

Marc – комплексный нелинейный
анализ конструкций, решение
сложных задач термо-прочности,
электро- и магнитостатики,
моделирование технологических
процессов.

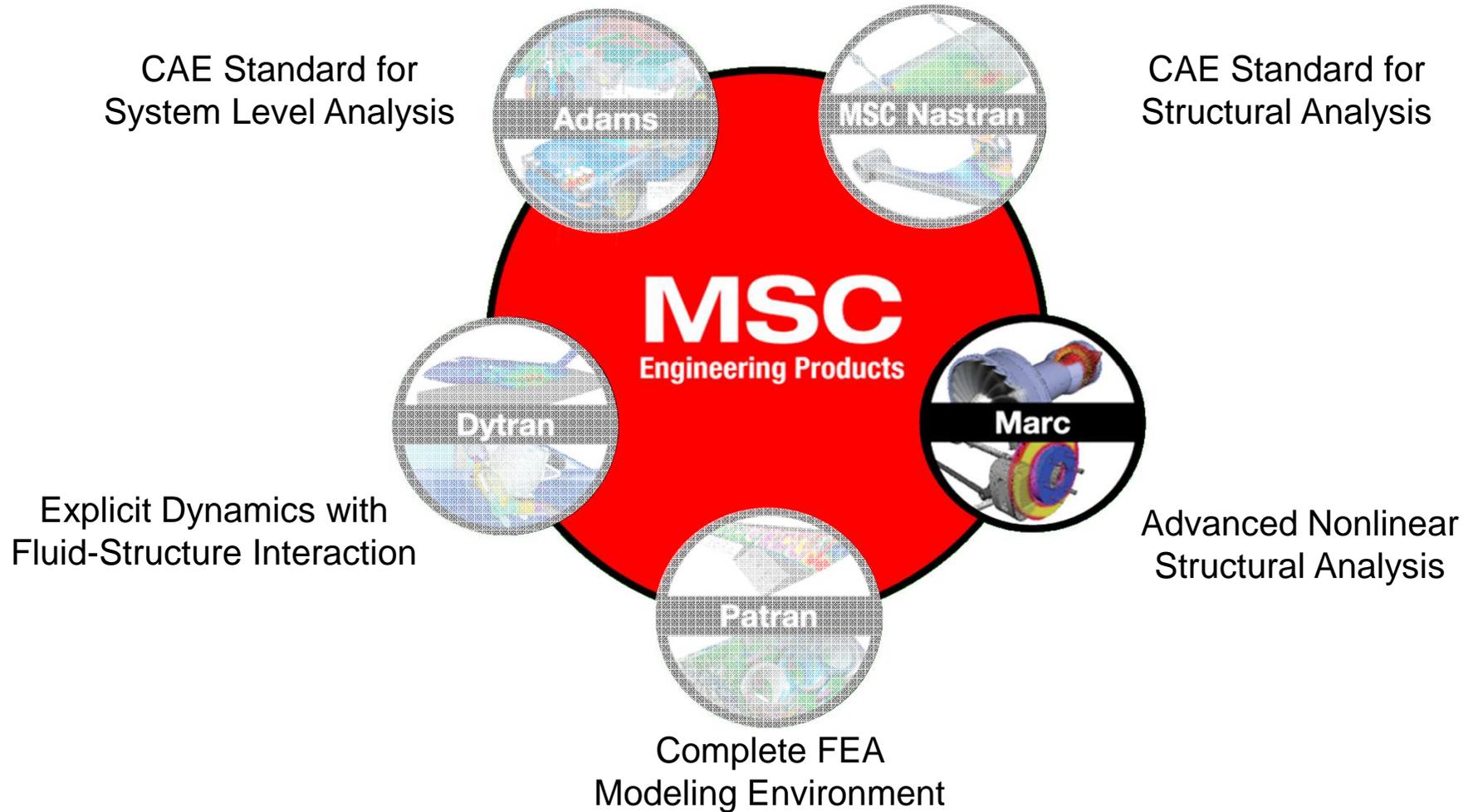
Эдуард Юрьевич Князев,
Руководитель технического отдела

MSC Software





Marc – система комплексного анализа нелинейных процессов

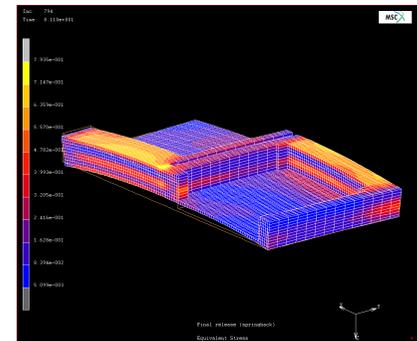
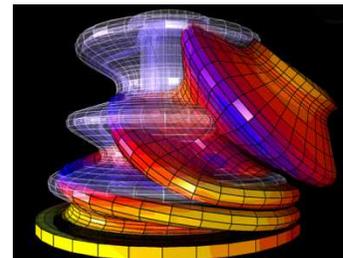
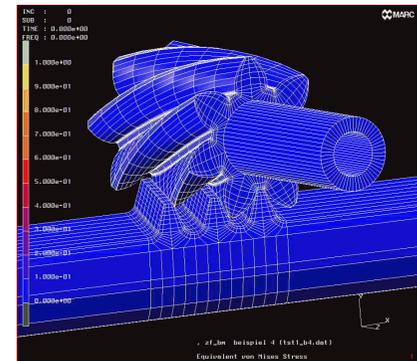
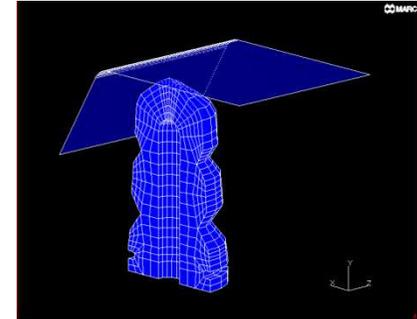




Marc

Система комплексного анализа нелинейных процессов

- Один из старейших конечно-элементных решателей
 - Разработка Marc начата в 1962 году
 - Первый релиз Marc состоялся в 1972 году
 - Marc стал первым коммерческим нелинейным конечно-элементным решателем
- Эффективный решатель для высоконелинейных задач
 - Широкий круг решаемых задач
 - Высокая точность и надежность
 - Высокая производительность и масштабируемость
- Patran и Marc Mentat – графические среды для работы с решателем Marc

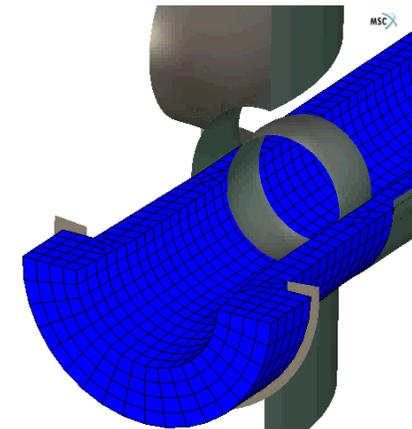
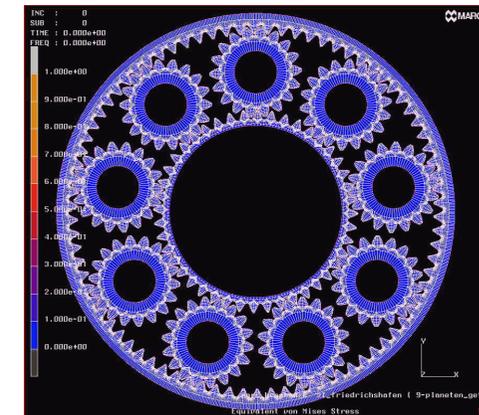
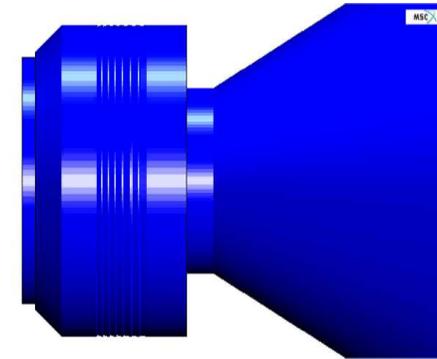




Marc

Области применения

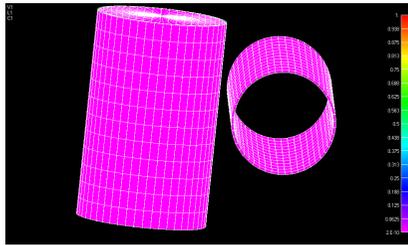
- Расчет нелинейных процессов функционирования сложных изделий
 - Элементы конструкции и узлы космических летательных аппаратов, такие как баки топлива и окислителя, шаробаллоны, двигатели, исполнительные устройства СУ, трубопроводы, антенны, приборы и т.п. при подготовке к полету и в полете, функционирование компонентов РН, таких как баки, трубопроводы, двигатели, исполнительные устройства управления и отделения полезной нагрузки, опорно-ведущих поясов, бугелей и т.д.;
 - Расчет сборных конструкций – сварных, паяных, клепанных, болтовых соединений, с учетом контакта деталей;
 - Расчет изделий из эластомерных материалов (прокладок, амортизаторов, сайлент-блоков, и т.п.) в составе сборных конструкций с учетом контакта между деталями, и т.д.;
 - Подробный расчет зубчатых, ременных и других видов передач;
 - И др.
- Расчет технологических процессов
 - Операции подготовки к запуску РН и КЛА: опрессовка, заправка, монтажные операции, такелажные работы, и т.д.;
 - Изготовление деталей путем штамповки,ковки, волочения, экструзии, литья, формовки, и др.;
 - Расчет процессов соединения деталей сваркой, пайкой, болтами, заклепками, и т.д.;
 - Установка резинотехнических изделий;
 - Изготовление изделий из композиционных материалов.



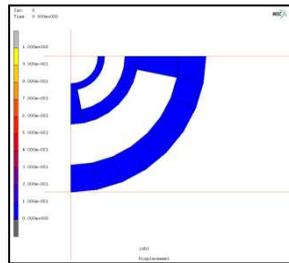


Моделирование конструкций и систем в Marc

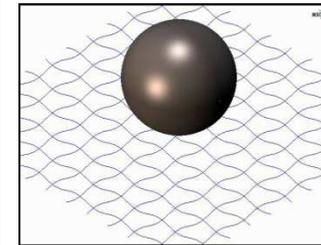
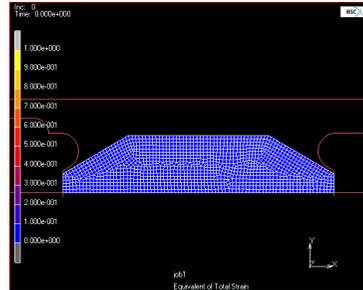
Примеры:



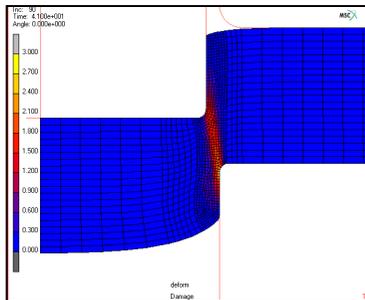
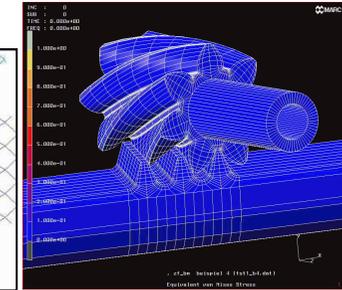
Контакт в динамике



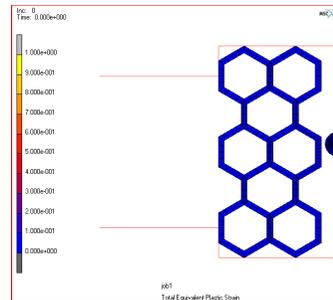
Самоконтакт Гиперупругий материал



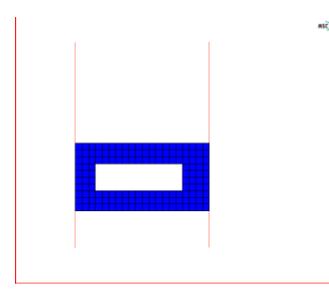
Контакт нескольких тел



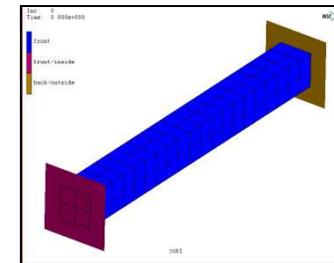
Сдвиг / разрыв



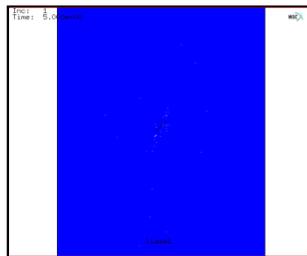
Проникновение



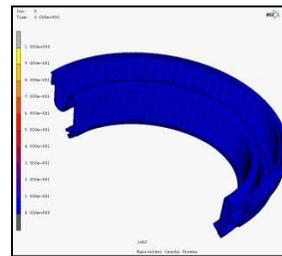
Разрыв



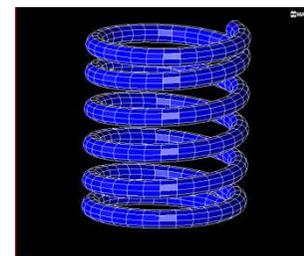
«Клеевой» контакт



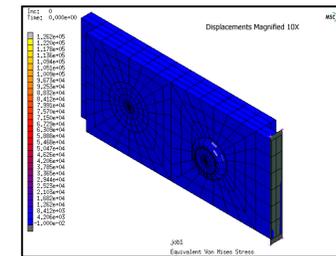
Развитие трещины



Потеря устойчивости



Пружина



Заклепочное соединение





Пример: Boeing



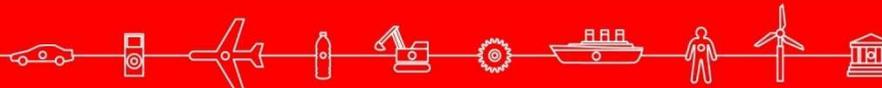
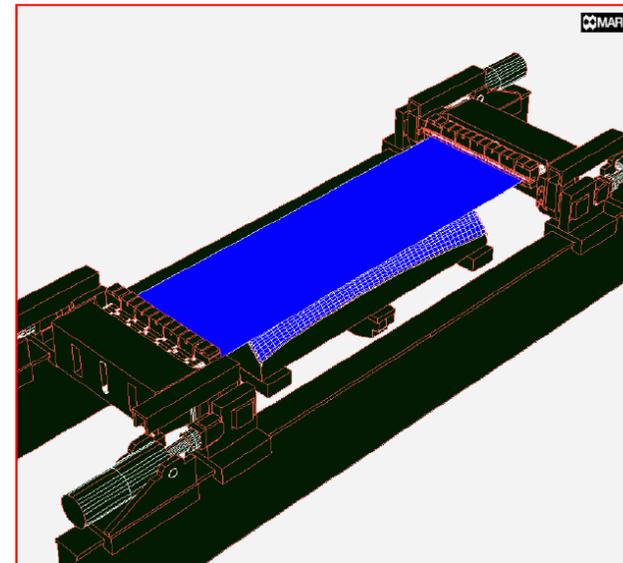
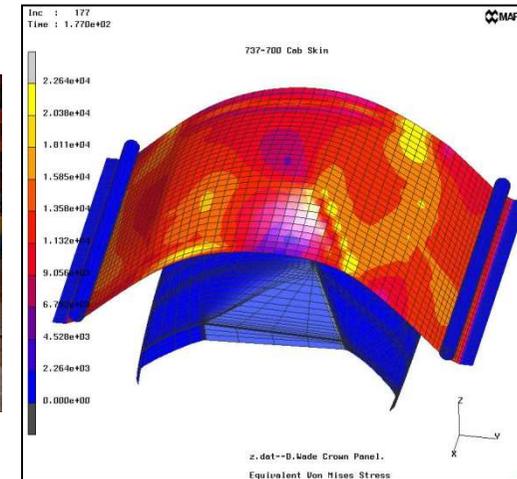
Сфера деятельности:
Разработка авиационной техники

Задача:
Разработать технологический процесс вытяжки больших панелей самолета из листового материала с учетом эффекта пружинения

Решение:
Создание виртуальной модели технологического процесса в Marc

Результат:

- Сэкономлено >\$1 млн. в год на изготовлении деталей и оснастки
- Повышение качества получаемых панелей
- Подтверждение возможности изготовления деталей заданной формы на заданном оборудовании



Пример: ALCOA



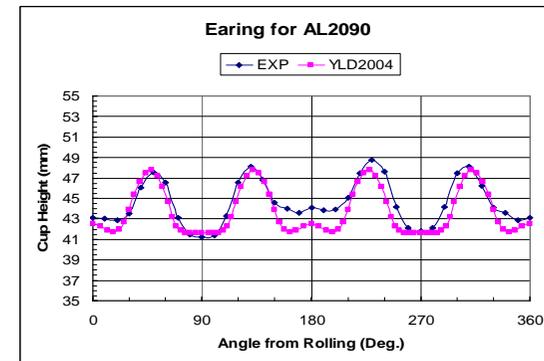
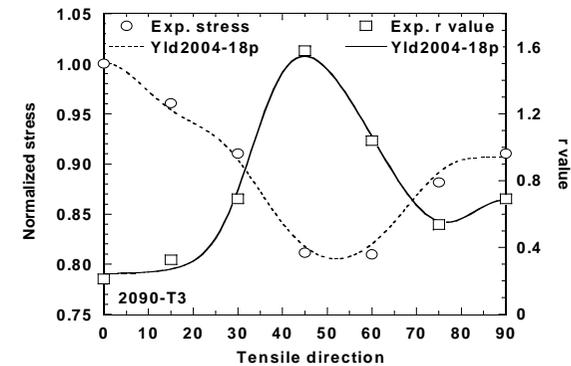
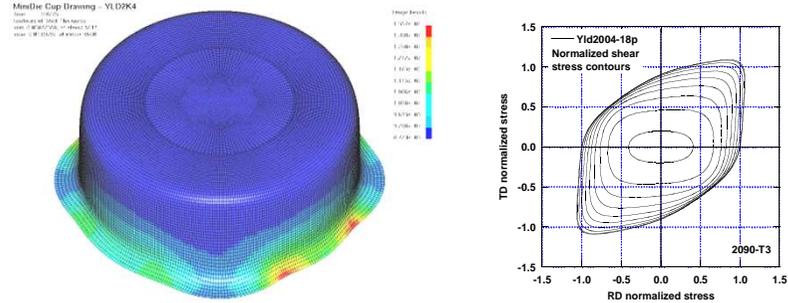
Сфера деятельности:
Производство деталей из алюминия

Задача:
Повышение точности изготовления
штампованных деталей

Решение:
Последовательный выбор формы заготовки с
использованием Marc

Результат:
Высокоточное моделирование вытяжки с
использованием заготовок различной формы
**“Используя Marc, мы разработали
математическое описание и с высокой
точностью смоделировали явление
анизотропной пластичности при вытяжке
листового материала. Это дало оптимальное
соотношение между точностью и скоростью
счета и отличное соответствие между
расчетной моделью и натурным
экспериментом.”**

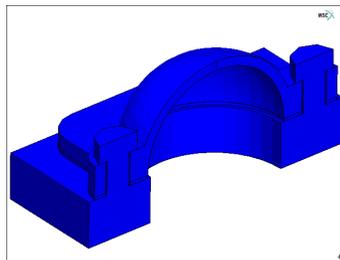
Технический специалист Леон-Ван Юн,
Технический центр Alcoa



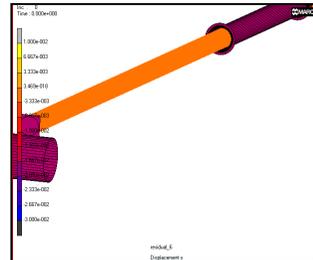


Моделирование технологических процессов в Marc

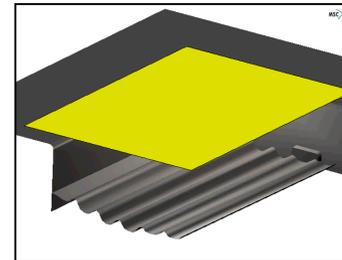
Примеры:



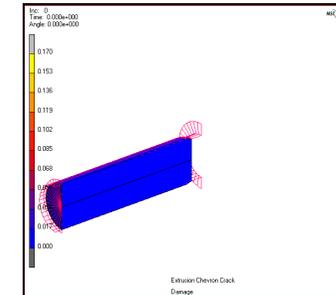
Затяжка болтов



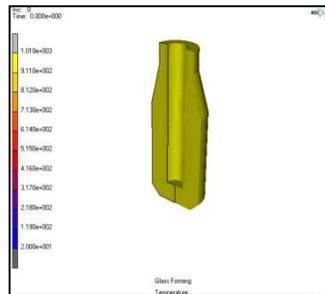
Вытяжка



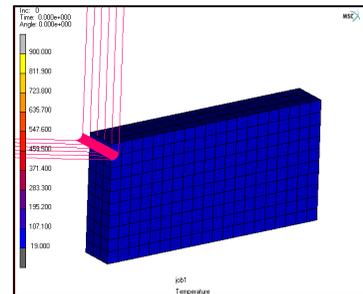
**Сверхпластическое
формование**



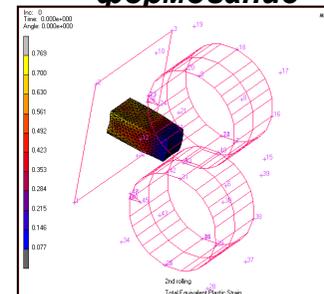
Экструзия



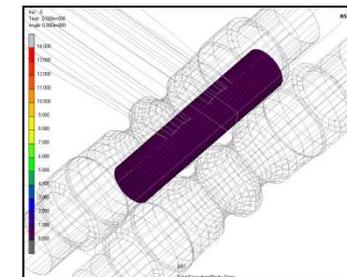
Формовка стекла



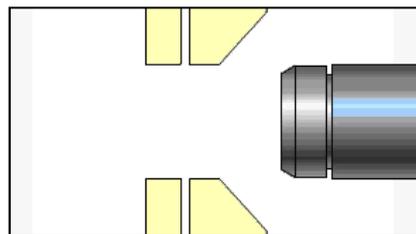
Резание



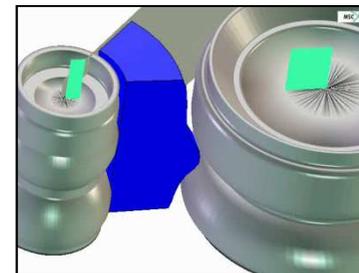
Прокатка



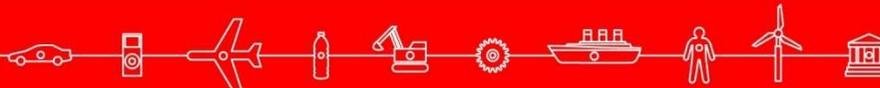
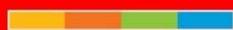
Формование



Установка заклепок

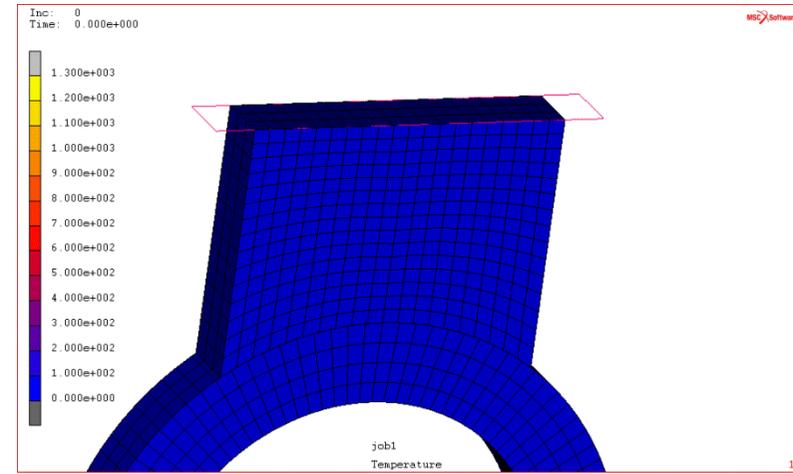
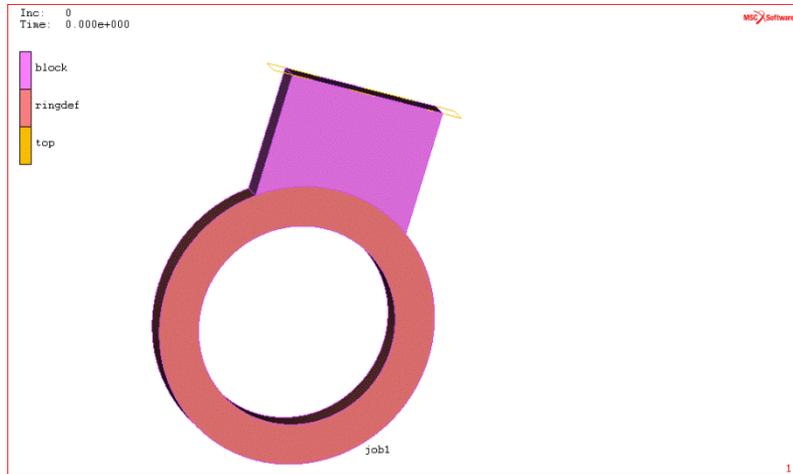
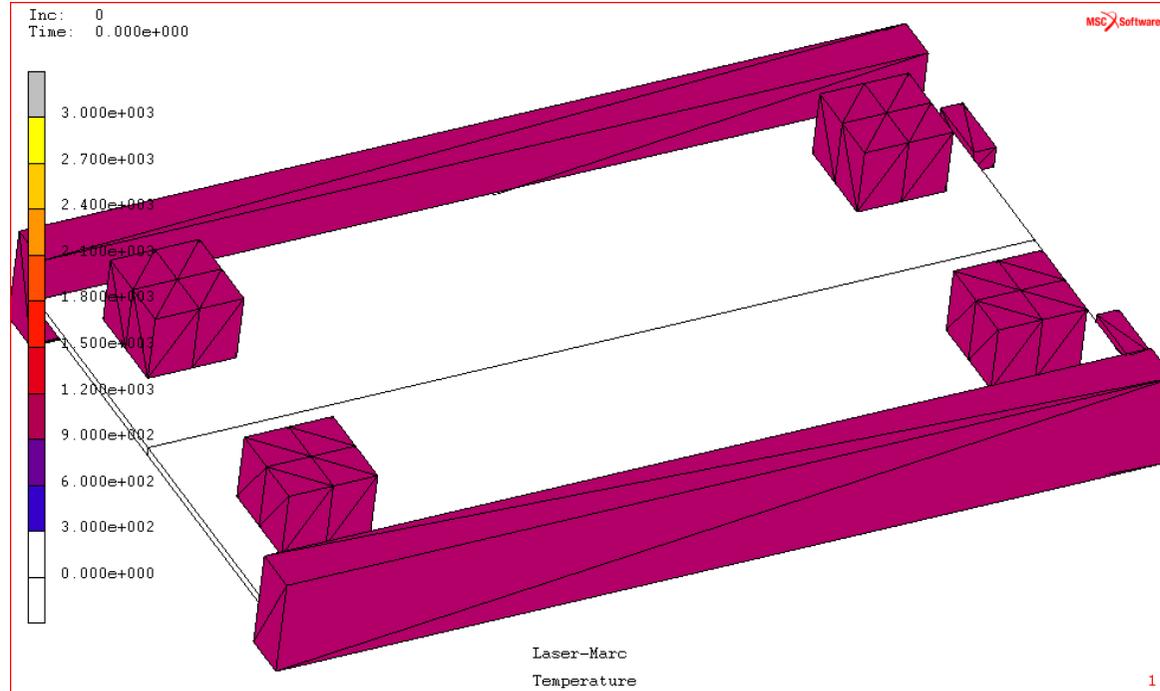


Прокатка





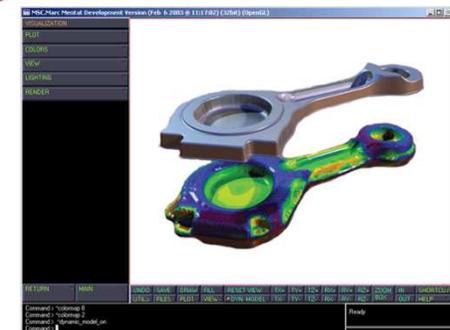
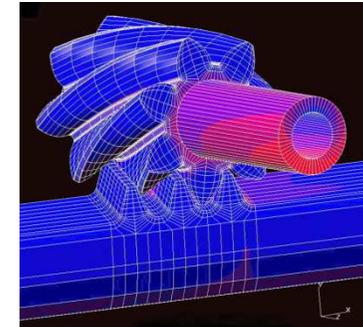
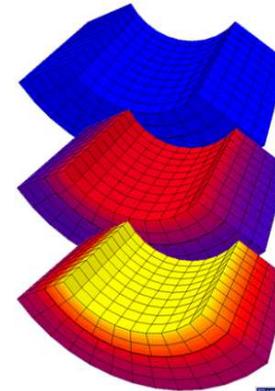
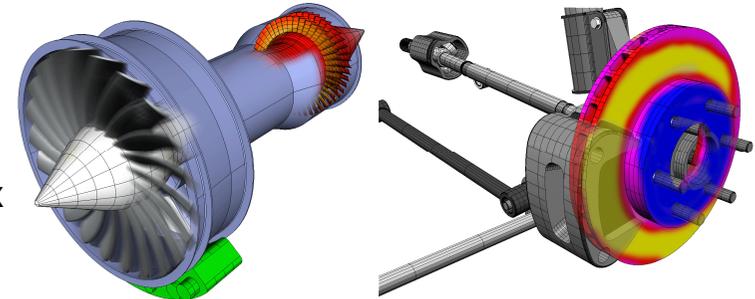
Расчет сварки





Основные функции Marc

- Различные типы решения
- Надежные конечно-элементные методы
- Большое количество разнообразных моделей материалов, в т.ч. Высоконелинейных
- Моделирование и анализ изделий из композиционных материалов
- Высокоточное моделирование контакта
- Локальное и глобальное автоматическое перестроение КЭ сетки
- Высокоэффективная параллелизация
- Решение циклосимметричных задач
- Подпрограммы пользователя для расширения функционала
- Графический интерфейс Marc® Mentat®
- Пре- постпроцессинг в Patran®
- Поставка в рамках системы лицензирования MSC MasterKey™

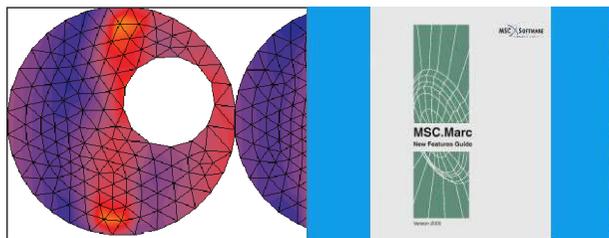




Решение задач различных типов

Структурный анализ:

- Линейные и нелинейные
- Статические и динамические
- Потеря устойчивости и закритическое поведение
- Ползучесть, вязкоупругость и др.
- Прямой и модальный методы расчета динамики
- Частотный отклик, расчет на ударное воздействие – ударный спектр
- И др.



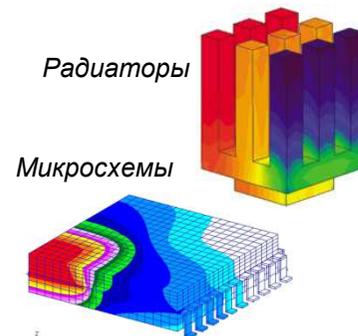
Резинотехнические изделия



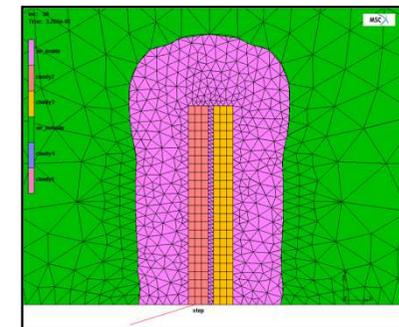
Шарикоподшипники

Связанные виды анализа:

- Теплопрочностной
- Электростатический
- Пьезоэлектрический
- Тепло-электро-прочностной
- Акустический
- Магнитостатический
- Электромагнитный
- Взаимодействие конструкции с жидкостью/газом



Теплопередача в электронных устройствах



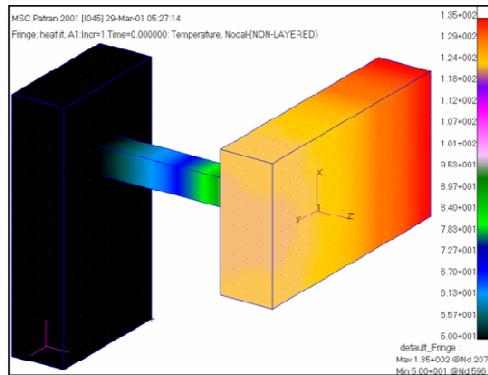
Анализ электростатического поля и НДС конденсаторов



Эффективные алгоритмы теплового анализа

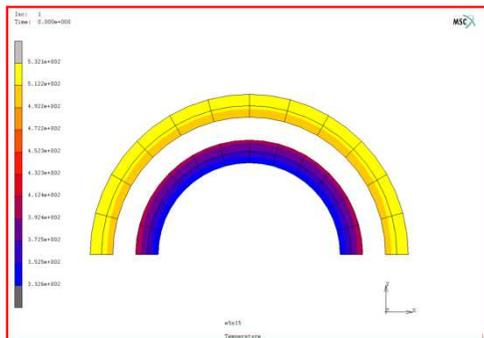


- ❑ Все виды теплопередачи: теплопроводность, конвекция, излучение
- ❑ Установившиеся и переходные тепловые процессы
- ❑ Прямая передача температурных нагрузок в структурный расчет



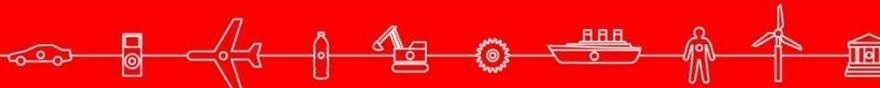
Теплопроводность и конвективный теплообмен:

- Температурозависимые свойства материалов в тепловом расчете
- Изотропные, ортотропные и анизотропные свойства материалов
- Композиционные материалы с градиентом температур по толщине
- Выделение тепла за счет трения или деформирования материалов
- Джоулево тепло



Излучение:

- Двумерные, осесимметричные и трехмерные задачи
- Расчет геометрических коэффициентов модифицированным методом Монте-Карло
- *Высокоэффективный метод Net-Cube позволяет решать тепловые задачи больших размерностей, а также допускает изменение формы излучающих поверхностей в процессе расчета*

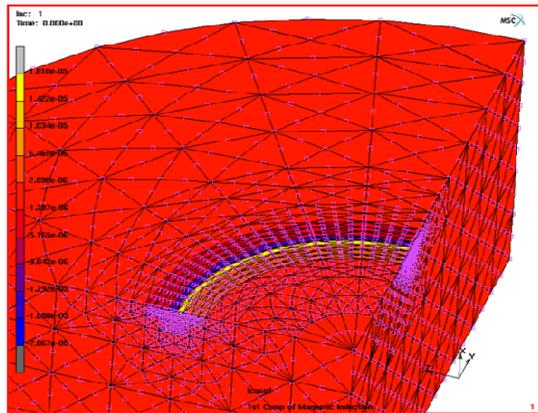


Многодисциплинарные расчеты в Marc

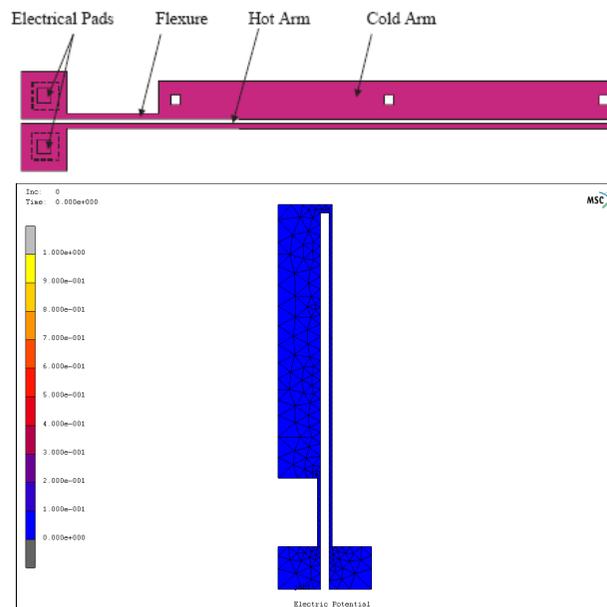


Две и более дисциплины в совместном расчете

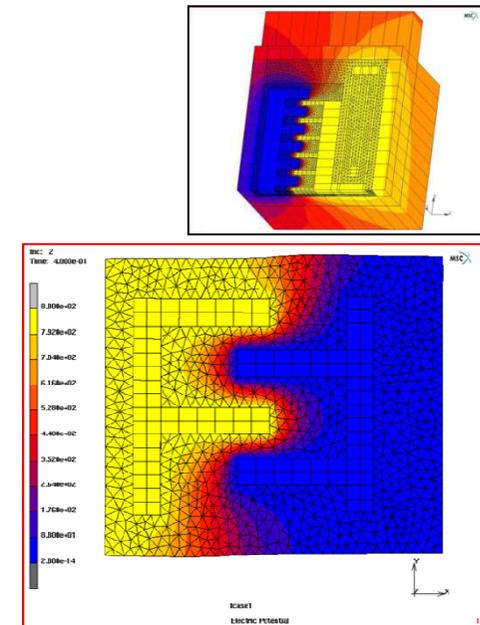
Примеры:



Магнитная индукция вокруг катушки



Связанный электростатический-теплопрочностной расчет актуатора



Связанный электростатический – структурный расчет микроэлектромеханического устройства



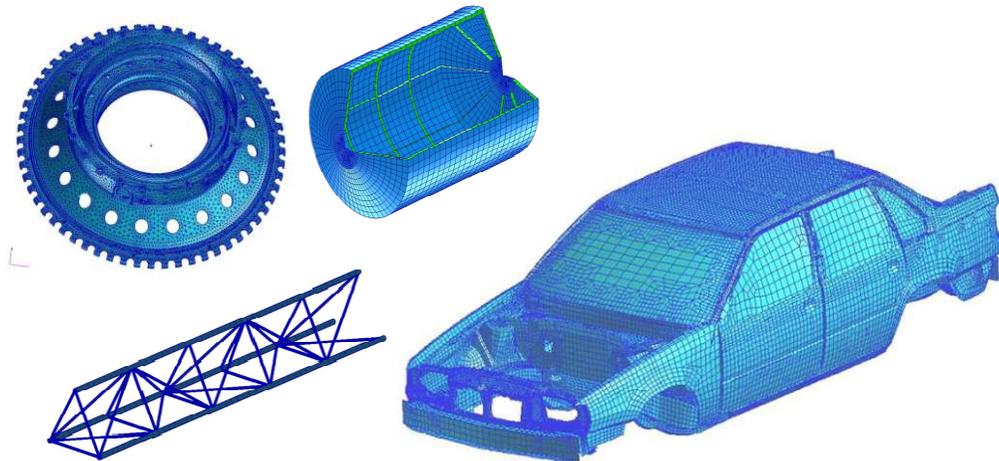
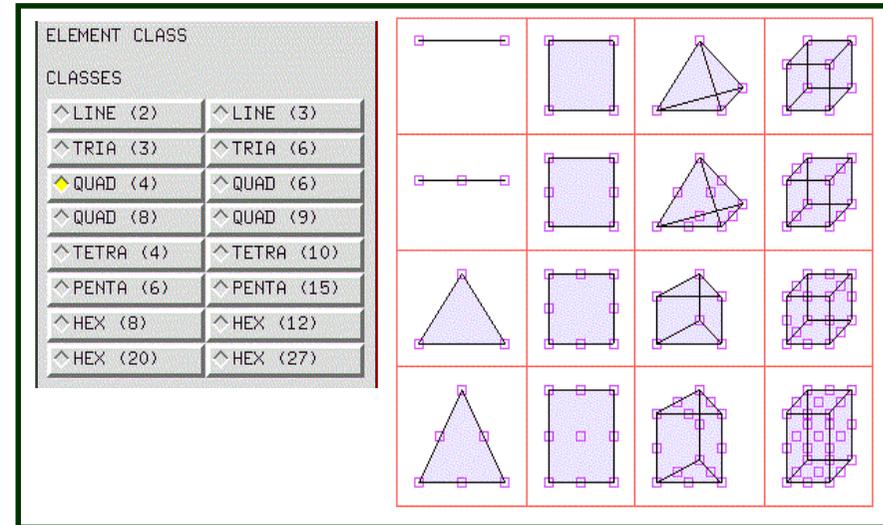
Надежный конечно-элементный анализ



Более 200 видов конечных элементов:

- ❑ Одномерные
- ❑ Двумерные
- ❑ Трехмерные

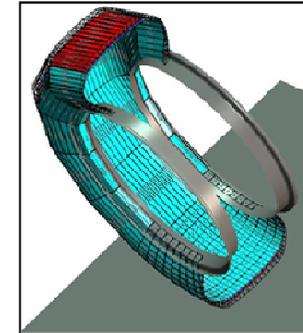
- Практически все конечные элементы поддерживают нелинейность
- Любое число конечных элементов и любые комбинации типов конечных элементов в одной задаче
- Формулировки конечных элементов для повышения эффективности счета
- Специальные типы конечных элементов
- Многоточечные связи
- Богатые возможности расширения алгоритмов функционирования конечных элементов



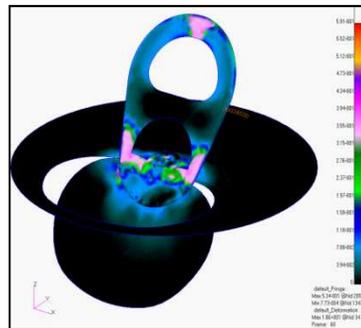
Широкий набор моделей материалов



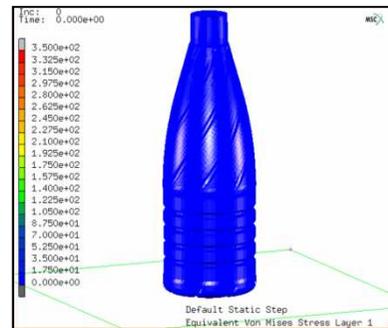
- **Металлы, пластмассы, резины/эластомеры, композиционные материалы, стекло, дерево, бетон, вспененные и сыпучие материалы, другие неметаллы**
- **Упругие, пластичные (с малыми и большими деформациями), гиперупругие, неупругие материалы, явления ползучести, вязкоупругости и вязкопластичности**
- **Изотропные, ортотропные, анизотропные материалы**
- **Свойства демпфирования, образование трещин, потеря несущей способности материалов**
- **Температурозависимые свойства**
- **Зависимости от деформаций и скорости деформаций**
- **Задание пользовательских зависимостей с помощью подпрограмм**



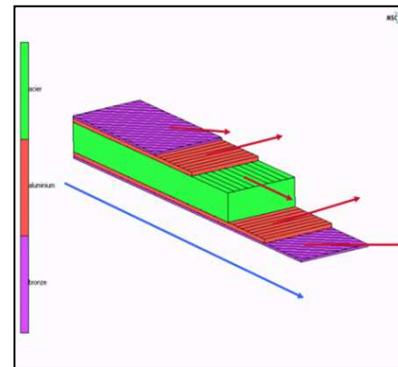
Резинокордная шина с ободами



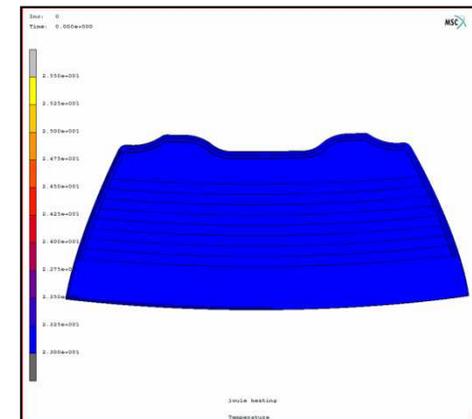
Открытые банки



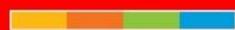
Пластиковая бутылка



Композиционные материалы



Заднее стекло автомобиля с нагревательными элементами



Пример: Кожух рычага КПП автомобиля



Отрасль:

Производство комплектующих автомобилей

Задача:

Ускорить разработку кожуха, просчитать большое количество вариантов

Решение:

Моделирование работы кожуха в Marc, выявление наличия зон разрыва кожуха.

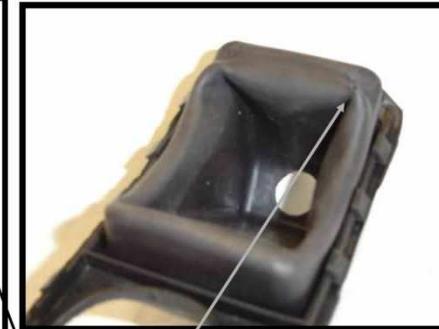
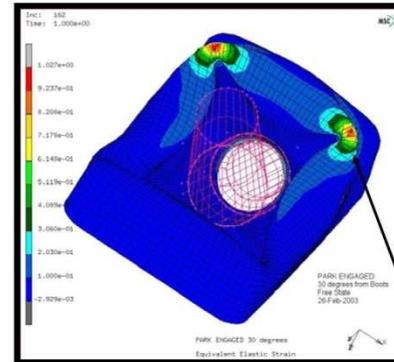
Для отдельных модификаций кожуха были проведены натурные испытания, подтвердившие правильность расчетов в Marc

Результат:

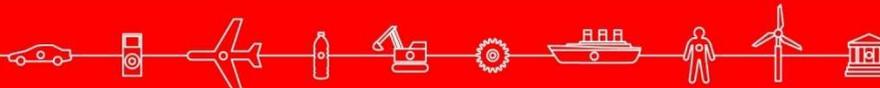
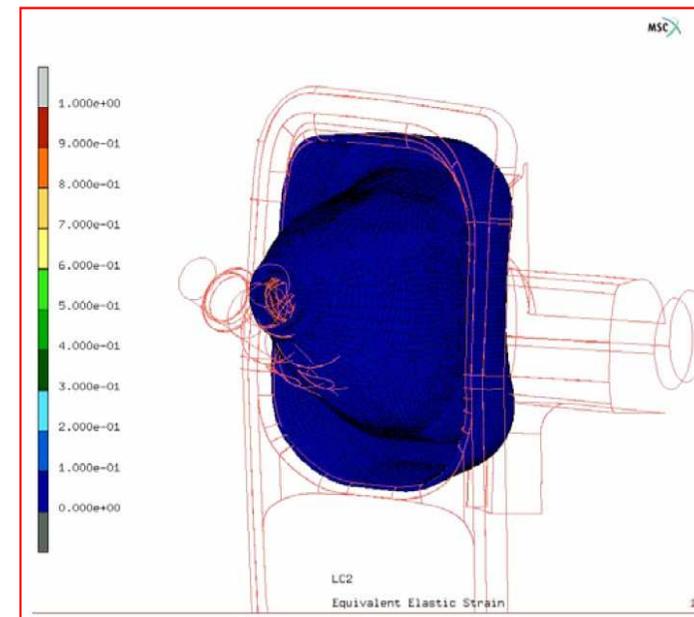
Сокращение сроков и стоимости разработки кожуха

“MSC.Marc helped in the entire design process of this boot by identifying high elastic strain locations. The software also provided accurate deformations for our customers to assess.”

– David Thomas, Dura Automotive Systems

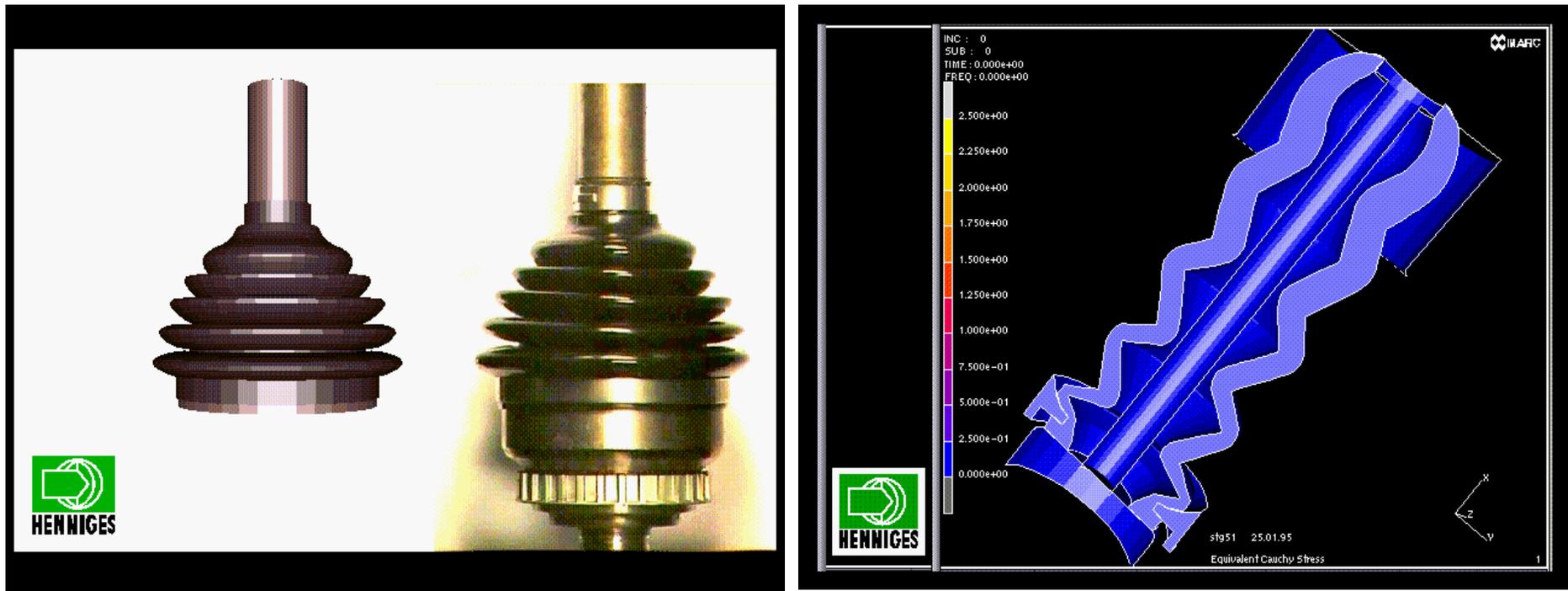


Convolute Tear Area 1
Elastic Strain 102%

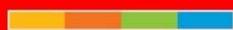




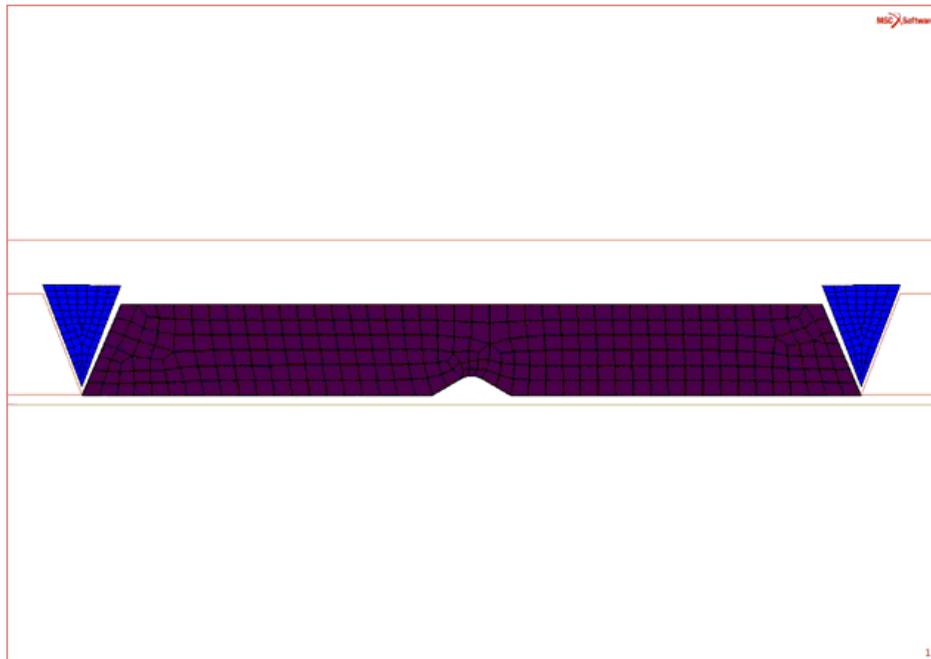
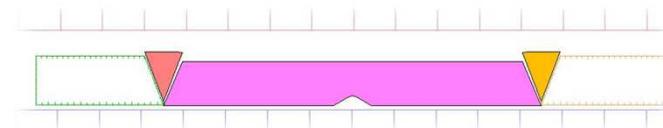
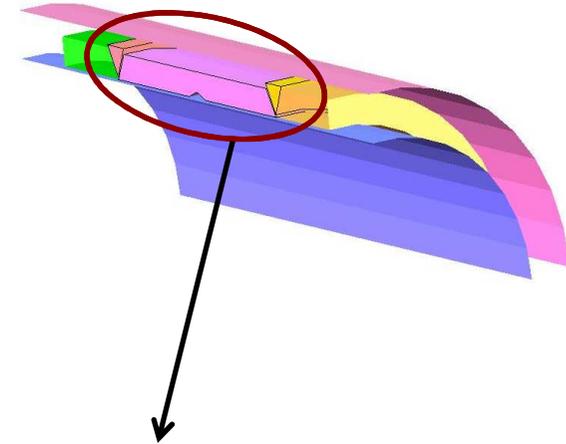
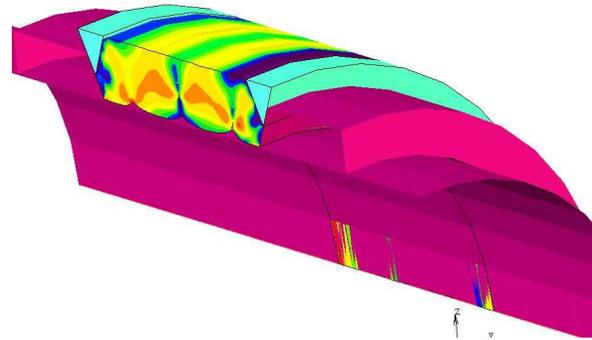
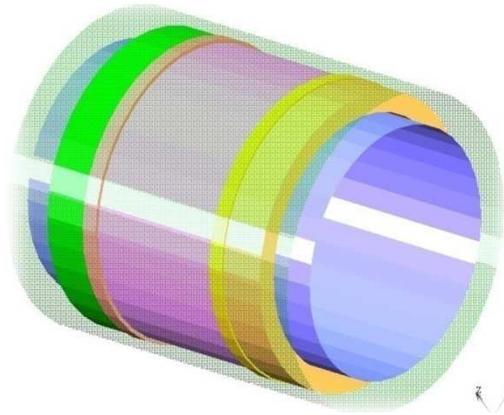
Моделирование работы эластомеров



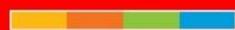
Хорошее совпадение расчётных моделей с экспериментальными данными



Моделирование герметизации трубопроводов



- Большие перемещения
- Большие деформации
- Гиперупругая модель материала
- Контакт и Самоконтакт
- Автоматическая перестройка КЭ сетки
- Релаксация

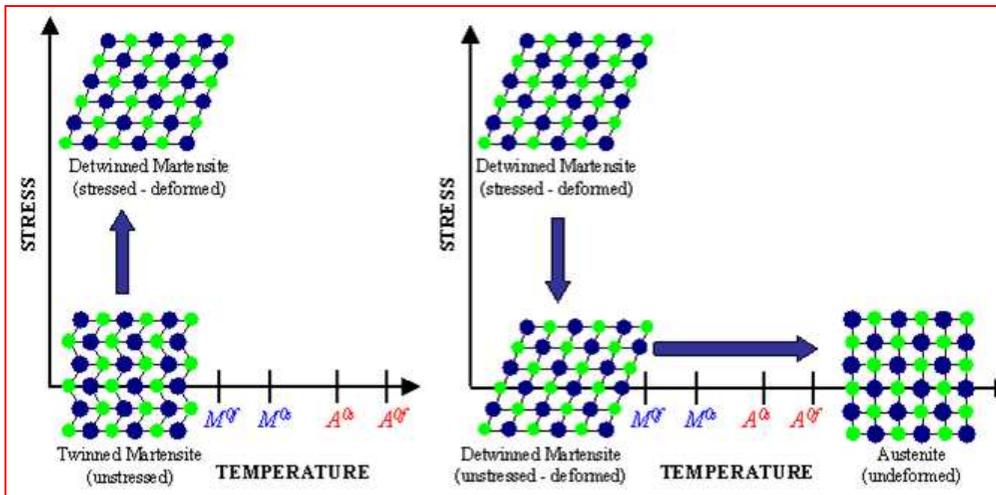
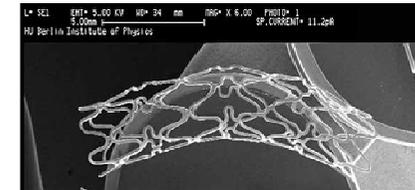


Материалы с памятью формы

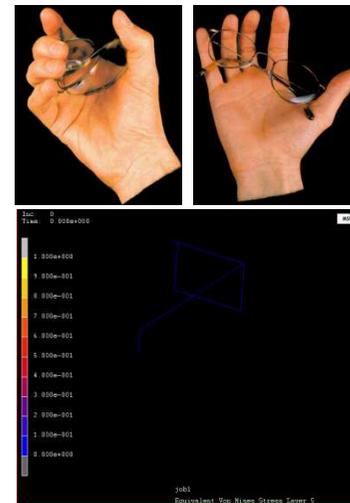


Моделирование изделий из материалов с памятью формы

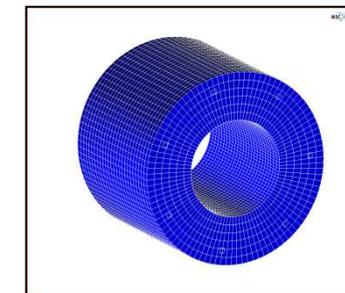
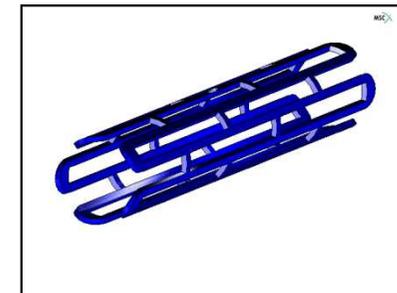
- Точные структурные и тепловые свойства
- Поддержка всех видов нелинейности



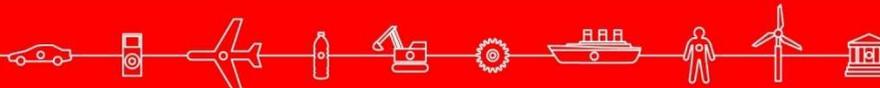
Фазовые превращение материалов с памятью формы



Очки



Сосудистый протез





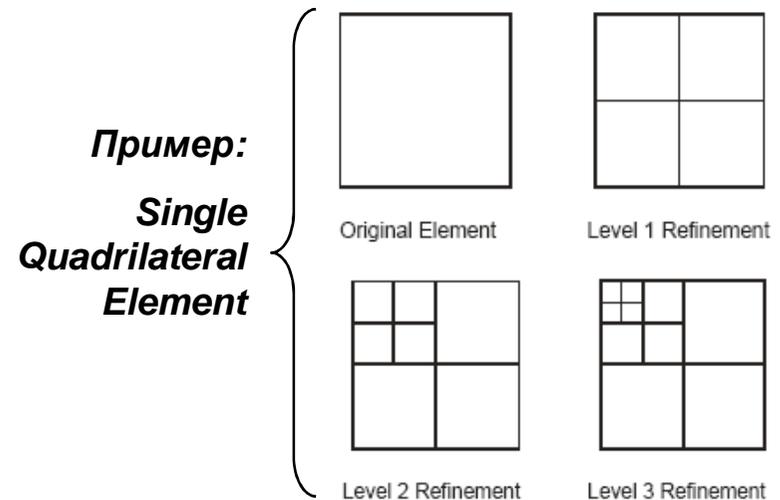
Локальное и глобальное автоматическое перестроение конечно-элементной сетки

После включения и настройки процедура перестроения работает автоматически

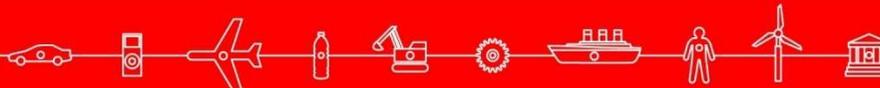
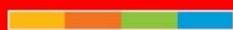
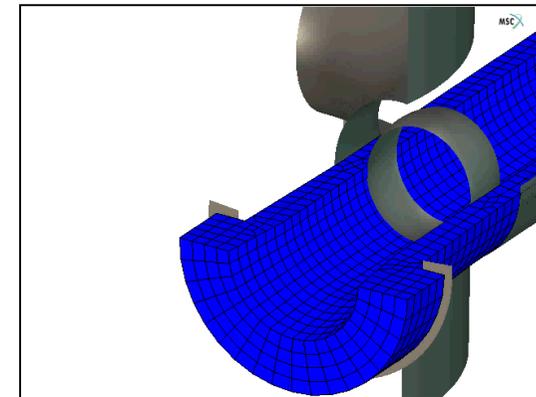
Обеспечиваются заданные параметры качества конечно-элементной сетки

Большое число доступных критериев перестроения сетки

- Перестроение сетки в зонах больших деформаций;
- Использование геометрических примитивов при автоматическом перестроении сетки;
- Подробная сетка в тех зонах и на тех этапах расчета, где это действительно необходимо;
- Высокая скорость счета на остальных этапах.



Пример:
Tube Bending Around a Mandrel

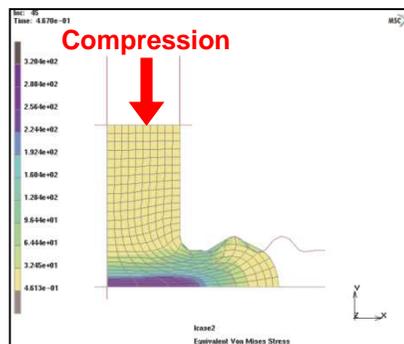


Глобальное автоматическое перестроение конечно-элементной сетки

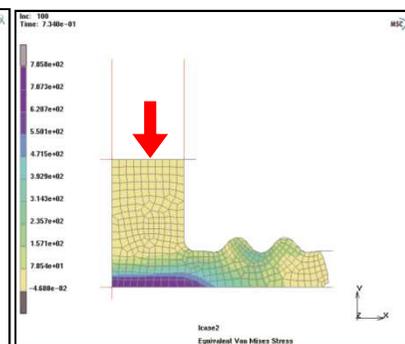


Автоматическое перестроение сетки

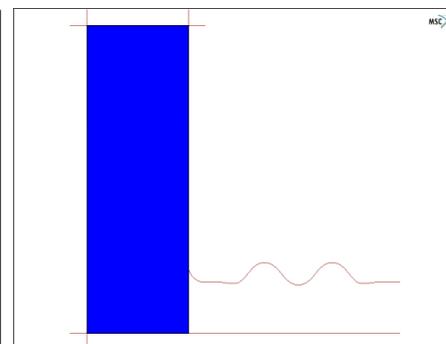
- Remeshing: Перестроение сетки
- Rezoning: Перенос решения со старой сетки на новую
- Граничные условия в контакте передаются автоматически
- Двумерные или трехмерные задачи



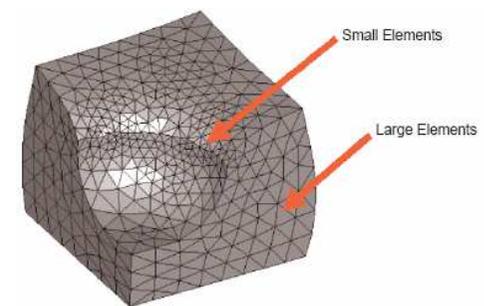
Запрессованная резиновая прокладка с чрезмерно деформированной сеткой



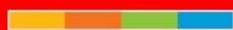
Запрессованная прокладка после автоматического перестроения сетки



Процесс запрессовки



Пример с трехмерной сеткой



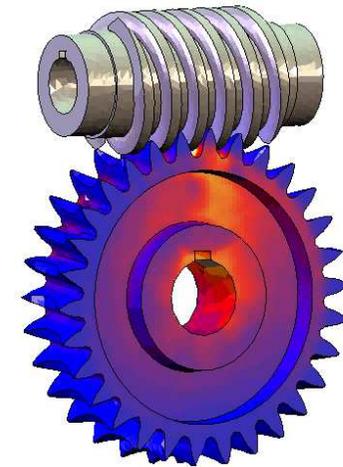
Решение контактных задач в Marc



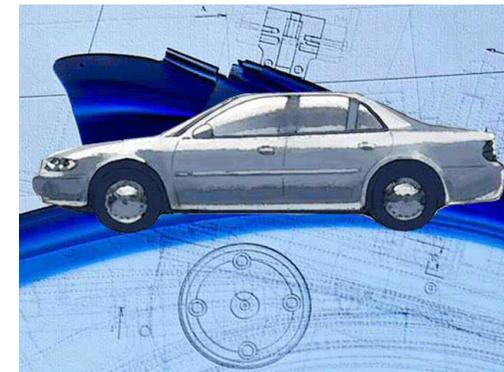
MSC

Моделирование контакта между:

- Твердыми и деформируемыми телами
- Деформируемыми телами
- Самоконтакт (тело контактирует само с собой)
- **НЕ ТРЕБУЕТСЯ** вводить какие-либо дополнительные конечные элементы
- Структурные, тепловые, акустические задачи с контактом
- Статические и динамические задачи
- Посадки с натягом-зазором не требуют специальных мер по построению сеток
- Большое количество настроек контакта
- Возможность оптимизации производительности



Червячная передача



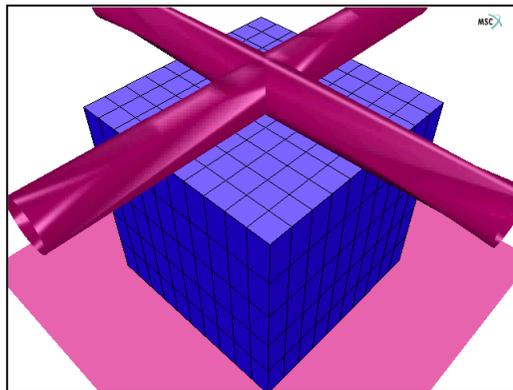
Прокладка двери автомобиля



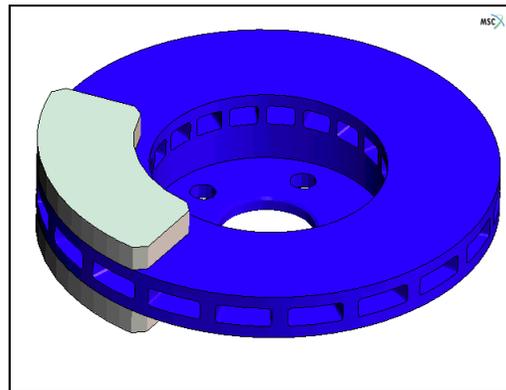
Примеры решения контактных задач в Marc



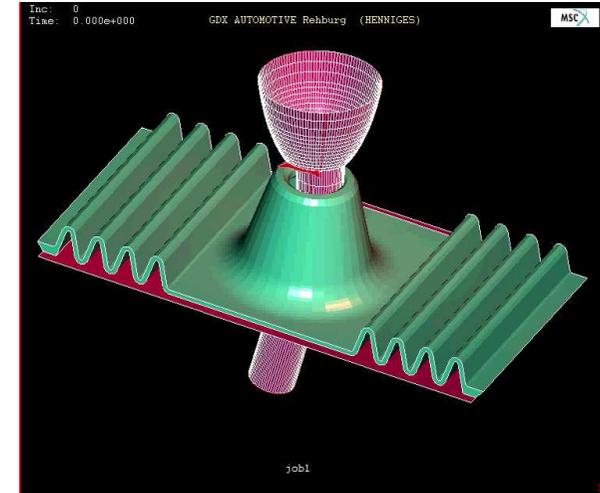
Узлы и детали, технологические процессы



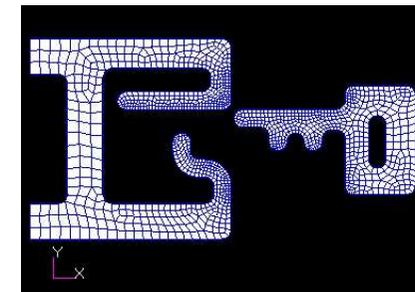
Запрессовка горячих стержней в пластиковый блок



Трение и выделение тепла в механизме тормоза



Резиновый кожух рычага КПП



Вставка ключа

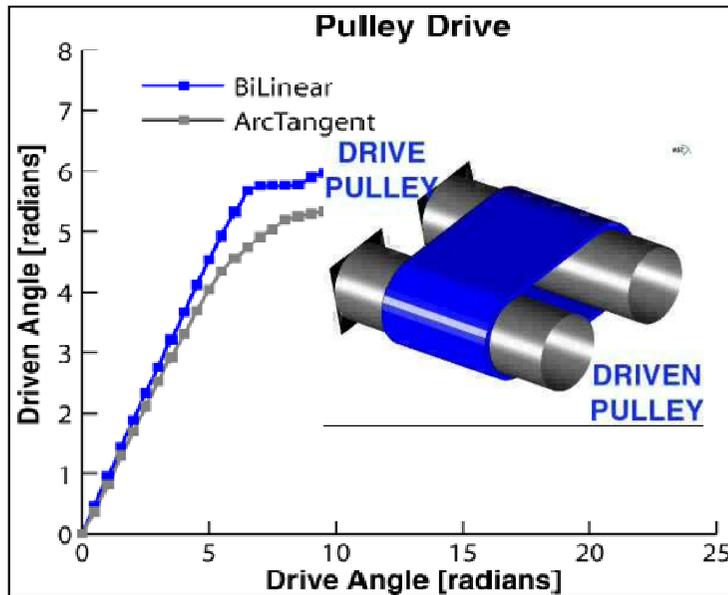
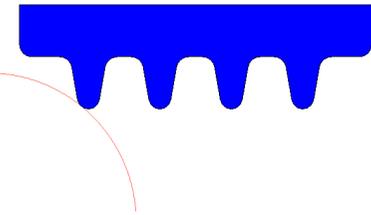




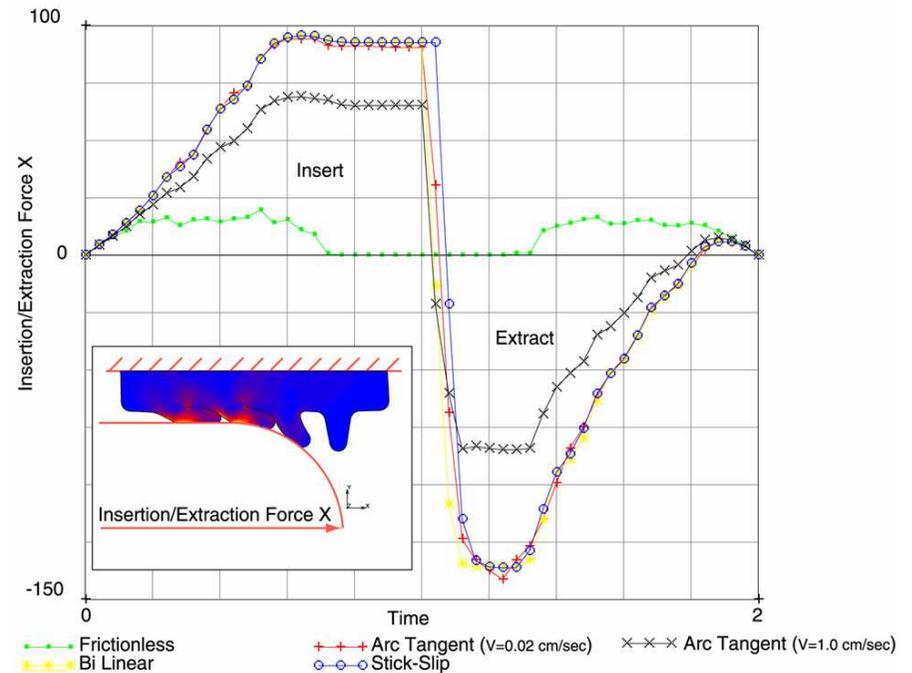
Моделирование трения в Marc

- Т.н. «сухое» трение
- «Сдвиговое» трение
- Выбор модели трения
- Трение покоя / трение скольжения
- Ортоотропная модель трения
- Выделение тепла, передача тепла трущимся деталям

Insertion & Extraction Force on an Elastomeric Seal



Ременная передача с трением



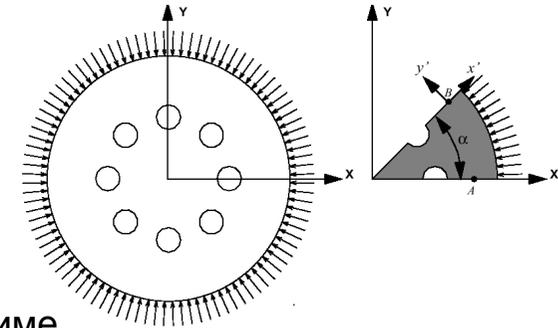


Расчет задач с циклической симметрией

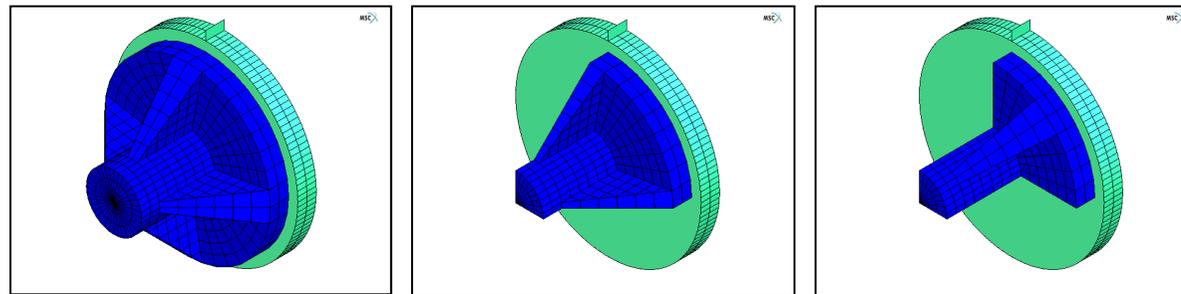
Актуален для вращающихся деталей, существенно ускоряет расчет

Простое моделирование в Marc

- Построить сектор детали
- Приложить циклосимметричные граничные условия
- Связи генерируются в Marc автоматически
- НЕ ТРЕБУЕТСЯ обеспечивать симметрию сетки!
 - Количество элементов/узлов на сторонах модели может быть разным
- Выдача результатов для «полной» модели в автоматическом режиме
- Простой переход к полной модели при необходимости
- Доступно автоматическое перестроение сетки



Пример:



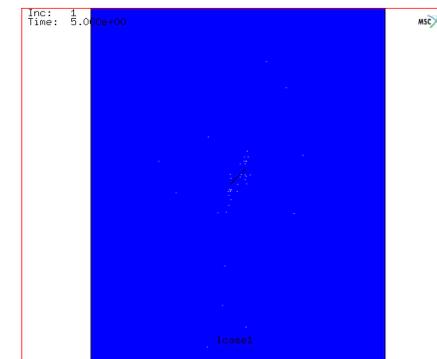
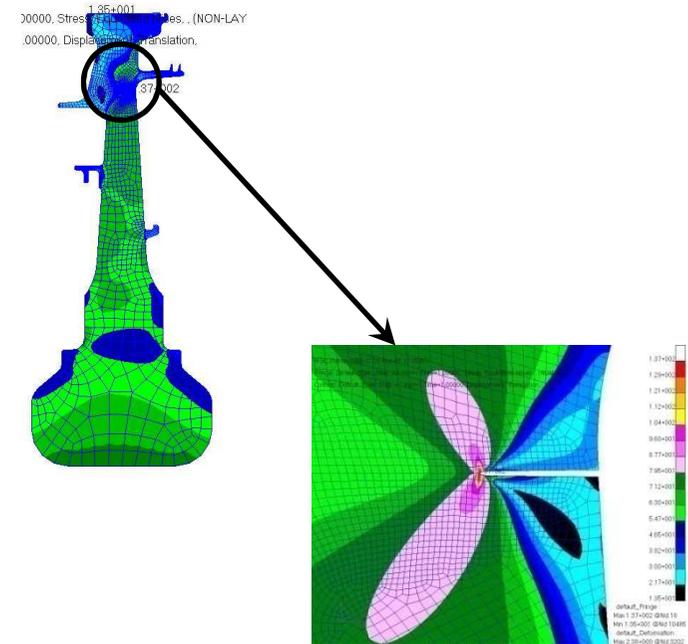
	<i>Complete Structure</i>	<i>Partial Structure 1</i>	<i>Partial Structure 2</i>
Stress [MPa]	1.475	1.471	1.488
CPU Time [sec]	440.84	55.35	64.80





Механика разрушения в Marc

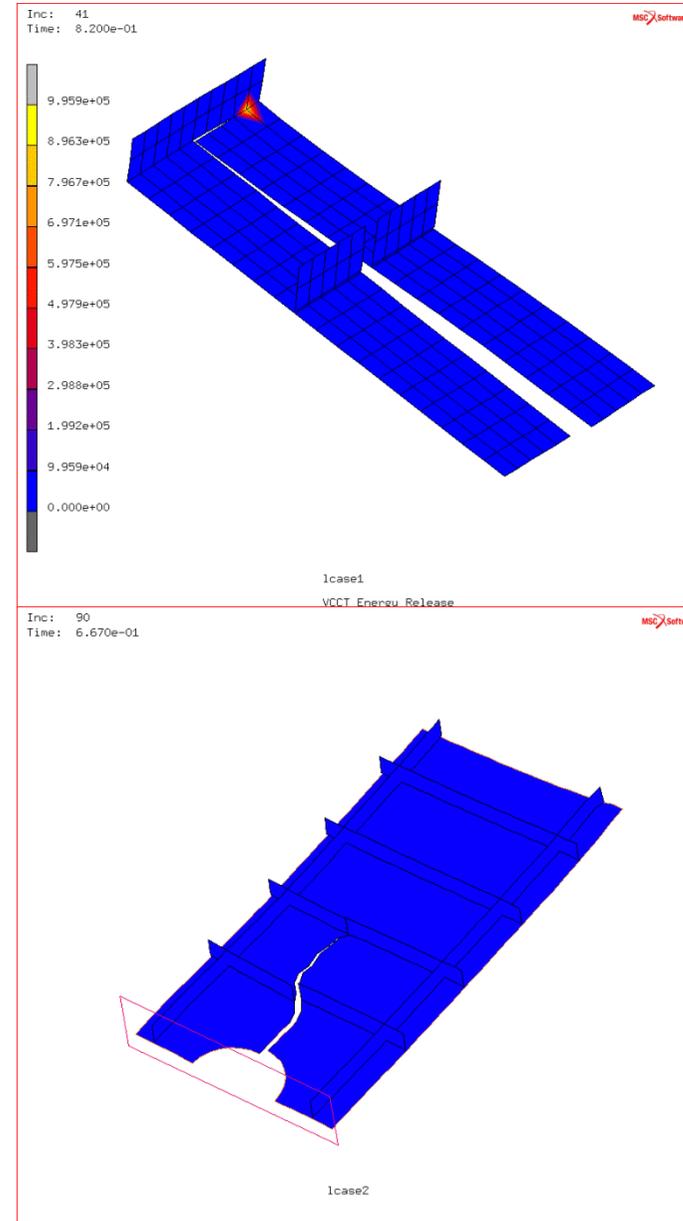
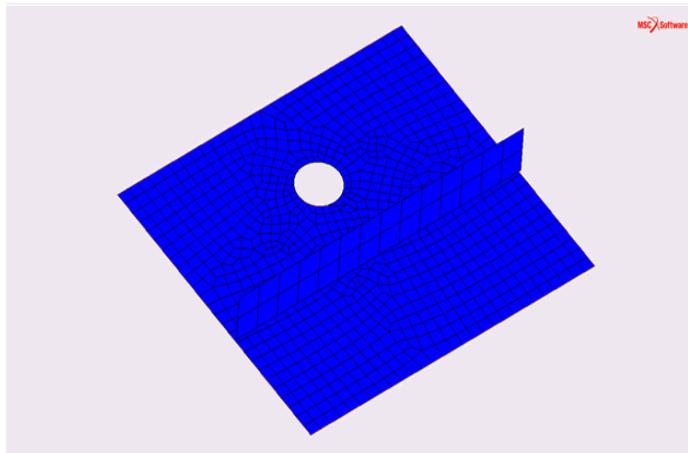
- Расчет трещиностойкости
 - Прогнозирование скорости роста трещин
 - Линейная механика разрушения (КИН)
 - Нелинейная механика разрушения (J-интеграл)
 - Виртуальное закрытие трещины
 - Применение техники виртуального закрытия трещины (VCCT) для вычисления потока упругой энергии G в вершины трещины
 - Специализированные методики создания расчетных моделей
 - Прогрессирующий рост трещин
 - Трещиностойкость композиционных материалов
 - Потеря несущей способности композиционных материалов



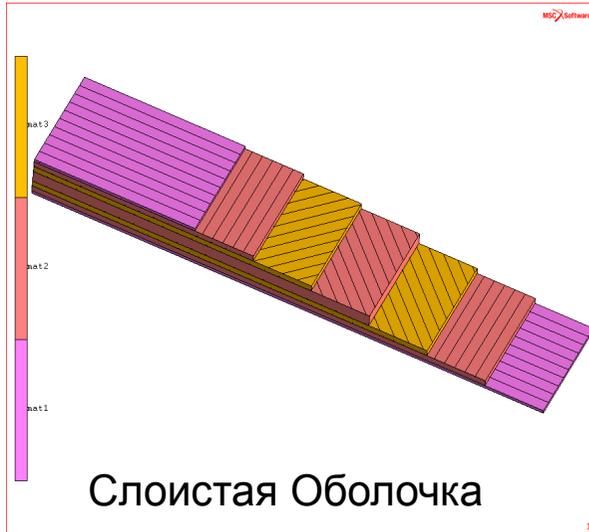


Рост и ветвление трещин

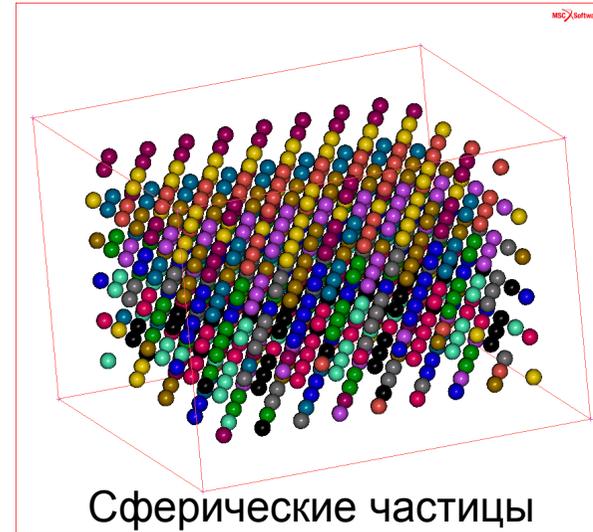
- Метод Виртуального закрытия трещин
- Ветвление трещины в T образных соединениях
- Задаваемые пользователем трещины
- Поддерживаются упруго-пластичные материалы
- Поддерживается перестройка КЭ сетки



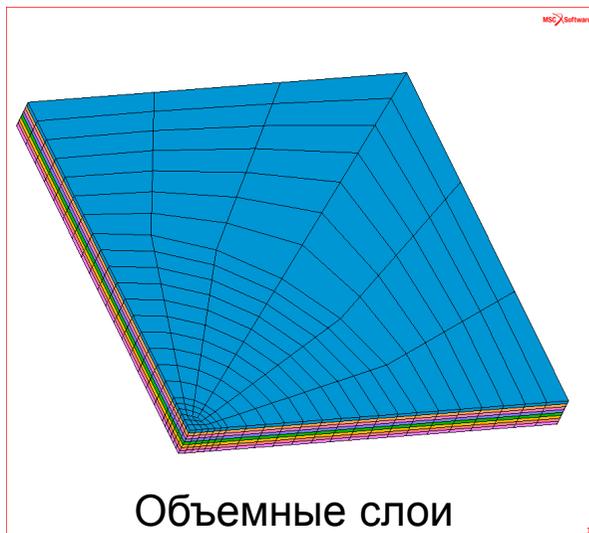
Расчет композиционных материалов в Marc



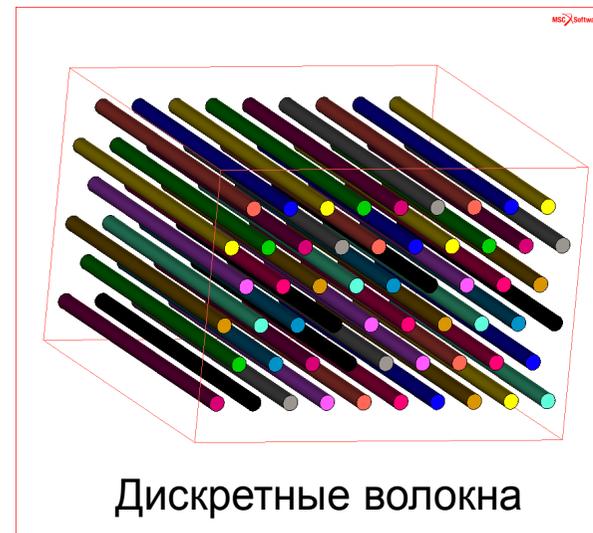
Слоистая Оболочка



Сферические частицы



Объемные слои



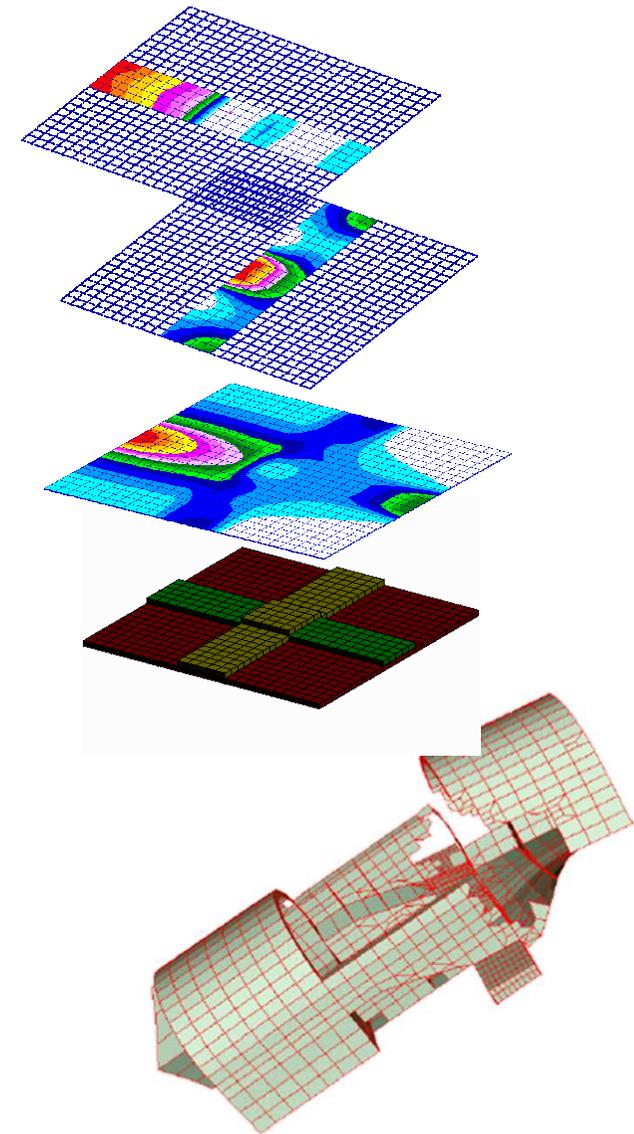
Дискретные волокна



Расчет композиционных материалов в Marc



- Слоистые композиционные материалы
 - Произвольное количество слоев
 - Произвольная ориентация слоев
 - Линейные и нелинейные свойства материалов слоев
 - Температурозависимые свойства материалов
 - Структурный и тепловой расчет
 - Широкий набор критериев разрушения
 - Прогрессирующее разрушение
 - Возможность глобальной нумерации слоев
- Расчет деталей из композиционных материалов с применением объемных конечных элементов
 - Слоистые композиты
 - Смесевые композиты
 - Линейные и нелинейные свойства, включая упруго-пластические и гиперупругие
 - Температурозависимые свойства
- Моделирование процессов затвердевания композитов
 - Остаточные напряжения и деформации

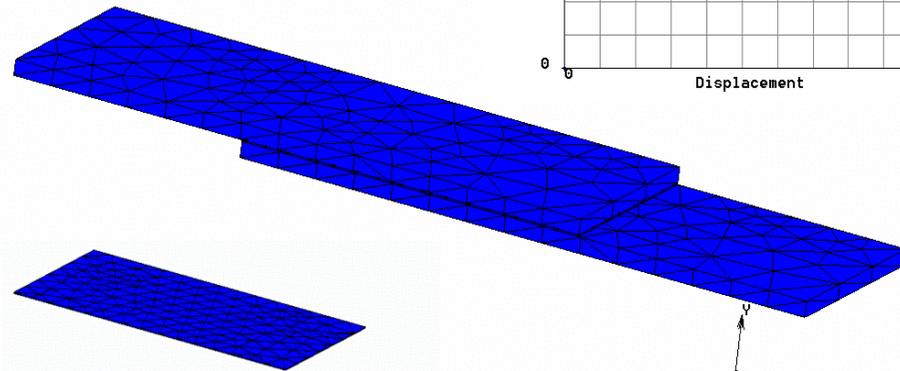
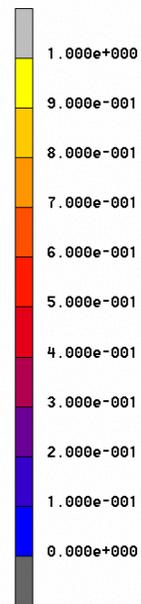


Расчет композиционных материалов в Marc

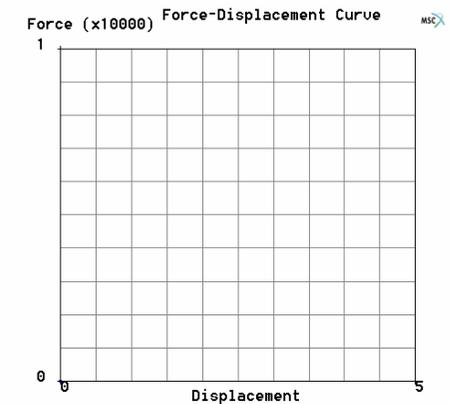


- Моделирование расслаивания композитов
- Клеевое соединение
 - Детали разбиваются на КЭ независимо
 - Связующее вещество моделируется автоматическим добавлением специальных когезионных элементов
 - Опция glue-контакта может использоваться для объединения деталей

Inc: 0
Time: 0.000e+000



Lap-Shear Joint: Quadratic Elements
Damage



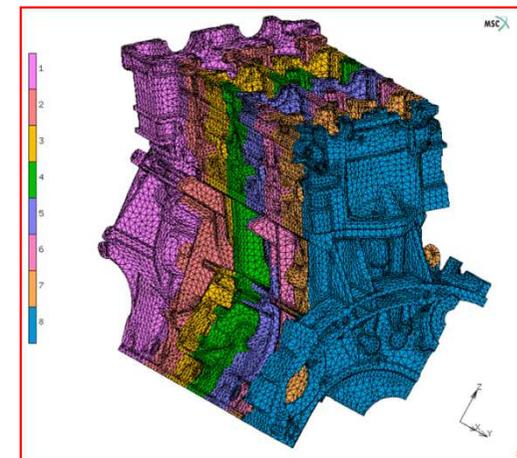
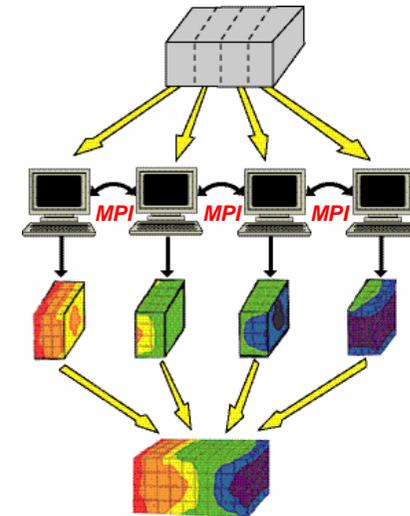
Параллельные вычисления в Marc



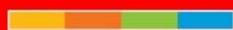
Пространственная декомпозиция модели

Автоматический, полу-автоматический и ручной методы декомпозиции

- Каждая часть модели рассчитывается на отдельном вычислительном узле
- Взаимодействие между частями модели происходит автоматически
- Доступно для всех операционных систем, поддерживаемых Marc
- Можно задействовать большинство функций Marc



Пример:
Блок цилиндров
ДВС

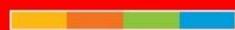
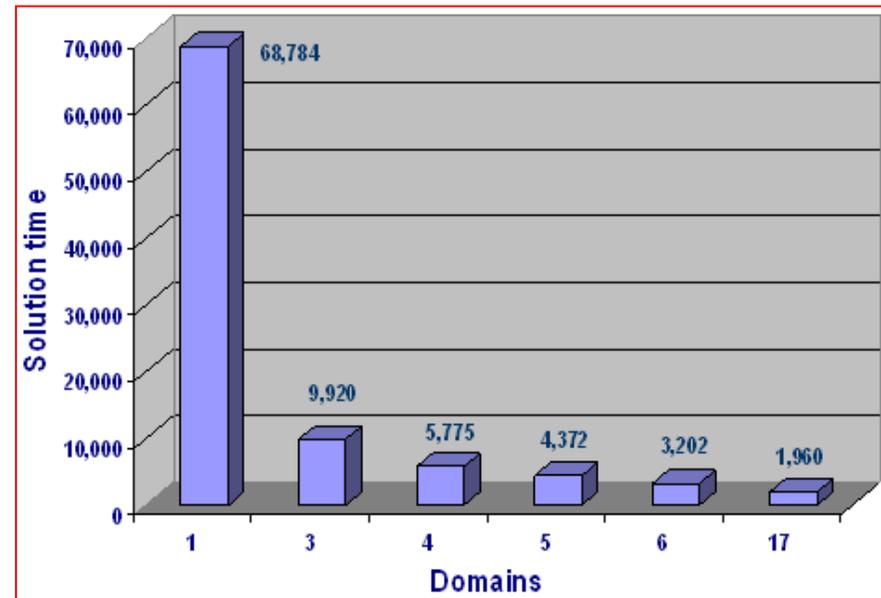
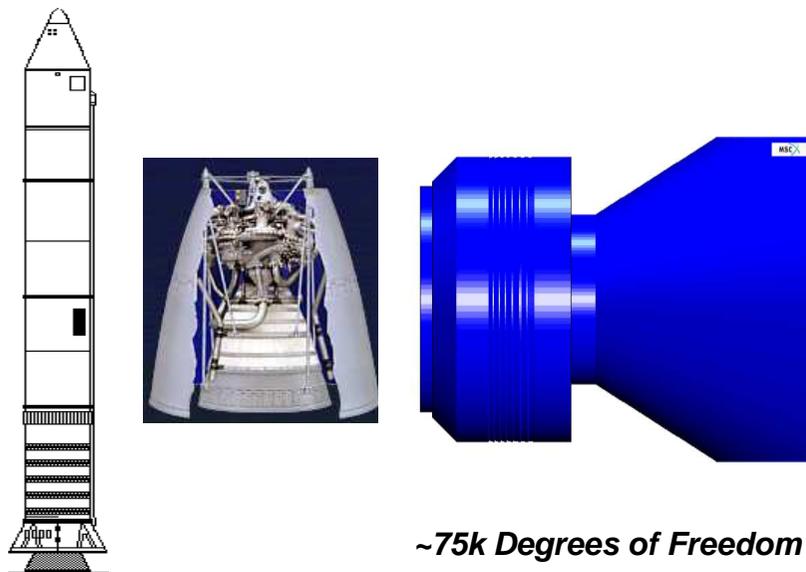




Эффективность параллельных вычислений в Marc

Пример: расчет гибкого шарнира установки поворотного ЖРД на ракетеносителе

- Несколько слоев стали и резины
- В процессе расчета жесткость меняется на 5 порядков
- **График показывает сокращение времени счета задачи при подключении дополнительных вычислительных узлов кластера**



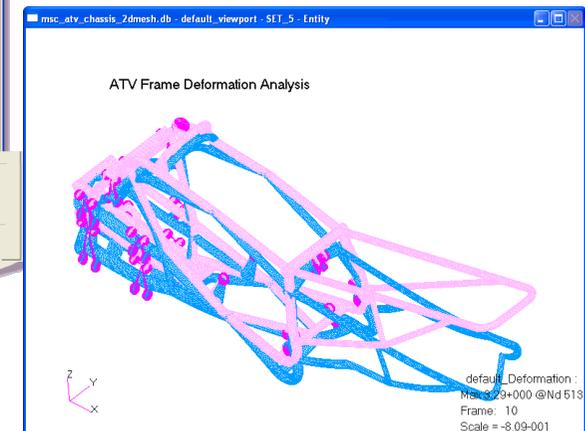
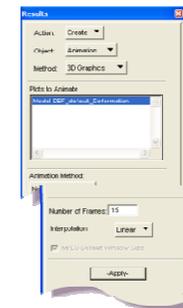
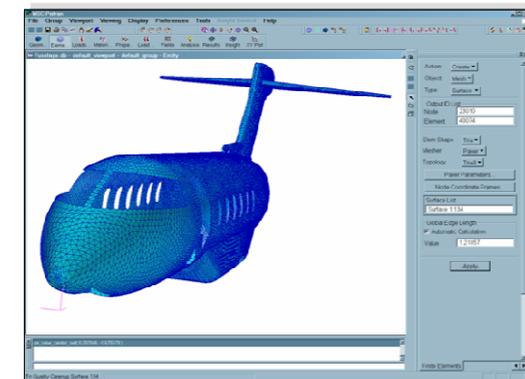
Пре- и постпроцессоры для работы с Marc



Patran – интегрирующая среда и пре-постпроцессор для всех конечно-элементных решателей MSC

Специальный набор настроек для работы с Marc

- Интеграция с CAD
- Создание, редактирование и импорт готовых расчетных моделей Marc в базу данных Patran
- Импорт результатов Marc в бинарном - *.t16* и текстовом - *.t19* виде в базу данных Patran, в т.ч. вместе с сеткой
- Широкие возможности по построению конечно-элементных сеток, их редактированию и оптимизации
- Свойства материалов, элементов, нагрузки
- Настройки решения
- Работа с композиционными материалами
- Запуск на расчет и загрузка результатов
- Обработка результатов



Marc Mentat – специализированный пре-постпроцессор только для Marc

Ориентирован на продвинутых пользователей

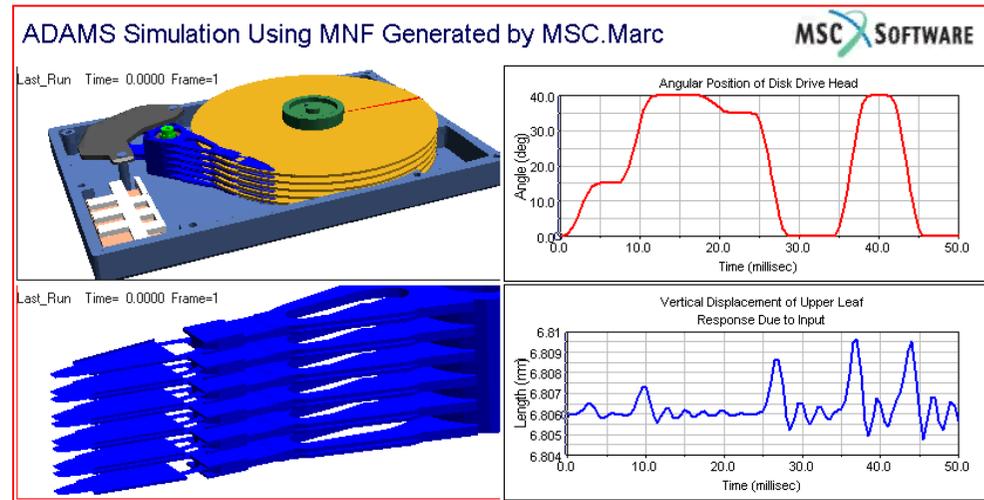
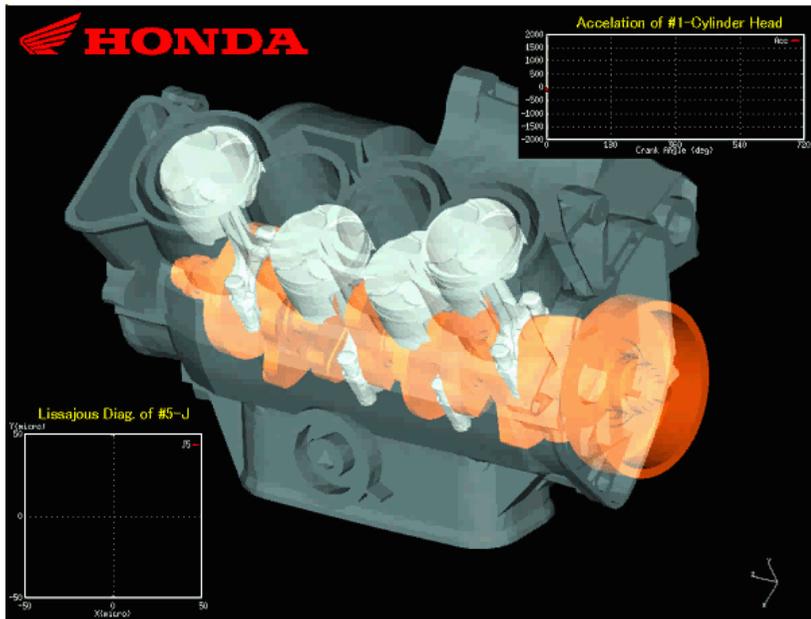


Интеграция Marc с ADAMS

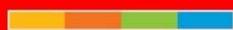


Создание упругого тела для включения в состав модели механической системы в Adams

- Поддержка преднагрузки, многоточечных связей и т.д.
- Модальное представление упругого тела
- Экспорт в специальный формат MNF

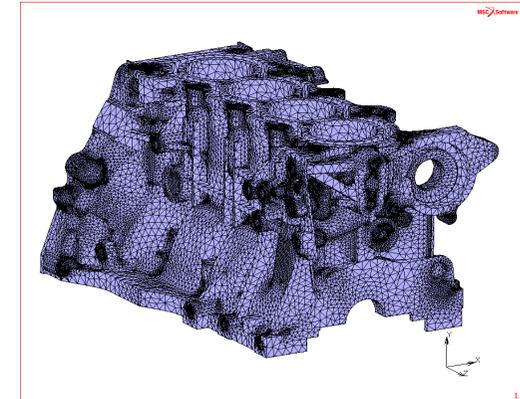
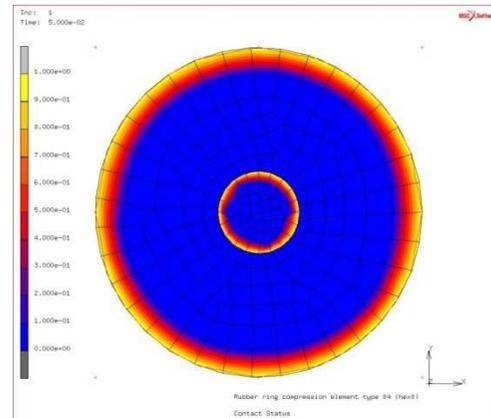
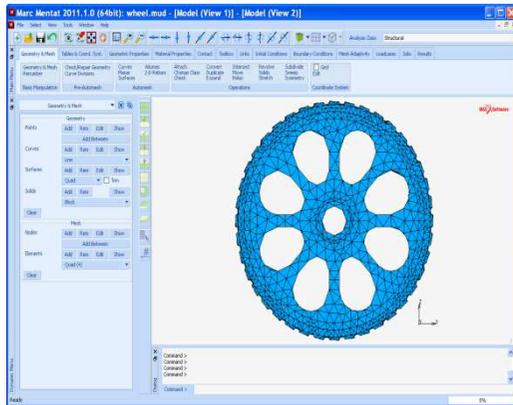


Computer Disk Drive Head Simulation





Новые возможности Marc



Проще

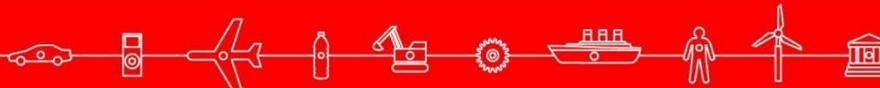
- Полностью обновлённый интерфейс
- Расширенный доступ к CAD моделям
- Обновлённый генератор 3D сеток
- Новые возможности при генерации и выборе КЭ сеток

Удобнее

- Контакт Сегмент-Сегмент
- Новая теория разрушения для композитов (Strain Invariant Failure Theory)
- Рост и ветвление трещин
- Ортотропная модель трения
- Усовершенствования при моделировании Glue контакта

Быстрее

- Ускорение работы решателей Pardiso и Mumps
- Поддержка DDM при расчёте сварки





Спасибо за внимание

Эдуард Юрьевич Князев,
Руководитель технического отдела

