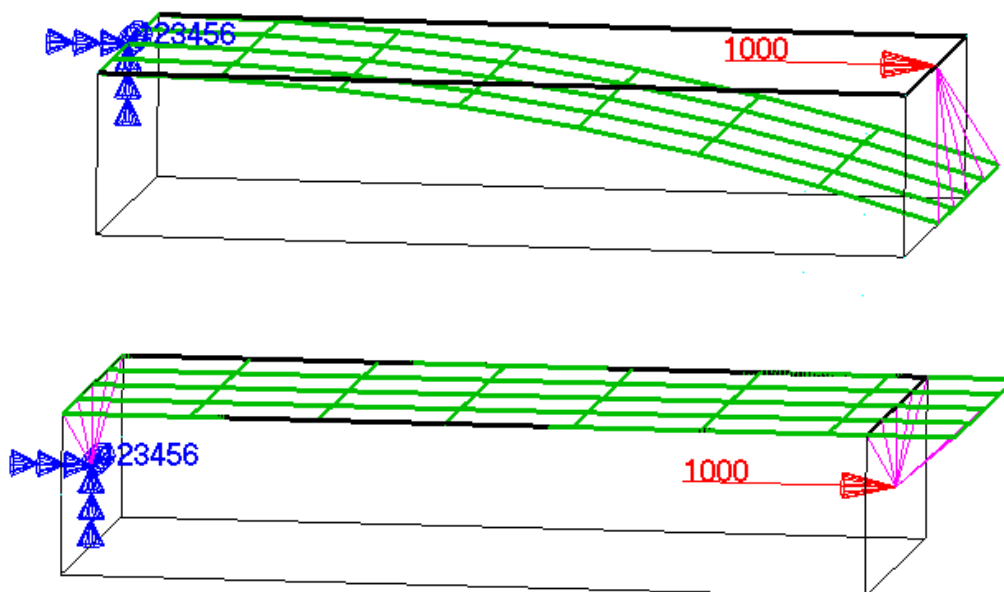


Рис. 2 Сверху – паразитный изгиб пластины с офсетом, когда силы смятия действуют на уровне элементов; снизу – отсутствие паразитного изгиба в пластине с офсетом, когда точки действия сил смятия располагаются на уровне срединной плоскости пластины

В результате починки офсетов точек смятия узлы крепежа переносятся на срединную плоскость пластины, а между узлом крепежа и соответствующим узлом пластины устанавливается RBE2, передающий все степени свободы.

Пользователь также может удалить все офсеты точек смятия в крепеже, если желает. При этом из модели будут удалены соответствующие RBE2, а узлы крепежа станут напрямую привязаны к узлам сетки.

На Рис. 3 показано исправление офсетов точек смятия на примере болта нулевой длины (такое возникает, когда для построения сеток выбраны смежные поверхности двух деталей).

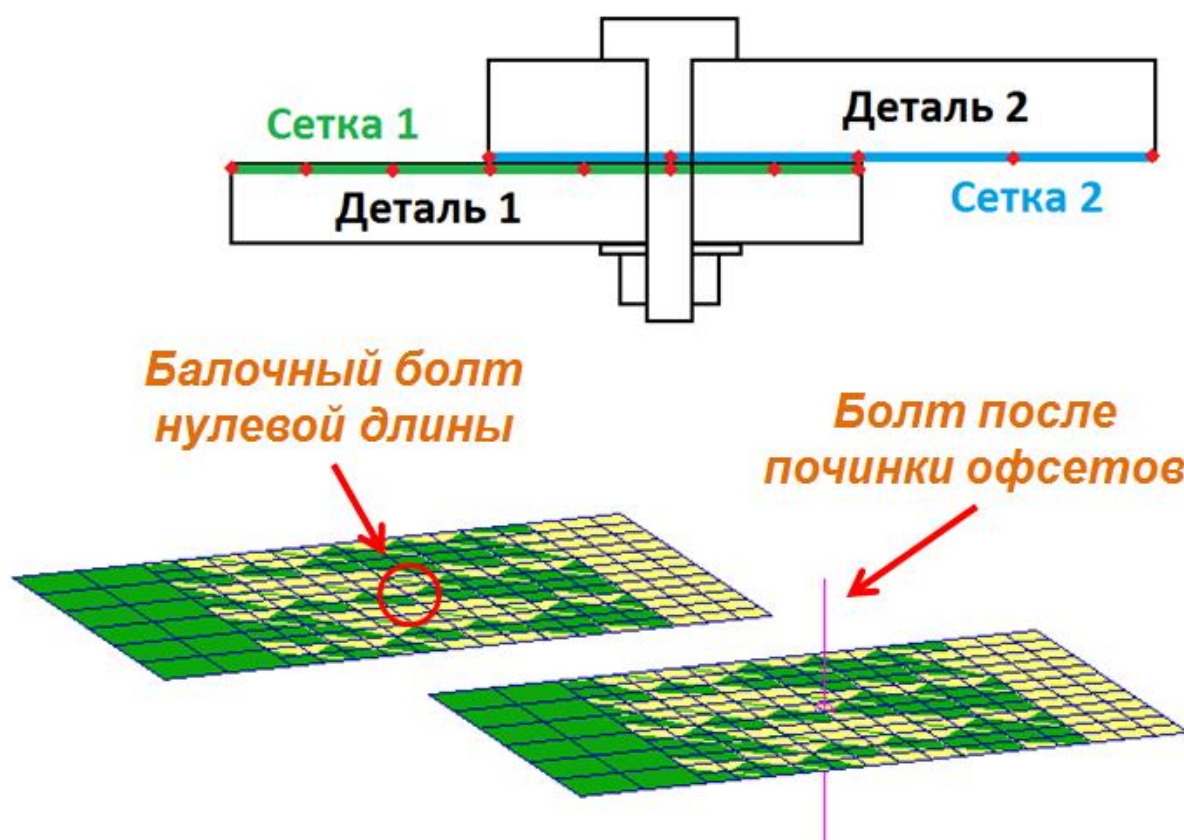


Рис. 3 Иллюстрация починки офсетов точек смятия на примере болта нулевой длины

Починка «пауков» в отверстиях

Крепеж может быть установлен в 2D/3D отверстия в сетке с помощью «пауков» из RBE2 или балочных элементов. Если в результате изменений в модели оказалось так, что центральный узел «паука» больше не находится в центре отверстия (например, к крепежу был присоединен новый кронштейн с измененными толщинами), то пользователь может осуществить починку центрального узла «паука», в результате которой он будет перемещен в центр отверстия. Пример починки «паука» в твердотельном отверстии при изменении толщины пояса кронштейна показан на Рис. 4.

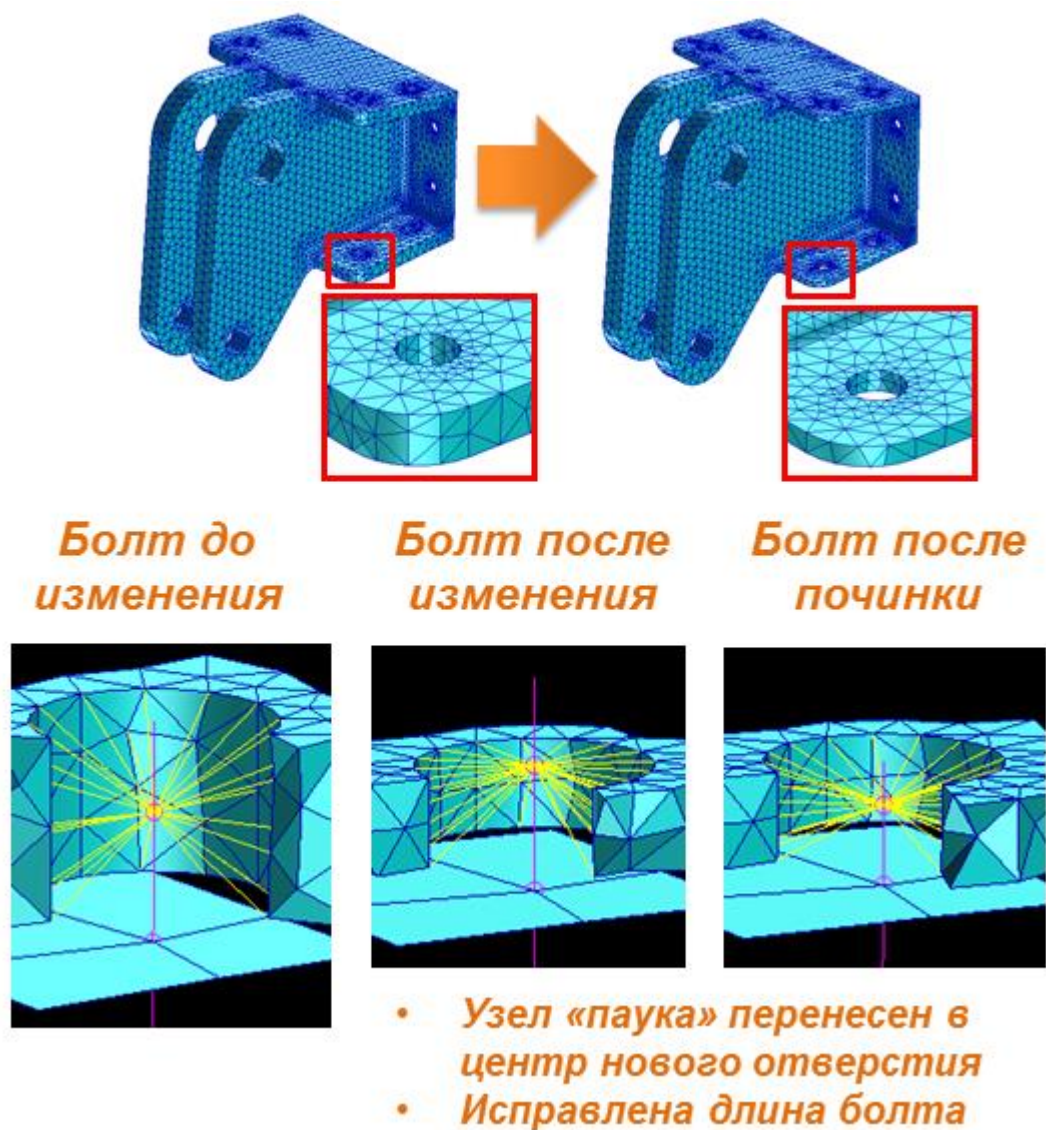


Рис. 4 Пример починки болта в твердом отверстии при изменении толщины пояса кронштейна

Конвертация крепежа

Программа позволяет конвертировать балочный крепеж в крепеж Рутмана, а также крепеж Рутмана в балочный крепеж. При этом в обоих случаях автоматически будет выполнена починка офсетов точек смятия. Пример конвертации балочного крепежа в крепеж Рутмана показан на Рис. 5.

Конвертация крепежа может применяться с целью упрощения установки крепежа Рутмана в КЭ модели. Для этого пользователь сначала расставляет в модели балочный крепеж, а затем использует программу Fastener Doctor для преобразования его в крепеж Рутмана.

Построение в Patran осей распознанного крепежа

В диагностических целях можно выполнить построение в Patran с помощью линий осей крепежа, распознанного программой. Пример построения осей крепежа показан на Рис. 6.

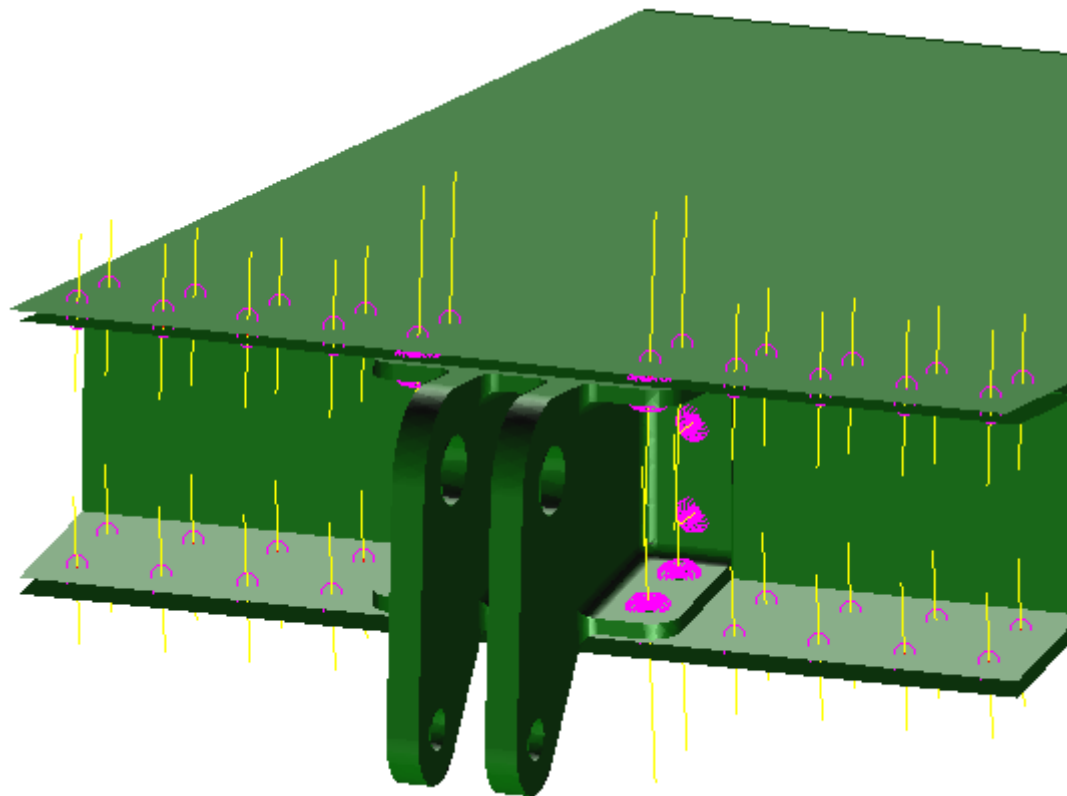


Рис. 6 Построение осей распознанного крепежа

Преобразование сеток в местах установки крепежа

Программа Fastener Doctor позволяет изменять сетку в местах установки крепежа. Можно выполнять взаимное преобразование родственных сеток (Рис. 7 – Рис. 9). На Рис. 10 показан пример установки локального усиления из RBE2 в сетке из оболочечных элементов.

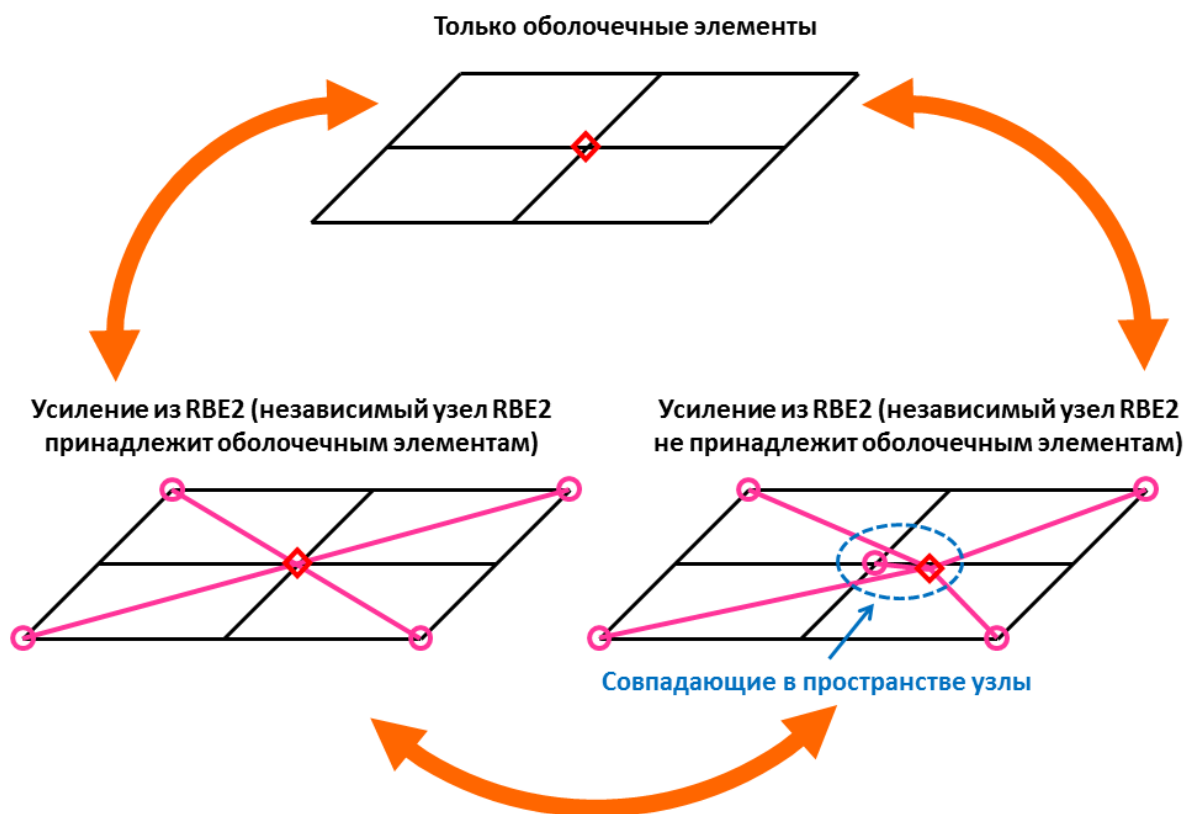


Рис. 7 Возможные взаимные преобразования сеток из оболочечных элементов



Рис. 8 Возможные взаимные преобразования сеток в случае явного отверстия в сетке из оболочечных элементов

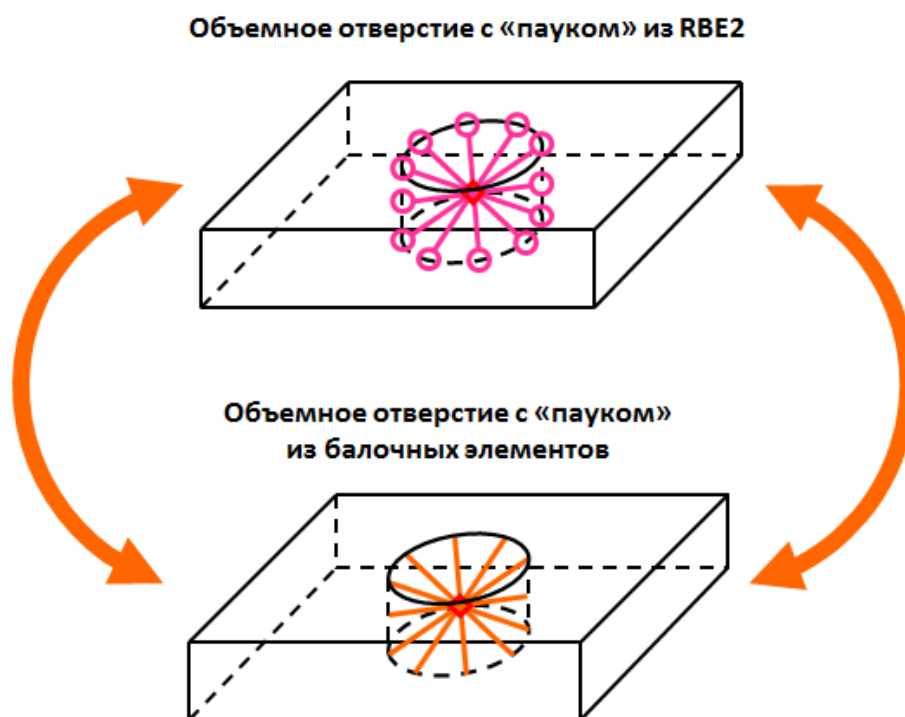


Рис. 9 Возможные взаимные преобразования сеток в случае явного отверстия в сетке из твердотельных элементов

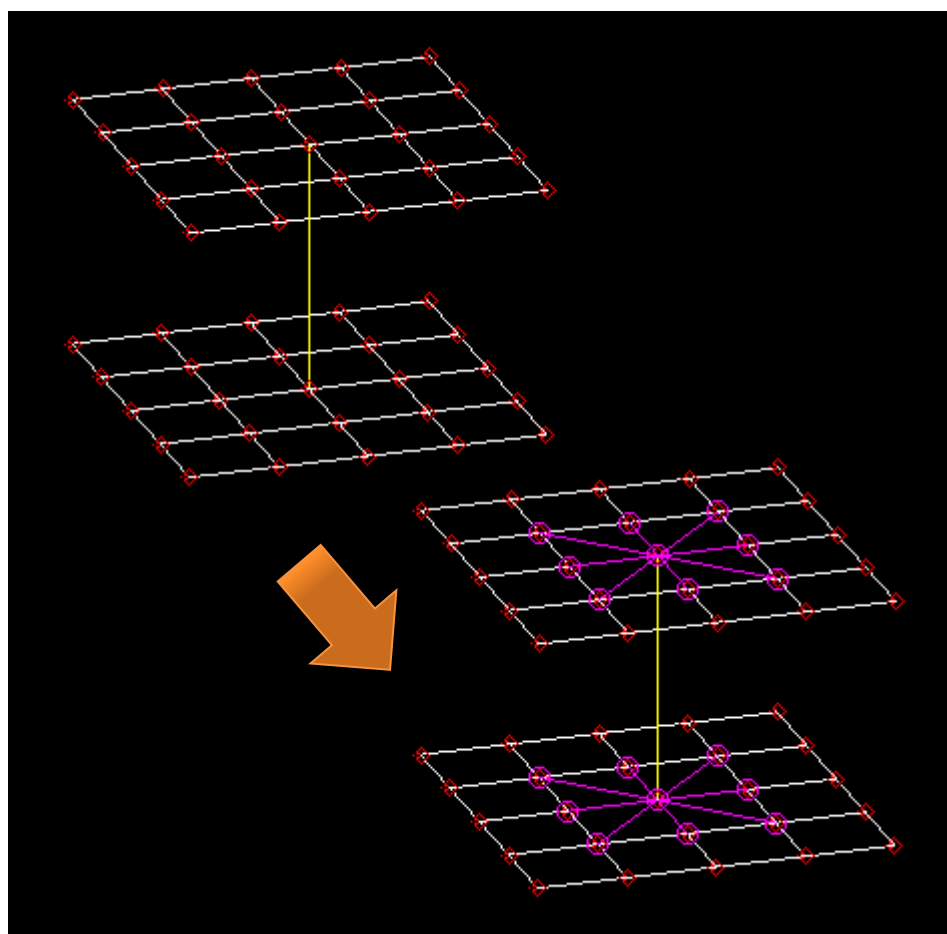


Рис. 10 Пример установки локального усиления из RBE2

Создание в Patran группы с текущим крепежом

Программа Fastener Doctor позволяет создать в Patran группу с заданным именем и поместить в нее весь крепеж, содержащийся в bdf файле. Имя создаваемой группы задается пользователем в настройках программы. В случае балочного крепежа в группе будут содержаться балочные элементы стержней крепежа, MPC для офсетов (если они есть), а также все узлы, ассоциированные с данными элементами и MPC. В случае крепежа Рутмана в группе будут содержаться балочные элементы стержней крепежа, BUSH-элементы, MPC типа RBAR, MPC для офсетов (если они есть), а также все узлы, ассоциированные с данными элементами и MPC. В момент создания данная группа становится текущей группой в Patran.

Создание группы с текущим крепежом можно производить одновременно с выполнением некоторых других видов заданий. В этом случае создание группы с текущим крепежом рекомендуется выполнять последним по счету, чтобы избежать попадания в данную группу элементов сетки, окружающей крепеж, (если выполняется преобразование сеток в местах установки крепежа), либо линий (если выполняется построение осей распознанного крепежа).

Копирование крепежа

С помощью программы Fastener Doctor можно создать в Patran группу с дубликатами крепежа в виде балочных болтов. Данное действие решает задачу создания в модели второго комплекта крепежа, привязанного к тем же узлам сетки, что и имеющийся крепеж. Создание отдельного набора крепежа в той же базе может понадобиться при формировании разных расчетных групп для различных типов расчетов. Например, расчетной группы с крепежом Рутмана для расчета статической прочности и расчетной группы с балочным крепежом для расчета потери устойчивости.

Перед копированием крепежа необходимо убедиться, что весь крепеж, содержащийся в bdf файле, распознается программой. Для этого можно воспользоваться построением осей распознанного крепежа в Patran с помощью линий.

В процессе выполнения данного задания создаются дубликаты только того крепежа, который содержится в bdf файле.

Для дубликатов крепежа создаются новые балочные элементы, которые ассоциируются с теми же property set'ами, что и у имеющегося крепежа.

В создаваемом балочном крепеже можно учесть офсеты точек смятия, используя соответствующую настройку. В этом случае между узлами сетки и узлами крепежа будут созданы RBE2, передающие все степени свободы, а узлы крепежа будут перенесены на срединную плоскость детали.

Данное задание может выполняться совместно только с построением осей распознанного крепежа с помощью линий.

Иное использование программы

При условии соблюдения положений Универсальной общественной лицензии GNU на основе данной программы можно создавать другие инструменты для MSC Patran, основанные на чтении модели из bdf файла.

2 Процедура работы

2.1 Схема работы программы

Схема работы программы приведена на Рис. 11.



Рис. 11 Схема работы программы

Работа с программой состоит из следующих этапов:

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.

2.2 Описание процедуры работы

2.2.1 Подготовка модели в Patran

- В MSC Patran должна быть создана конечно-элементная модель, и в ней расставлен крепеж любого вида (балочный, Рутмана, либо оба вида).
- Поддерживаемые типы крепежа и сеток, куда устанавливается крепеж, рассмотрены в разделе «Поддерживаемые типы сеток и крепежа».
- Распознаваемый программой крепеж Рутмана в оболочечной сетке может быть расставлен с помощью утилиты Fastener Builder (Рис. 18), а также с помощью утилиты Fastener Builder (shells solids) (Рис. 18), если в ней используется настройка Plate-to-Plate-Contact > Rigid. Однако рекомендуется не пользоваться второй утилитой при создании болтов Рутмана (см. раздел "Известные проблемы и ограничения").
- Элементам, граничащим с болтом, должны быть присвоены property set'ы.
- Стержни крепежа должны быть прямолинейными (максимальный допустимый угол излома составляет 1°).
- Внимание! Программа будет неправильно работать на болтах, установленных в скошенные трехмерные отверстия (когда отверстие «просверлено» не по нормали к детали, Рис. 16). Необходимо избегать такого крепежа.
- Если крепеж установлен в 2D отверстие, и от центральной точки отверстия к его кромке ведет RBE2, либо «паук» из балок, то все лучи RBE2/«паука» из балок должны вести только на контур отверстия и не захватывать узлы за контуром отверстия.
- Если крепеж установлен в 3D отверстие, и от центральной точки отверстия к его стенке ведет RBE2, либо «паук» из балок, то все лучи RBE2/«паука» из балок должны вести только на стенку отверстия и не захватывать узлы за стенкой отверстия.

- Крепеж Рутмана с симметрией (Рис. 17) не поддерживается и не распознается программой.
- Если в модели существует болт, установленный в проушину, то переделывать его в болт Рутмана следует с большой осторожностью, так как теория смятия Рутмана описывает только случай расстановки крепежа в регулярные зоны (соединение пластинок), и работа болта в проушине с использованием жесткостей смятия, вычисленных по методике Рутмана, может описываться некорректно.

2.2.2 Создание BDF

- Программа распознает и изменяет только тот крепеж, который был экспортирован в bdf.
- BDF файл должен быть создан в Patran.
- При создании bdf файла в Patran нужно выставить необходимые настройки точности, чтобы в карточках не терялись цифры после запятой (Translation Parameters > Write stored precision – в Patran 2011 и более старых версиях; Translation Parameters > Card format > Large – в Patran 2014 и более новых версиях). После создания bdf файла необходимо в обязательном порядке проверить наличие необходимого количества цифр после запятой в карточках. Если изменение настроек в Translation Parameters не сработало, то необходимо удалить из базы все Jobs, перезапустить Patran, а затем создать все Jobs заново, используя описанные выше настройки точности.
- BDF файл должен быть формата UNSORTED (настройка по умолчанию в Patran). Формат SORTED не поддерживается и никак не обнаруживается программой. Его использование приведет к непредсказуемым последствиям.
- При создании bdf в Translation parameters не нужно ставить галочку напротив параметра Write continuation markers. Маркеры продления строк не поддерживаются в текущей версии программы.

- Карточки в bdf файле могут иметь форматы Small Field и Large Field. Формат Free Field не поддерживается в текущей версии программы.
- Имена карточек в bulk data section должны начинаться с первого символа в строке.
- В обычном случае можно экспортировать в bdf файл всю модель целиком. Если модель содержит большое количество элементов, то рекомендуется сохранять в bdf только ту часть модели, где располагается крепеж, над которым необходимо произвести операции. Вместе с каждым элементом крепежа должен быть сохранен кусок сетки, окружающий его со всех сторон. Требуется хотя бы один ряд конечных элементов вокруг крепежа.
- В bdf файле также могут содержаться RBE3, служащие для раздачи нагрузки. Их лучи могут приходить на любые узлы, принадлежащие скрепляемым деталям, в зонах установки крепежа.

2.2.3 Работа с программой

- Запустите MATLAB, либо GNU Octave.
- Откройте в MATLAB / GNU Octave файл FASTENER_DOCTOR.m.
- Задайте необходимые настройки.
- Запустите программу нажатием клавиши F5 и дождитесь окончания ее выполнения. Информация о выполнении программы появляется в командном окне MATLAB / GNU Octave.
- Сессионный файл с результатами выполнения программы будет создан в той же папке, где располагается bdf файл.

2.2.4 Описание настроек программы

Настройки программы задаются в соответствующем разделе файла FASTENER_DOCTOR.m.

Параметры базы Patran

В данном разделе настроек задаются следующие порядковые номера объектов в базе Patran, а также используемая в модели единица измерения длины (она служит для корректного расчета допусков в моделях, в которых единица измерения длины отлична от мм). Следующие порядковые номера объектов в Patran необходимо знать для создания новых объектов в базе в процессе проигрывания сессионного файла.

Необходимо задать:

- Следующий номер узла в базе Patran (Где смотреть: Elements -> Create -> Node -> значение поля Node ID List).
- Следующий номер элемента в базе Patran (Где смотреть: Elements -> Create -> Element -> значение поля Element ID List).
- Следующий номер MPC в базе Patran (Где смотреть: Elements -> Create -> MPC -> значение поля MPC ID).
- Следующий номер кривой в базе Patran (Где смотреть: Geometry -> Create -> Curve -> значение поля Curve ID List).
- Следующий номер системы координат в базе Patran (Где смотреть: Geometry -> Create -> Coord -> значение поля Coord ID List).
- Следующий номер property set с префиксом FD в базе Patran (Где смотреть: Properties -> Create -> список property set'ов. Пример: если FD_000000325 последний в базе, то нужно задать 326. Если таких property set'ов в базе нет, то нужно задать 1).

Параметры ввода-вывода

В данном разделе указывается рабочая папка (папка, где располагается bdf файл) и имя bdf файла. Имя bdf файла можно указывать как с расширением, так и без него. В рабочей папке будет создан сессионный файл с результатами выполнения программы.

Конфигурирование заданий

В данном разделе настраиваются действия, выполняемые программой. Определенная группа действий называется заданием. В программе существуют следующие семь типов заданий:

1. Починка болтов Рутмана.
2. Починка балочных болтов.
3. Конвертация крепежа.
4. Построение осей распознанного крепежа в Patran с помощью линий.
5. Преобразование сеток в местах установки крепежа.
6. Создание в Patran группы с текущим крепежом.
7. Копирование крепежа (создание в Patran группы с дубликатами крепежа в виде балочных болтов).

За один запуск программы можно выполнить сразу несколько заданий. То, какие задания и в каком порядке будут выполнены при запуске программы, определяется параметром `Task_Order`. Он может принимать значения в виде строки, состоящей из последовательности цифр, обозначающих номер задания. Если цифра отсутствует, то задание соответствующего типа не будет выполняться. Например, если `Task_Order = '241'`, то последовательно будут выполнены задание №2, задание №4, а затем задание №1. Задание № 7 может выполняться совместно только с заданием № 4.

Задание каждого типа можно детально сконфигурировать, указывая в разделе его настроек различные параметры. Например, можно выбрать, что именно чинить при починке крепежа Рутмана. Описание параметров и их возможные значения приведены в Табл. 1 – Табл. 10.

Табл. 1 Параметры починки крепежа Рутмана

Название параметра	Возможные значения	Описание
RutFast_Repair_Bush	TRUE	Починка ориентации и жесткостей BUSH-элементов (также будет произведена починка систем координат в узлах болта).
	FALSE	Жесткости BUSH-элементов останутся без изменений.
RutFast_Repair_Offsets	TRUE	Починка офсетов точек смятия (узлы крепежа переносятся на срединные плоскости соединяемых деталей, и между узлами крепежа и соответствующими узлами деталей устанавливаются RBE2, передающие все степени свободы).
	FALSE	Офсеты точек смятия останутся без изменений.
	REMOVE	Удаление офсетов точек смятия (из модели будут удалены соответствующие RBE2, а узлы крепежа станут напрямую привязаны к узлам сетки).
RutFast_Repair_2D_Holes	TRUE	Центральный узел MPC или «паука» из балочных элементов будет перенесен в центр 2D отверстия.
	FALSE	Центральный узел MPC или «паука» из балок останется без изменений.
RutFast_Repair_3D_Holes	TRUE	Центральный узел MPC или «паука» из балочных элементов будет перенесен в центр 3D отверстия.
	FALSE	Центральный узел MPC или «паука» из балок останется без изменений.
RutFast_Repair_Coord	TRUE	Починка систем координат анализа и референсных систем координат в узлах болта. При этом если у узла болта меняется система координат анализа, то степени свободы, передаваемые соответствующим ему RBAR, перезадаются в новой системе координат.
	FALSE	Починка систем координат производиться не будет, если только не производится починка жесткостей смятия или степеней свободы RBAR.
RutFast_Repair_RBAR_DOFs	TRUE	Починка/модификация степеней свободы RBAR (также будет произведена починка систем координат в узлах болта). Если параметр RutFast_Axial_Constraint установлен в значение RBAR_DOF, то степени

		свободы RBAR будут модифицированы таким образом, что закрепление болта Рутмана от поворота вокруг своей оси будет осуществляться посредством передачи вращательной степени свободы первым RBAR-элементом. Если параметр RutFast_Axial_Constraint установлен в значение USER_BC, то степени свободы RBAR будут модифицированы таким образом, что закрепление болта Рутмана от поворота вокруг своей оси должно будет осуществляться через граничное условие, задаваемое пользователем самостоятельно. В этом случае программа освободит стержень болта по осевому вращению. Пользователь должен будет сам задать граничное условие $R3 = 0$ в одном из узлов стержня болта.
	FALSE	Починка производиться не будет. Степени свободы RBAR останутся без изменений.

Табл. 2 Параметры починки балочного крепежа

Название параметра	Возможные значения	Описание
BarFast_Repair_Offsets	TRUE	Починка офсетов точек смятия (узлы крепежа переносятся на срединные плоскости соединяемых деталей, и между узлами крепежа и соответствующими узлами деталей устанавливаются RBE2, передающие все степени свободы).
	FALSE	Офсеты точек смятия останутся без изменений.
	REMOVE	Удаление офсетов точек смятия (из модели будут удалены соответствующие RBE2, а узлы крепежа станут напрямую привязаны к узлам сетки).
BarFast_Repair_2D_Holes	TRUE	Центральный узел MPC или «паука» из балочных элементов будет перенесен в центр 2D отверстия.
	FALSE	Центральный узел MPC или «паука» из балок останется без изменений.
BarFast_Repair_3D_Holes	TRUE	Центральный узел MPC или «паука» из балочных элементов будет

		перенесен в центр 3D отверстия.
	FALSE	Центральный узел MPC или «паука» из балок останется без изменений.

Табл. 3 Параметры конвертации крепежа

Название параметра	Возможные значения	Описание
Fastener_Conversion	ALL_BAR_TO_RUTMAN	Конвертация балочного крепежа в крепеж Рутмана (также будет произведена починка офсетов точек смятия). При этом если параметр RutFast_Axial_Constraint установлен в значение RBAR_DOF, то степени свободы RBAR будут установлены таким образом, что закрепление болта Рутмана от поворота вокруг своей оси будет осуществляться посредством передачи вращательной степени свободы первым RBAR-элементом. Если параметр RutFast_Axial_Constraint установлен в значение USER_BC, то степени свободы RBAR будут установлены таким образом, что закрепление болта Рутмана от поворота вокруг своей оси должно будет осуществляться через граничное условие, задаваемое пользователем самостоятельно. В этом случае программа освободит стержень болта по осевому вращению. Пользователь должен будет сам задать граничное условие $R3 = 0$ в одном из узлов стержня болта.
	ALL_RUTMAN_TO_BAR	Конвертация крепежа Рутмана в балочный крепеж (также будет произведена починка офсетов точек смятия).

Табл. 4 Параметры построения осей распознанного крепежа

Название параметра	Возможные значения	Описание
--------------------	--------------------	----------

Bolt_Shank_Length_Multiplier	Числовое значение > 0. Рекомендуемый диапазон значений: от 2,0 до 5,0.	Параметр задает множитель, на который будет умножена длина стержня болта. В Patran на месте каждого распознанного стержня болта будет построена линия полученной длины.
------------------------------	--	---

Табл. 5 Параметры преобразования сеток в местах установки крепежа

Название параметра	Возможные значения	Описание
Convert_Mesh_From	PLATE PLATE_RBE2_PARALLEL PLATE_RBE2_SEQUENTIAL RBE2_2D_HOLE BAR_SPIDER_2D_HOLE RBE2_3D_HOLE BAR_SPIDER_3D_HOLE	Код исходного типа сеток, над которыми будут осуществляться преобразования (см. Табл. 6 для подробного описания).
Convert_Mesh_To	Согласно матрице возможных преобразований сеток (Табл. 7) в зависимости от значения параметра Convert_Mesh_From.	Код типа сетки, в который необходимо конвертировать исходный тип. Можно выполнять взаимное преобразование сеток в пределах одной группы совместимости (см. Табл. 6). Сетки типов PLATE_RBE2_PARALLEL и PLATE_RBE2_SEQUENTIAL можно также преобразовывать сами в себя, меняя при этом вид RBE2 с помощью параметра Quad_RBE2_Stiffen_Strategy. Все возможные варианты преобразования сеток собраны в Табл. 7. Если «паук» из RBE2 конвертируется в «паук» из балочных элементов, то исходный RBE2 будет удален из модели. Если «паук» из балочных элементов конвертируется в «паук» из RBE2, то исходные

		балочные элементы будут удалены из модели.
Quad_RBE2_Stiffen_Strategy	EDGE DIAGONAL ALL_DIR	Стратегия раскидывания лучей RBE2 на прямоугольные оболочечные элементы, примыкающие к точке установки болта: EDGE – вдоль ребер, DIAGONAL – вдоль диагоналей, ALL_DIR – вдоль ребер и диагоналей (см. Рис. 12). Данная настройка используется, когда выполняются преобразования сетки в пределах группы 1 (см. Табл. 6), в результате которых устанавливается или модифицируется RBE2, служащий для усиления сетки в месте установки крепежа. Если к точке установки крепежа примыкают треугольные оболочечные элементы, то лучи RBE2 для таких элементов будут раскинуты вдоль их ребер. Если в месте установки крепежа используются оболочечные элементы второго порядка, то лучи RBE2 будут раскинуты только на их угловые узлы.
Bar_Spider_PSet_Name	Строка из латинских символов, удовлетворяющая правилам названий объектов в Patran.	Название имеющегося в модели property set, к которому будут привязаны созданные балочные элементы при конвертации «пауков» из RBE2 в «пауки» из балок. ВНИМАНИЕ! Для конвертации RBE2 в «паук» из балок необходимо, чтобы в bdf файле существовал хотя бы один балочный элемент, имеющий данный property set!

Табл. 6 Таблица кодов сеток

Группа совместимости	Код сетки	Пример	Описание
----------------------	-----------	--------	----------

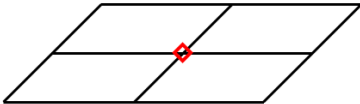
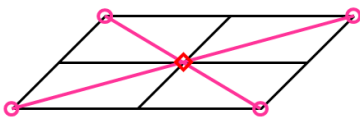
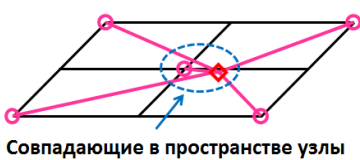
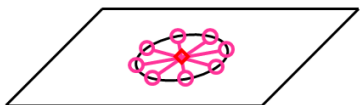
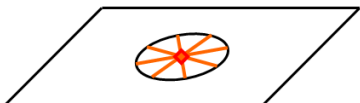
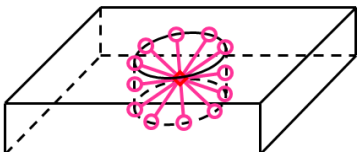
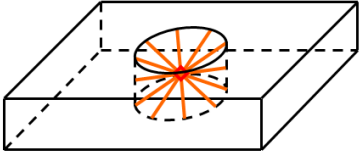
1	PLATE		Сетка из оболочечных элементов.
1	PLATE_RBE2_PARALLEL		Сетка из оболочечных элементов с локальным усилением из RBE2 (независимый узел RBE2 принадлежит оболочечным элементам).
1	PLATE_RBE2_SEQUENTIAL	 Совпадающие в пространстве узлы	Сетка из оболочечных элементов с локальным усилением из RBE2 (независимый узел RBE2 не принадлежит оболочечным элементам).
2	RBE2_2D_HOLE		Явное отверстие в сетке из оболочечных элементов с «пауком» из RBE2.
2	BAR_SPIDER_2D_HOLE		Явное отверстие в сетке из оболочечных элементов с «пауком» из балочных элементов.
3	RBE2_3D_HOLE		Явное отверстие в сетке из твердотельных элементов с «пауком» из RBE2.
3	BAR_SPIDER_3D_HOLE		Явное отверстие в сетке из твердотельных элементов с «пауком» из балочных элементов.

Табл. 7 Матрица возможных преобразований сеток

Целевой тип сетки Исходный тип сетки	PLATE	PLATE_RBE2_PARALLEL	PLATE_RBE2_SEQUENTIAL	RBE2_2D_HOLE	BAR_SPIDER_2D_HOLE	RBE2_3D_HOLE	BAR_SPIDER_3D_HOLE
PLATE		●	●				
PLATE_RBE2_PARALLEL	●	●	●				
PLATE_RBE2_SEQUENTIAL	●	●	●				
RBE2_2D_HOLE					●		
BAR_SPIDER_2D_HOLE				●			
RBE2_3D_HOLE							●
BAR_SPIDER_3D_HOLE						●	

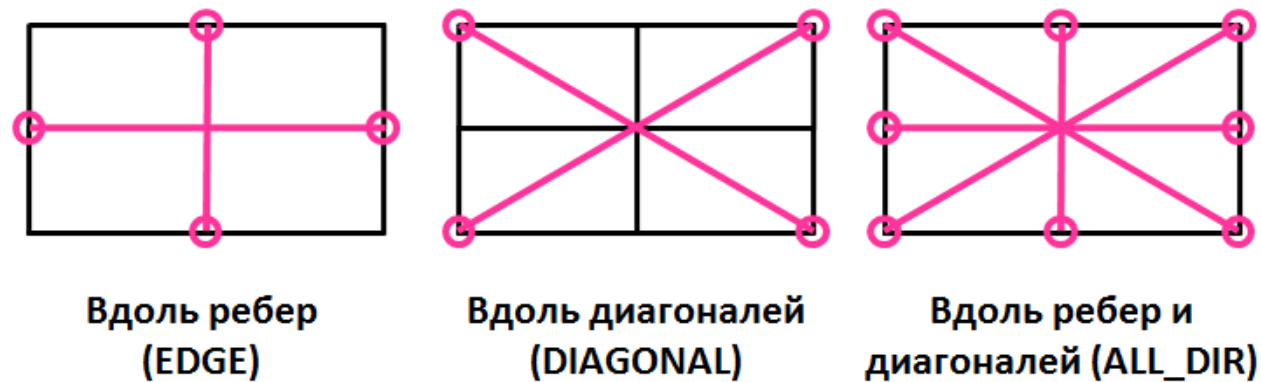


Рис. 12 Стратегия раскидывания лучей RBE2 на прямоугольные оболочечные элементы, задаваемая параметром **Quad_RBE2_Stiffen_Strategy**

Табл. 8 Параметры создания в Patran группы с текущим крепежом

Название параметра	Возможные значения	Описание
Current_Fast_Group_Name	Строка из латинских символов длиной не более 31 символа, удовлетворяющая правилам наименования объектов в Patran.	Название создаваемой в Patran группы, в которую будет помещен текущий крепеж.

Табл. 9 Параметры копирования крепежа

Название параметра	Возможные значения	Описание
--------------------	--------------------	----------

Fast_Copy_Group_Name	Строка из латинских символов длиной не более 31 символа, удовлетворяющая правилам наименования объектов в Patran.	Название создаваемой в Patran группы, в которую будут помещены дубликаты крепежа.
Fast_Copy_Put_Offsets	TRUE	Учет офсетов точек смятия в создаваемом балочном крепеже (узлы крепежа переносятся на срединные плоскости соединяемых деталей, и между узлами крепежа и соответствующими узлами деталей устанавливаются RBE2, передающие все степени свободы).
	FALSE	Офсеты точек смятия не учитываются; балочные элементы стержней крепежа будут напрямую соединены с узлами соединяемых деталей.

Табл. 10 Дополнительные параметры заданий

Название параметра	Возможные значения	Описание
RutFast_Axial_Constraint	RBAR_DOF	Метод закрепления болта Рутмана от поворота вокруг своей оси посредством передачи вращательной степени свободы первым RBAR-элементом. Данная настройка используется при починке крепежа Рутмана, когда параметр RutFast_Repair_RBAR_DOFS установлен в значение TRUE, а также при конвертации крепежа, когда параметр Fastener_Conversion установлен в значение ALL_BAR_TO_RUTMAN.
	USER_BC	Метод закрепления болта Рутмана от поворота вокруг своей оси через граничное условие, задаваемое пользователем самостоятельно. В этом случае программа освободит стержень болта по осевому вращению. Пользователь должен будет сам задать граничное условие $R3 = 0$ в одном из узлов стержня болта. Данная настройка используется при починке крепежа Рутмана, когда

		параметр RutFast_Repair_RBAR_DOFs установлен в значение TRUE, а также при конвертации крепежа, когда параметр Fastener_Conversion установлен в значение ALL_BAR_TO_RUTMAN.
--	--	---

2.2.5 Проигрывание сессионного файла

- **Сделайте резервную копию базы Patran перед запуском сессионного файла!**
- Перед запуском сессионного файла, во время проигрывания которого происходит создание групп с объектами, необходимо убедиться, что в базе отсутствуют группы с соответствующими названиями. Если в базе уже имеется группа с таким же названием, то во время проигрывания сессионного файла новые объекты добавятся к старым объектам, уже содержащимся в этой группе.
- Откройте в Patran базу, из которой был создан bdf.
- Установите нужную текущую группу в Patran (все новые объекты во время проигрывания сессионного файла будут созданы в текущей группе).
- Запустите сессионный файл из меню: File > Session > Play.
- После запуска сессионного файла и до завершения его выполнения не пытайтесь производить никаких действий в окне Patran!
- В командной строке Patran отображается прогресс выполнения сессионного файла в процентах.
- Как только проигрывание сессионного файла завершится, рекомендуется первым же делом сохранить базу, и только потом начинать совершать первые действия в графическом окне.

2.2.6 После проигрывания сессионного файла

- Программа Fastener Doctor создает property set'ы PBUSH с префиксом FD. Не добавляйте в эти property set'ы другие элементы, не меняйте в них системы координат, а также не используйте ассоциированные с ними системы координат где-либо еще в модели. Во время своей работы программа Fastener Doctor исходит из предположения, что с каждым таким property set'ом ассоциирован ровно один элемент, и

используемая для ориентации BUSH-элемента система координат больше нигде не используется.

- После проигрывания в Patran сессионного файла необходимо вручную удалить неиспользуемые системы координат и пустые property set'ы без ассоциированных элементов. Программа автоматически удаляет только те объекты, которые создала сама – property set'ы с префиксом FD и соответствующие системы координат. «Чужие» property set'ы и системы координат программа не удаляет, так как с ними могут быть ассоциированы объекты, не вошедшие в bdf.

3 Распознавание крепежа

3.1 Поддерживаемые типы сеток и крепежа

Программа Fastener Doctor автоматически распознает крепеж в модели, загруженной из bdf файла. В текущей версии программы поддерживаются следующие типы крепежа, схематично показанные на Рис. 13:



Рис. 13 Поддерживаемые в текущей версии программы типы крепежа

Балочный крепеж представляет собой последовательность из одного или более балочных элементов круглого сечения, обладающих одним property set и соединяющих два или более яруса сетки в модели.

Крепеж Рутмана, поддерживаемый в данной версии программы, представляет собой конструкцию из bar-элементов, bush-элементов и MPC типа RBAR, соответствующую правилам построения крепежа из работы [1].

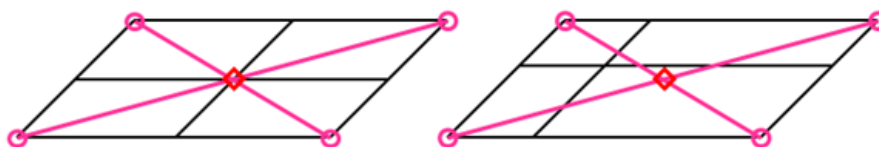
Между узлом крепежа на каждом ярусе сетки и соответствующим узлом сетки дополнительно может располагаться RBE2 с одним зависимым узлом, передающий все степени свободы и служащий для смещения точки смятия на срединную плоскость яруса сетки (см. раздел «Список функций и примеры использования программы»).

Один крепежный элемент соединяет два или более яруса сетки в модели. Структуру окружающей крепеж сетки на k -ом соединяемом ярусе назовем присоединенной топологией k -го яруса сетки. В текущей версии программы поддерживаются следующие типы присоединенной топологии, схематично показанные на Рис. 14:

а) Сетка из оболочечных элементов



б) Сетка с локальным усилением из RBE2



в) Плоские отверстия («паук» из RBE2 / BAR)



г) Объемные отверстия («паук» из RBE2 / BAR)

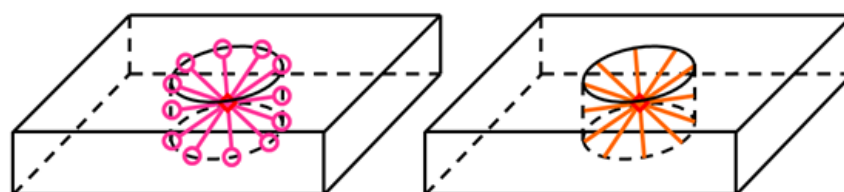


Рис. 14 Поддерживаемые в текущей версии программы типы присоединенной топологии

Каждый элемент крепежа в модели на каждом ярусе может быть связан с любым из перечисленных выше типов присоединенной топологии.

Сетка из оболочечных элементов

Крепеж может быть установлен в сетку из оболочечных элементов, задаваемых карточками CTRIA3, CTRIA6, CQUAD4, CQUAD8 (Рис. 14а). При этом элемент крепежа на ярусе такого типа крепится к единственному

узлу сетки. Оболочечные элементы должны иметь один и тот же property set, задаваемый карточками PCOMP, PCOMPG либо PSHELL. Карточки PCOMP, PCOMPG и PSHELL могут ссылаться на материалы, задаваемые карточками MAT1, MAT2, MAT8. У элементов вокруг крепежа должна быть согласованная ориентация и одинаковые офсеты. К оболочечным элементам в таком типе сетки могут также примыкать твердотельные элементы, служащие для явного моделирования наполнителя в сэндвичных конструкциях. Узлы оболочечных элементов в данном типе сетки могут являться независимыми узлами одного или нескольких RBE3, служащих для раздачи нагрузки.

Сетка из оболочечных элементов с локальным усилением из RBE2

Крепеж может быть установлен в сетку из оболочечных элементов, локально усиленных с помощью RBE2 (Рис. 14б). Оболочечные элементы могут задаваться карточками CTRIA3, CTRIA6, CQUAD4, CQUAD8. Оболочечные элементы должны иметь один и тот же property set, задаваемый карточками PCOMP, PCOMPG либо PSHELL. Карточки PCOMP, PCOMPG и PSHELL могут ссылаться на материалы, задаваемые карточками MAT1, MAT2, MAT8. У элементов вокруг крепежа должна быть согласованная ориентация и одинаковые офсеты. Элемент крепежа на ярусе такого типа должен крепиться к независимому узлу RBE2. Независимый узел RBE2 может как одновременно являться одним из узлов оболочечных элементов, так и существовать отдельно. У RBE2 может быть любое число зависимых узлов на сетке из оболочечных элементов, большее или равное двум. Один из зависимых узлов RBE2 может находиться в той же точке пространства, что и независимый узел. Степени свободы зависимых узлов RBE2 должны быть 123456. К оболочечным элементам в таком типе сетки могут также примыкать твердотельные элементы, служащие для явного моделирования наполнителя в сэндвичных конструкциях. Узлы оболочечных элементов в данном типе сетки могут являться независимыми узлами одного или нескольких RBE3, служащих для раздачи нагрузки.

Отверстия в сетке из оболочечных элементов с «пауком» из RBE2 или из балочных элементов

Крепеж может быть установлен в явные отверстия в сетке из оболочечных элементов, в которых расположен «паук» из RBE2, либо из балок (Рис. 14в). Оболочечные элементы могут быть заданы карточками CTRIA3, CTRIA6, CQUAD4, CQUAD8. Они должны иметь один и тот же property set, задаваемый карточками PCOMP, PCOMPG либо PSHELL. Карточки PCOMP, PCOMPG и PSHELL могут ссылаться на материалы, задаваемые карточками MAT1, MAT2, MAT8. У элементов вокруг крепежа должна быть согласованная ориентация и одинаковые офсеты. Если «паук» задан с помощью RBE2, то степени свободы зависимых узлов RBE2 должны быть 123456. Если «паук» задан с помощью балок, то балки должны иметь один и тот же property set, не совпадающий с property set стержня крепежа и заданный одной из карточек PBAR, PBARL, PBEAM, PBEAML, PBMSECT, PBRSECT, PBCOMP с нулевыми офсетами и отсутствующими Pinned DOFs. Элемент крепежа на ярусе такого типа должен крепиться к центральному узлу «паука». К оболочечным элементам в таком типе сетки не могут примыкать твердотельные элементы, служащие для явного моделирования наполнителя в сэндвичных конструкциях. Узлы оболочечных элементов в данном типе сетки могут являться независимыми узлами одного или нескольких RBE3, служащих для раздачи нагрузки.

Отверстия в сетке из твердотельных элементов с «пауком» из RBE2 или из балочных элементов

Крепеж может быть установлен в явные отверстия в сетке из твердотельных элементов, в которых расположен «паук» из RBE2, либо из балок (Рис. 14г). Твердотельные элементы могут быть заданы карточками CHEXA (8 или 20 узлов), CPENTA (6 или 15 узлов), CTETRA (4 или 10 узлов). Они должны иметь один и тот же property set, задаваемый карточкой PSOLID. Карточка PSOLID должна ссылаться на материал, задаваемый карточкой MAT1. Если «паук» задан с помощью RBE2, то степени свободы

зависимых узлов RBE2 должны быть 123456, либо 123. Если «паук» задан с помощью балок, то балки должны иметь один и тот же property set, не совпадающий с property set стержня крепежа и заданный либо с помощью одной из карточек PBAR, PBARL, PBEAM, PBEAML, PBMSECT, PBRSECT, PBCOMP с нулевыми офсетами и отсутствующими Pinned DOFs, либо с помощью карточки PROD. Элемент крепежа на ярусе такого типа должен крепиться к центральному узлу «паука». На поверхностях, образованных свободными гранями твердотельных элементах, в таком типе сетки не могут располагаться оболочечные элементы, служащие для явного моделирования оболочек в сэндвичных конструкциях. Узлы твердотельных элементов в данном типе сетки могут являться независимыми узлами одного или нескольких RBE3, служащих для раздачи нагрузки.

3.2 Устранение проблем с распознаванием крепежа

Проверить распознанный программой Fastener Doctor крепеж можно с помощью построения в Patran его осей (см. раздел «Список функций и примеры использования программы»).

Если в результате выполнения программы какие-то из элементов крепежа в модели оказались не распознаны, то рекомендуется проверить крепеж на выполнение следующих обязательных условий (в списке приведены далеко не все условия, а лишь наиболее вероятные причины):

Недостаточность информации в bdf

- Программа распознает только тот крепеж, который был экспортирован в bdf.
- Вокруг каждого элемента крепежа на каждом ярусе должен иметься кусок окружающей его со всех сторон сетки. Требуется хотя бы один ряд оболочечных/твердотельных элементов.
- Для элементов, окружающих крепеж, должны быть созданы материалы и назначены property set'ы (иначе они не попадут в bdf).

Неподдерживаемый тип крепежа

- Крепеж Рутмана с симметрией не поддерживается и не распознается программой.
- Крепеж Рутмана с GAP-элементами из работ [2] и [3] не поддерживается программой.
- Крепеж Рутмана, установленный в сетку из твердотельных элементов способами их работ [2] и [3], не поддерживается программой.

Стержни крепежа

- Стержни крепежа должны состоять из балок круглого сечения.

- Все балочные элементы в стержне элемента крепежа должны иметь одинаковый property set.
- Property set стержней крепежа должен задаваться карточками PBAR, PBARL, PBEAM, PBEAML.
- У балочных элементов должны быть нулевые офсеты.
- У балочных элементов не должно быть задано pinned DOFs.
- Стержни крепежа должны быть прямолинейными (максимальный допустимый угол излома составляет 1°).

Присоединенная топология

- Присоединенная топология сетки на каждом ярусе болта должна соответствовать одному из поддерживаемых типов (см. раздел «Поддерживаемые типы сеток и крепежа»).
- У всех элементов, окружающих болт на каком-либо ярусе, должен быть одинаковый property set.
- У всех оболочечных элементов, окружающих болт на каком-либо ярусе, должны быть сонаправленные нормали (в пределах 15°).
- У всех оболочечных элементов, окружающих болт на каком-либо ярусе, должны быть сонаправленные вектора ориентации материала (в пределах 15°), если материал не изотропный.
- У всех оболочечных элементов, окружающих болт на каком-либо ярусе, должен быть одинаковый офсет.
- Нормали оболочечных элементов, окружающих болт на каком-либо ярусе, могут отклоняться от оси болта не более чем на 20° .
- Если крепеж установлен в 3D отверстие, то соответствующим твердотельным элементам должен быть присвоен изотропный материал.
- Узлы на кромке 2D отверстия должны быть равноудалены от стержня болта в пределах заданного допуска.

- Узлы на стенке 3D отверстия должны быть равноудалены от стержня болта в пределах заданного допуска.

Дополнительные возможности

В программе предусмотрена диагностическая функция **Where_Is_My_Bolt (Element_number)**, которая вызывается вручную. Ее аргумент – это номер одного из балочных элементов стержня болта, который не был распознан. Функция выводит диагностическое сообщение о точной причине нераспознавания болта. Функция Where_Is_My_Bolt вызывается в командном окне MATLAB (либо GNU Octave) после завершения работы программы Fastener Doctor. Пример ее вызова показан на Рис. 15.

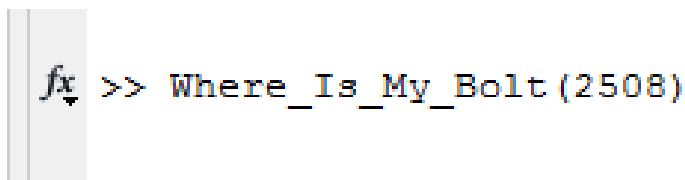
A screenshot of a MATLAB command window. On the left, there is a vertical toolbar with a 'fx' icon. To the right of the toolbar, the command '>> Where_Is_My_Bolt(2508)' is entered in a monospaced font.

Рис. 15 Пример вызова функции Where_Is_My_Bolt для балочного элемента с номером 2508

4 Известные проблемы и ограничения

- Sorted формат файла bdf не поддерживается и никак не обнаруживается программой; его использование приведет к непредвиденным последствиям.
- В текущей версии программы не поддерживается разбор параметров сечений балок произвольной формы в карточках PBRSECT, PBMSECT. Также не считываются карточки SET1, SET3, POINT, POINTAX, задающие параметры сечения. Данная проблема никак не влияет на работу программы, так как предполагается, что стержни крепежа не задаются карточками PBRSECT, PBMSECT.
- Continuation markers в bdf файле не поддерживаются. При создании bdf в Translation parameters не нужно ставить галочку Write continuation markers.
- Программа будет неправильно работать в случае крепежа, установленного в скошенные трехмерные отверстия (то есть когда отверстие «просверлено» не по нормали к детали, Рис. 16). Причина этого в том, что в данном случае толщина детали, необходимая для расчета жесткостей смятия в крепеже Рутмана, определяется путем проецирования узлов со стенки отверстия на ось крепежа. В скошенных отверстиях толщина детали будет завышена, что приведет к некорректному вычислению жесткостей. Центр скошенного отверстия так же находится путем проецирования узлов со стенки отверстия на ось крепежа, поэтому нахождение точки на срединной поверхности детали так же может выполняться некорректно. Необходимо избегать такого крепежа.

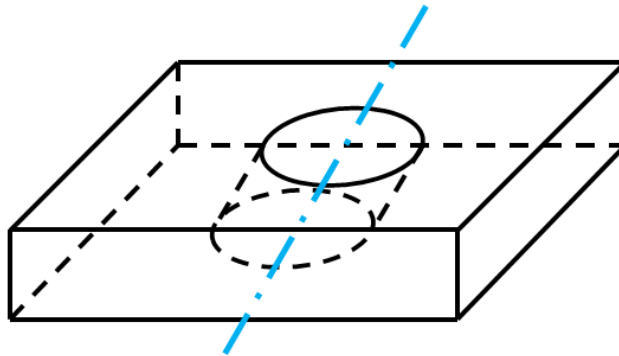


Рис. 16 Скошенное трехмерное отверстие

- Ориентация материала для оболочечных элементов второго порядка может вычисляться не точно, так как для элементов второго порядка используется тот же алгоритм, что и для элементов первого порядка. Однако это не должно приводить к сколь-нибудь заметным ошибкам. Для получения дополнительной информации об ориентации материала в элементах второго порядка ознакомьтесь с описанием карточек CTRIA6 и CQUAD8 в MSC Nastran Quick Reference Guide.
- Жесткости смятия в композите вычисляются приближенно, и методика их получения верна только в некоторых случаях (см. раздел «Теоретическая справка»).
- Крепеж Рутмана с симметрией (Рис. 17) не поддерживается и не распознается программой. Разработчик не планирует добавлять его поддержку.

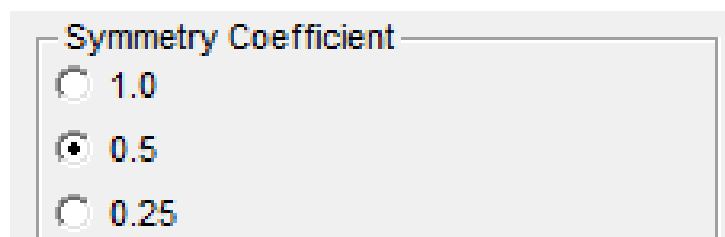


Рис. 17 Установка крепежа Рутмана с симметрией

- Если в Patran ориентация bar-элементов в property set задана с помощью Field, и эти элементы составляют стержень балочного болта, то при его конвертации в болт Рутмана два новых созданных балочных элемента в начале и в конце стержня болта останутся без присвоенной ориентации. Причина этого в том, что в bdf файле нет информации о

том поле ориентации, которое использовалось в базе Patran, и пополнить его новыми элементами в данной ситуации невозможно.

Решением данной проблемы, если она появилась, является задание ориентации балочных элементов в таком болте вручную.

Например, такая проблема может появиться, если изначально в базе имелся крепеж Рутмана, созданный с помощью второй стандартной утилиты в Patran – Fastener Builder (shells solids), Рис. 18, – она создает Field для задания ориентации балочных элементов. Затем этот крепеж с помощью программы Fastener Doctor был конвертирован в балочный, а после этого снова в крепеж Рутмана.

Чтобы избежать появления данной проблемы, не используйте утилиту Fastener Builder (shells solids) для создания крепежа Рутмана. Вместо этого либо устанавливайте балочный крепеж и конвертируйте его в крепеж Рутмана с помощью программы Fastener Doctor, либо используйте для создания крепежа Рутмана утилиту Fastener Builder (Рис. 18).

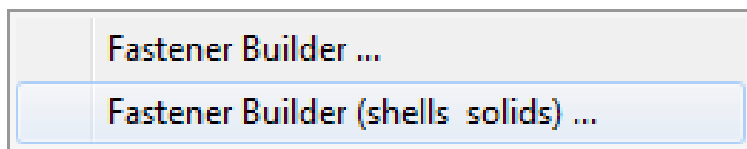


Рис. 18 Стандартные утилиты Patran для установки крепежа Рутмана

5 Теоретическая справка

5.1 Вычисление жесткостей смятия в программе *Fastener Doctor*

Вычисление жесткостей смятия в металле

Поступательные и вращательные жесткости смятия для металлического яруса крепежного соединения вычисляются согласно методике из работы [3]:

$$S^{bt} = \frac{1}{\frac{1}{E^f t} + \frac{1-\nu^2}{Et}}, \quad S^{br} = \frac{1}{\frac{12}{E^f t^3} + \frac{12(1-\nu^2)}{Et^3}}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости пластины, ν – коэффициент Пуассона пластины, E^f – модуль упругости крепежа, t – толщина пластины. BUSH-элементу на соответствующем ярусе присваиваются следующие жесткостные константы:

$$\begin{aligned} K_1 &= S^{bt}, & K_4 &= S^{br}, \\ K_2 &= S^{bt}, & K_5 &= S^{br}, \\ K_3 &= 0, & K_6 &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Определяющее соотношение классической ламинатной теории

Определяющее соотношение классической ламинатной теории [4] имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Здесь N_x, N_y, N_{xy} – потоки сил, M_x, M_y, M_{xy} – потоки моментов, $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \varepsilon_{xy}^0$ – деформации срединной плоскости, k_x, k_y, k_{xy} – кривизны. Матрица размером 6х6 называется матрицей жесткости ламината.

Вычисление жесткостей смятия в композите

Первая матрица жесткости ламината вычисляется в осях (X,Y), где X – направление ориентации материала в property set, Y – перпендикулярное ему направление. При этом в качестве базовой плоскости берется нейтральная плоскость ламината при изгибе, создающем кривизну k_x . Поступательные и вращательные жесткости смятия для композитного яруса крепежного соединения, имеющие индекс 1, вычисляются с помощью членов A_{11} и D_{11} данной матрицы жесткости ламината:

$$S_1^{bt} = \frac{1}{\frac{1}{E^f t} + \frac{1}{A_{11}}}, \quad S_1^{br} = \frac{1}{\frac{12}{E^f t^3} + \frac{1}{D_{11}}}, \quad (4)$$

где E^f – модуль упругости крепежа, t – толщина пластины.

Вторая матрица жесткости ламината вычисляется в тех же осях, но в качестве базовой плоскости берется нейтральная плоскость ламината при изгибе, создающем кривизну k_y . Поступательные и вращательные жесткости смятия для композитного яруса крепежного соединения, имеющие индекс 2, вычисляются с помощью членов A_{22} и D_{22} данной матрицы жесткости ламината:

$$S_2^{bt} = \frac{1}{\frac{1}{E^f t} + \frac{1}{A_{22}}}, \quad S_2^{br} = \frac{1}{\frac{12}{E^f t^3} + \frac{1}{D_{22}}}, \quad (5)$$

где E^f – модуль упругости крепежа, t – толщина пластины.

BUSH-элементу на соответствующем ярусе присваиваются следующие жесткостные константы:

$$\begin{aligned}
K_1 &= S_1^{bt}, & K_4 &= S_2^{br}, \\
K_2 &= S_2^{bt}, & K_5 &= S_1^{br}, \\
K_3 &= 0, & K_6 &= 0.
\end{aligned}
\tag{6}$$

Соотношения (4) и (5) являются обобщением на композит формул Рутмана из работы [3] и в случае пластины из металла повторяют соотношения (1).

5.2 Нерешенные проблемы

В рамках описанного выше подхода жесткости смятия в композите вычисляются приближенно, и методика их получения верна только в некоторых случаях. Причины этого следующие:

- 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 (Рис. 19). 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.

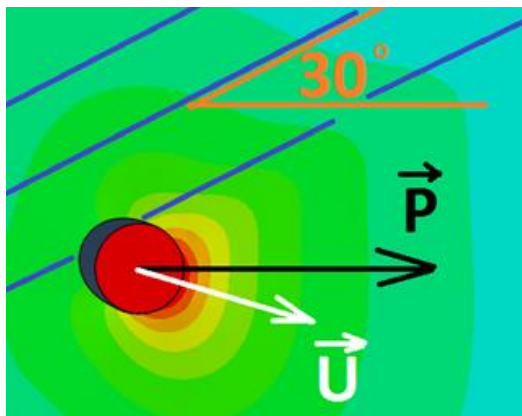


Рис. 19 Несовпадение направления перемещений смятия с направлением действия силы смятия в однонаправленном композите. Армирующие волокна ориентированы под углом 30° к направлению действия силы смятия

- Методика получения жесткостей смятия лишь по одному числу из матрицы жесткости ламината хорошо работает для изотропного материала (металл), но является весьма приближенной для слоистых композитов, где для корректного описания процесса деформирования недостаточно только членов A_{11} , A_{22} , D_{11} и D_{22} . Необходимо иметь более точные аналитические методы расчета жесткостей смятия от элементов крепежа для анизотропных пластин. Для разработки таких методов будет полезна книга [5].

5.3 О BUSH-элементах

Определяющие соотношения BUSH-элемента

Рассмотрим работу BUSH-элемента в Nastran. Ограничимся только поступательными перемещениями по направлениям X и Y. В этом случае жесткостные характеристики элемента задаются двумя константами: K_1 и K_2 . Определяющее соотношение в главных осях элемента имеет вид:

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где F_1 и F_2 – компоненты вектора силы смятия, u_1 и u_2 – компоненты вектора перемещения смятия. Если BUSH-элемент с жесткостями K_1 и K_2 ориентирован под углом α к направлению оси X некоторой системы координат, то определяющее соотношение в осях (X,Y) запишется в виде:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 \cos^2 \alpha + K_2 \sin^2 \alpha & (K_1 - K_2) \sin \alpha \cos \alpha \\ (K_1 - K_2) \sin \alpha \cos \alpha & K_2 \cos^2 \alpha + K_1 \sin^2 \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} \quad (8)$$

Обратное соотношение получается обращением матрицы жесткости элемента в (8):

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\cos^2 \alpha}{K_1} + \frac{\sin^2 \alpha}{K_2} & \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{K_1} - \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{K_2} \\ \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{K_1} - \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{K_2} & \frac{\sin^2 \alpha}{K_1} + \frac{\cos^2 \alpha}{K_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} \quad (9)$$

Легко видеть, что если $K_1 = K_2$, то матрицы жесткости и податливости в соотношениях (8) и (9) получаются диагональными, и в этом случае вектор силы всегда коллинеарен вектору перемещения.

Если имеется система из N параллельно работающих BUSH-элементов, каждый из которых имеет различные жесткости и ориентацию по отношению к оси X некоторой системы координат, то работа системы таких элементов в осях (X,Y) задается соотношением

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N (K_1^i \cos^2 \alpha^i + K_2^i \sin^2 \alpha^i) & \sum_{i=1}^N (K_1^i - K_2^i) \sin \alpha^i \cos \alpha^i \\ \sum_{i=1}^N (K_1^i - K_2^i) \sin \alpha^i \cos \alpha^i & \sum_{i=1}^N (K_2^i \cos^2 \alpha^i + K_1^i \sin^2 \alpha^i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где K_1^i , K_2^i и α^i – жесткости и угол ориентации элемента с номером i . Обратный закон можно получить, обратив матрицу жесткости из формулы (10).

Из последних соотношений следует, что BUSH-элемент в Nastran, либо система параллельно работающих BUSH-элементов – это линейный оператор, ставящий в соответствие каждому вектору силы смятия вектор перемещений смятия. Для него выполняются следующие свойства линейности:

$$\begin{aligned} 1) \quad \vec{u}(\vec{F}_1 + \vec{F}_2) &= \vec{u}(\vec{F}_1) + \vec{u}(\vec{F}_2) \\ 2) \quad \vec{u}(\lambda \vec{F}) &= \lambda \vec{u}(\vec{F}) \end{aligned} \tag{11}$$

Этот оператор, как и любой другой линейный оператор, в некоторой системе координат может быть задан матрицей A из констант, которая при переходе к новой системе координат преобразуется по тензорному закону: $A' = C^{-1} A C$, где C – матрица перехода. Следовательно, для полного описания BUSH-элемента (либо системы таких элементов) как оператора достаточно знать его матрицу в какой-либо системе координат.

Свойство неколлинеарности

Рассмотрим определяющее соотношение BUSH-элемента в главных осях (7). Если вектор силы сонаправлен с одной из главных осей BUSH-элемента, то он сонаправлен и с вектором перемещения. Если направление действия вектора силы не совпадает с главными осями элемента, то из (7) можно получить

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{F_2}{F_1} \frac{K_1}{K_2}, \tag{12}$$

откуда следует, что в этом случае

$$\vec{u} \parallel \vec{F} \Leftrightarrow K_1 = K_2 \tag{13}$$

Следовательно, если $K_1 \neq K_2$, то BUSH-элемент обладает свойством неколлинеарности: перемещение смятия, не совпадает с направлением

действия силы смятия. Совпадение достигается только в случае, когда сила смятия действует вдоль одного из главных направлений элемента.

Жесткость в направлении силы смятия

Для BUSH-элемента с жесткостями $K_1 \neq K_2$, обладающего свойством неколлинеарности, введем жесткость в направлении действия силы смятия. Она определяется как коэффициент, связывающий проекцию вектора перемещения на направление действия силы смятия с вектором силы смятия. Жесткость BUSH-элемента в направлении действия силы смятия является функцией от угла φ , который вектор силы смятия составляет с осью X. Для BUSH-элемента в его главных осях имеем:

$$K_F(\varphi) = \frac{1}{\frac{\cos^2 \varphi}{K_1} + \frac{\sin^2 \varphi}{K_2}} \quad (14)$$

Построим графики функции $K_F(\varphi)$ в полярных координатах (R, φ) для различных соотношений жесткостей K_1 и K_2 (Рис. 20 – Рис. 23).

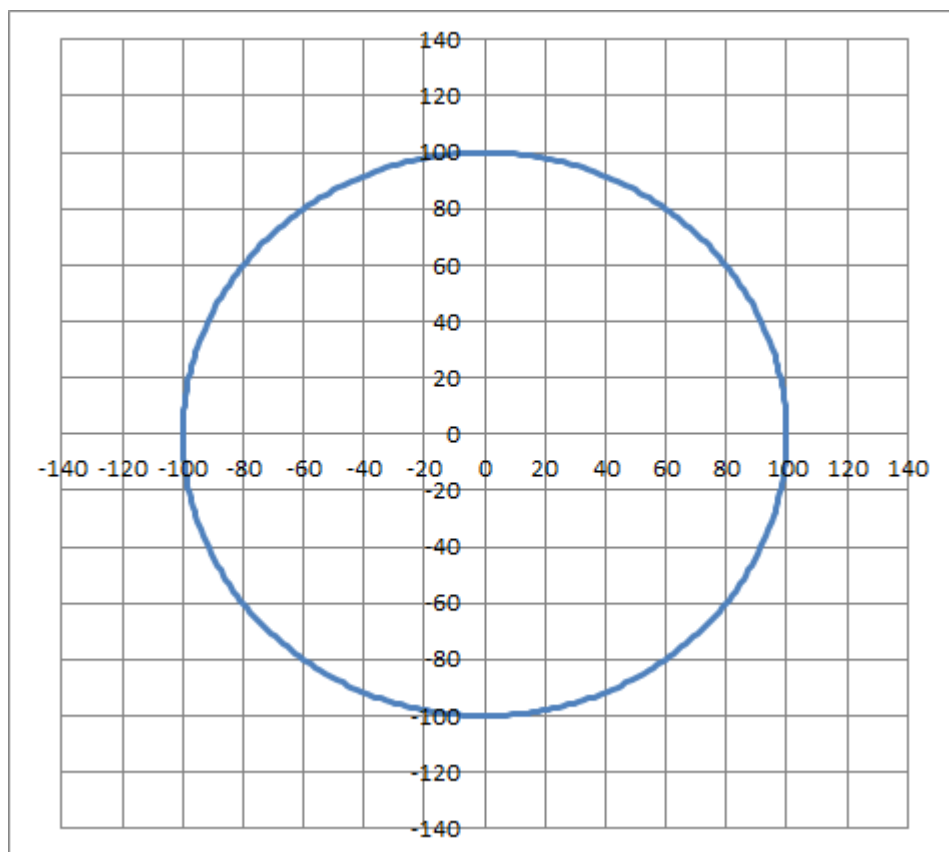


Рис. 20 Жесткость в направлении действия силы смятия BUSH-элемента с жесткостями $K_1 = 100$, $K_2 = 100$. Форма – окружность.

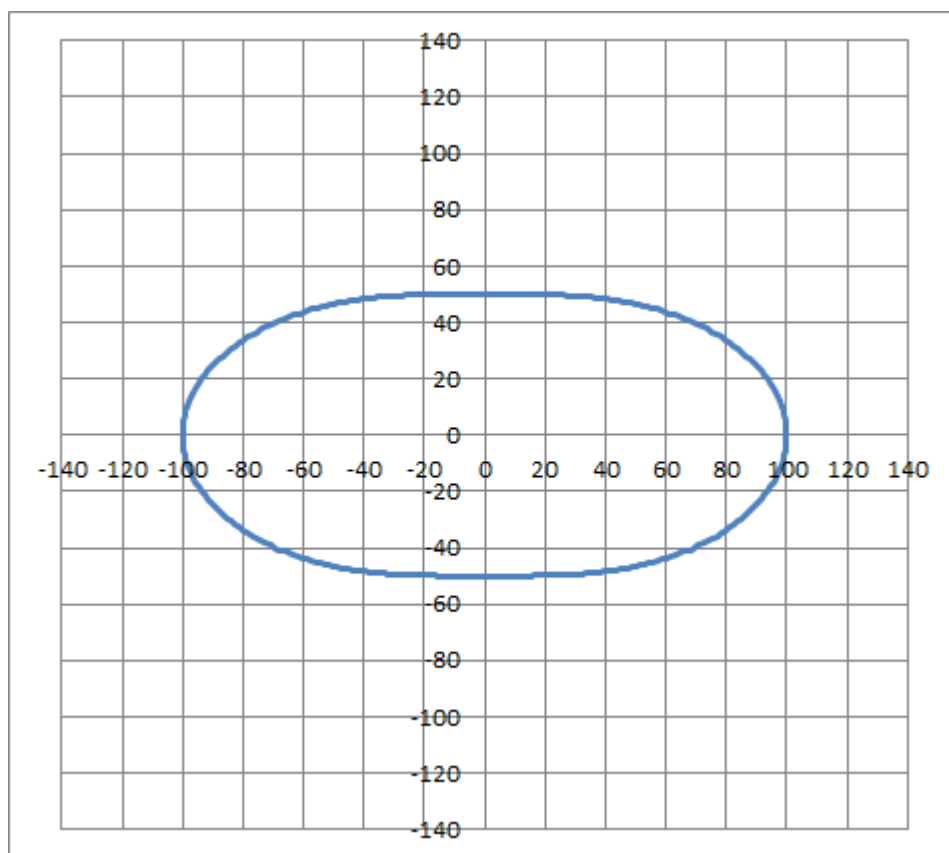


Рис. 21 Жесткость в направлении действия силы смятия BUSH-элемента с жесткостями $K_1 = 100$, $K_2 = 50$. Форма – «овал».

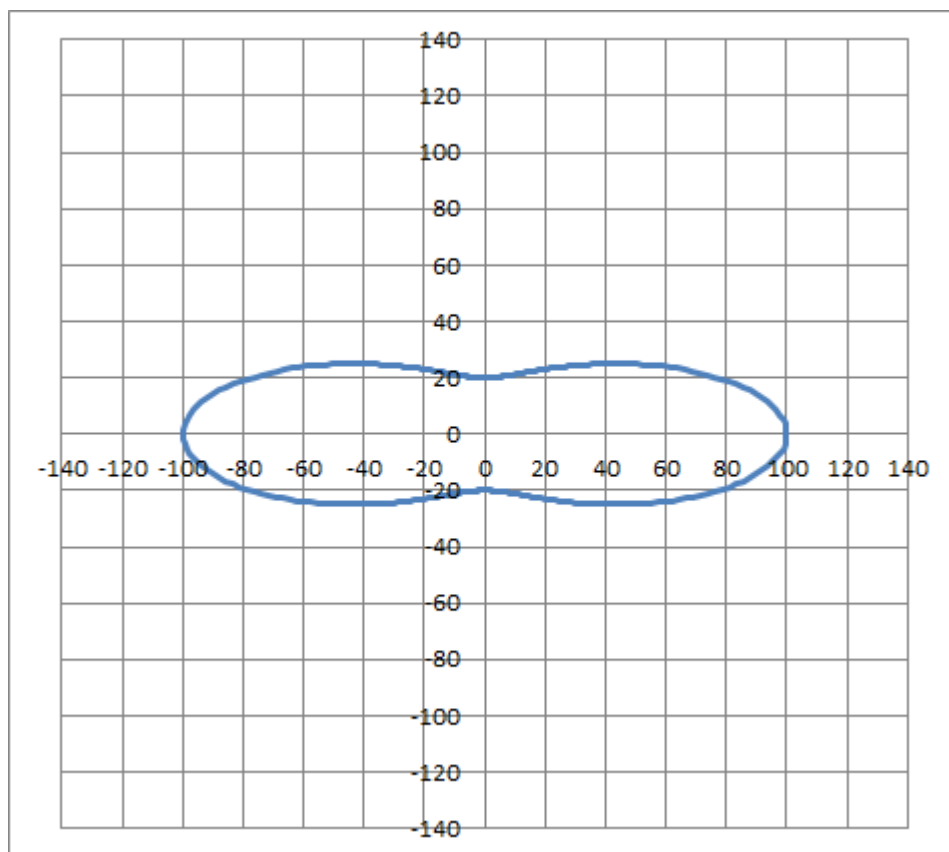


Рис. 22 Жесткость в направлении действия силы смятия BUSH-элемента с жесткостями $K_1 = 100$, $K_2 = 20$. Форма – «восьмерка».

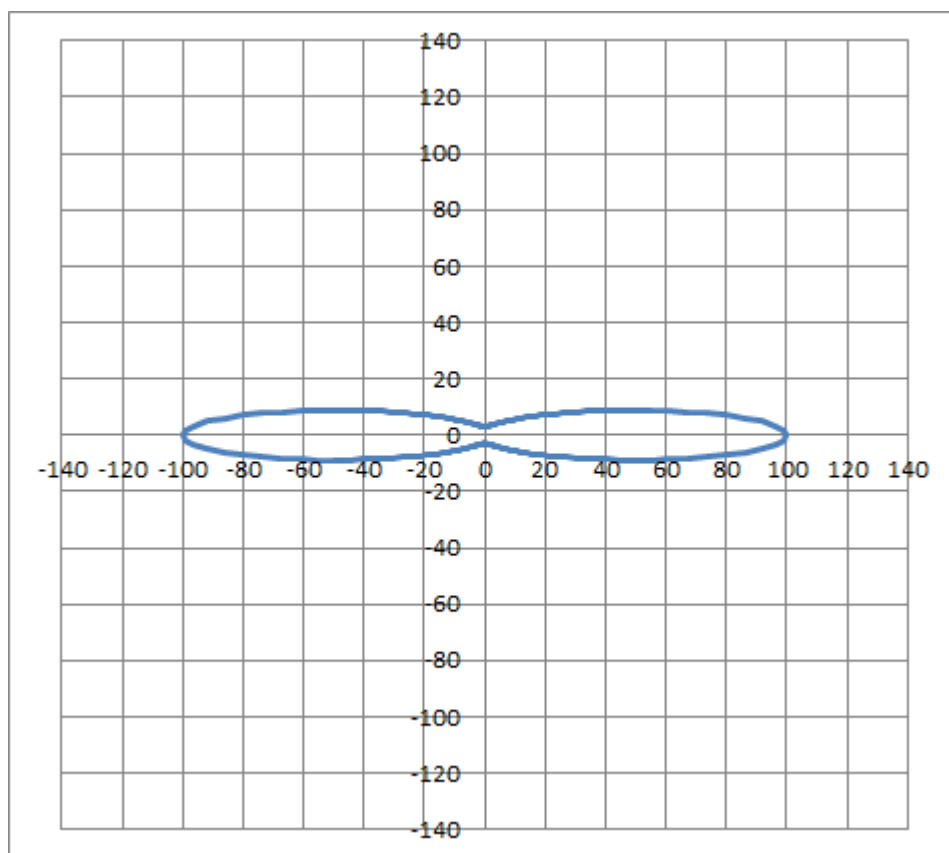


Рис. 23 Жесткость в направлении действия силы смятия BUSH-элемента с жесткостями $K_1 = 100$, $K_2 = 3$. Форма – «воздушный винт».

Жесткость в направлении действия силы смятия для BUSH-элемента, ориентированного под углом α к направлению оси X, имеет вид:

$$K_F(\varphi) = \frac{1}{\frac{\cos^2(\varphi - \alpha)}{K_1} + \frac{\sin^2(\varphi - \alpha)}{K_2}} \quad (15)$$

Для системы из N параллельно работающих BUSH-элементов с различными жесткостями и ориентацией по отношению к оси X жесткость в направлении действия силы смятия задается следующим образом:

$$K_F(\varphi) = \frac{ad - b^2}{d}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} a &= \sum_{i=1}^N \left(K_1^i \cos^2(\varphi - \alpha^i) + K_2^i \sin^2(\varphi - \alpha^i) \right), \\ b &= \sum_{i=1}^N \left(K_1^i - K_2^i \right) \sin(\varphi - \alpha^i) \cos(\varphi - \alpha^i), \\ d &= \sum_{i=1}^N \left(K_2^i \cos^2(\varphi - \alpha^i) + K_1^i \sin^2(\varphi - \alpha^i) \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь K_1^i , K_2^i и α^i – жесткости и угол ориентации элемента с номером i .

Аппроксимация жесткостей смятия в ламинате с процентным содержанием армирующего наполнителя [10/80/10]

Рассмотрим ламинат из однонаправленных слоев со следующим процентным содержанием армирующего наполнителя: 0° — 10%, $\pm 45^\circ$ — 80%, 90° — 10%. Поступательная жесткость в направлении действия силы смятия для данного яруса крепежного соединения, рассчитанная по формуле (4), показана на Рис. 24.

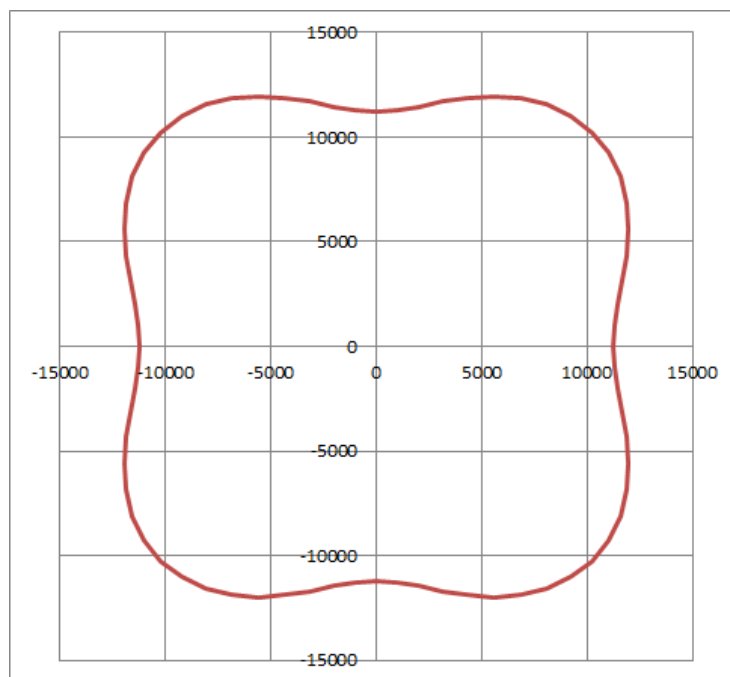


Рис. 24 Поступательная жесткость в направлении действия силы смятия для крепежа в ламинате с процентным содержанием армирующего наполнителя [10/80/10]

Полученная кривая имеет характерную форму, которую нельзя приблизить с использованием одного BUSH-элемента (Рис. 20) без появления заметных ошибок в жесткостных свойствах соединения. Исследуем возможность аппроксимации данной кривой с помощью системы из двух параллельно работающих BUSH-элементов, расположенных под углами $\pm 45^\circ$ к оси X (Рис. 25).

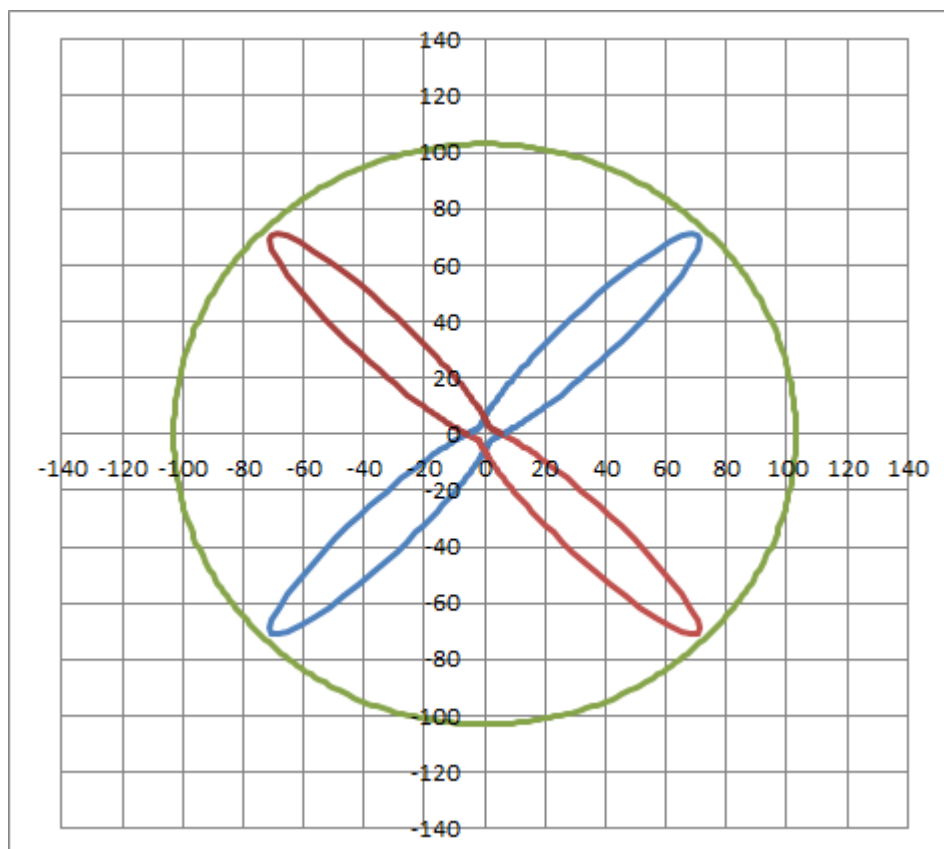


Рис. 25 Жесткость в направлении действия силы смятия двух BUSH-элементов, расположенных под углами $\pm 45^\circ$ к оси X, в случае их совместной работы (зеленая кривая) и работы по-отдельности (синяя и красная кривые)

Вместо изображенной на Рис. 24 фигуры получилась окружность. Причиной такого эффекта является выполнение любой системой параллельно работающих BUSH-элементов свойств линейного оператора (11), первое из которых должно нарушаться в случае кривой, изображенной на Рис. 24 (для демонстрации этого достаточно представить вектор силы смятия, сонаправленный с осью X, как сумму векторов по направлениям $\pm 45^\circ$).

Таким образом, точную аппроксимацию данной фигуры нельзя получить никакой комбинацией параллельно работающих BUSH-элементов.

Выводы

BUSH-элемент в Nastran – это линейный оператор, ставящий в соответствие каждому вектору силы смятия вектор перемещений смятия. В композитах такое соответствие задается нелинейным оператором. Поэтому

правильное поведение крепежа в композите нельзя задать в модели заранее и на все возможные расчетные случаи, то есть на все возможные направления действия сил и моментов смятия, так как для этого потребуется нелинейный BUSH-элемент, в котором жесткости задаются как функция от направления силы. Поэтому для корректного моделирования смятия жесткости BUSH-элементов в случае композита требуется вычислять в фактических направлениях действия сил и моментов смятия.

Список литературы

- [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.
- [4] O.O. Ochoa, J.N. Reddy. Finite Element Analysis of Composite Laminates. Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] С.Г. Лехницкий. Анизотропные пластинки. ОГИЗ, 1947.