

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ

MSC.Marc

для решения
сложных инженерных задач

В предлагаемой вашему вниманию статье мы постарались представить некоторые результаты освоения и применения расчетной CAE-системы в ФГУП "КБ Точмаш им. А.Э. Нудельмана", основным направлением деятельности которого является разработка наукоемких изделий. Сложность и уникальность таких изделий, экстремальные условия их эксплуатации потребовали использовать при расчетах современные вычислительные инженерные комплексы.

В мировой практике уже прочно укоренилось понятие "VPD-технология" (виртуальная разработка изделий). Эта технология позволяет работать с виртуальным аналогом реального изделия и уже на стадии проектирования прогнозировать его функциональность, оценивать соответствие требованиям надежности и безопасности в реальных условиях эксплуатации. Одновременно сводятся к минимуму натурные испытания.

Проанализировав рынок современных CAE-комплексов, КБ "Точмаш" остановило выбор на программном обеспечении MSC.AFEA, разработанном MSC.Software Corporation.

Для тестирования комплекса были взяты задачи, которые прежде решались с использованием другого программного обеспечения или не решались в точной постановке. Тре-

бовалось получить ясное представление о трудоемкости работы по формированию расчетных схем моделей с использованием MSC.AFEA, удобстве и "прозрачности" интерфейса пре- и постпроцессора, изучить возможности моделирования нагрузок и краевых условий, представления результатов расчета. И, разумеется, добиться необходимой точности результатов.

В качестве первого тестового испытания выполнялся расчет напряженно-деформированного состояния сложной корпусной детали при ее нагружении на испытательном прессе осевой сжимающей силой в 100 тс, соответствующей эксплуатационной нагрузке (рис. 1).

При расчетах была принята упруго-пластическая модель поведения материала. Диаграмма деформирования материала (напряжение $[Н/м^2]$ — относительная деформация) представлена на рис. 2; синяя кривая соответствует идеализированной кривой деформирования, часто используемой в расчетной практике.

В MSC.Marc пользователь задает модифицированную кривую, вычитая упругую часть деформации из исходной диаграммы деформирования (график красного цвета).

Между цилиндром и опорными поверхностями пресса моделируется условие контактного взаимодействия с коэффициентом трения, равным 0,1.

MSC.Software Corporation

MSC.Software Corporation — широко известный в мире разработчик и поставщик программных продуктов, систем и услуг в области информационных технологий.

Компьютерные технологии MSC.Software не только обеспечивают самый широкий спектр высокоточных инженерных расчетов прочности, динамики, кинематики, теплопередачи, акустики, аэроупругости, долговечности и т.д., но и позволяют виртуально моделировать технологические процессы изготовления и сборки изделий.

В структуру MSC.Software Corporation включен Институт образования, где разрабатываются учебные и методические материалы по освоению и применению программных средств MSC. На основе этих материалов MSC организует обучение пользователей работе с каждым из своих продуктов.

Одно из важнейших составляемых успеха — поддержка клиентов. В эту сферу компания направляет существенную часть своих ресурсов: система поддержки, созданная MSC, по праву считается лучшей в отрасли. Ежегодно по всему миру проводятся конференции, на которых пользователи обмениваются опытом применения компьютерных технологий MSC. В России такие конференции организуются с 1998 года.

Среди пользователей программного обеспечения MSC — ведущие предприятия и вузы России и стран СНГ: АО "ГАЗ", АО "АВТОВАЗ", ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, РКК "Энергия", АООТ им. Ильюшина, ОКБ Сухого, ОКБ им. А.С. Яковлева, НАЗ "Сокол", КНААПО, ЦИАМ, НПО "Сатурн", ММП "Салют", КБ "Южное", ФГУП "КБ Точмаш им. А.Э. Нудельмана", МАИ, КАИ, МИХМ, МИИТ, ИргТУ и многие другие.

MSC.AFEA

MSC.AFEA — комплекс на базе решателя MSC.Marc, ориентированный на решение физически и геометрически нелинейных задач механики, а также задач теплопередачи, включая связанные задачи теплопрочности. В единой среде графического интерфейса пре- и постпроцессора MSC.Patran пользователь может формировать задачи, осуществлять их расчет и обрабатывать результаты.

Функциональные возможности решателя MSC.Marc (полный набор моделей материала, автоматический трехмерный контакт, расчет больших пластических и упругих деформаций, циклическое нагружение, глобальное перестроение сетки, перенос решения из двумерного случая в трехмерный и т.д.) делают этот продукт высокоэффективным средством исследования сложного поведения различных конструкций.

Дополнительной особенностью MSC.AFEA является относительно небольшая стоимость этого комплекса при исключительно высоких вычислительных возможностях, реализующих самые современные технологии конечно-элементного анализа.

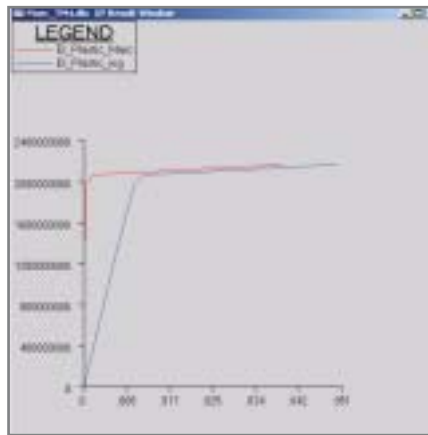


Рис. 2. Кривые деформирования материала изделия

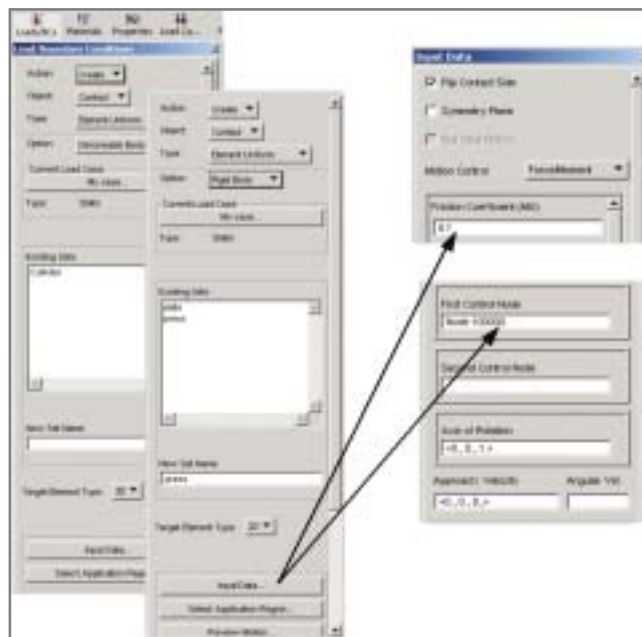


Рис. 3. Подготовка информации по контактным компонентам сборки

Сильная сторона MSC.Marc — прекрасный инструмент для моделирования условий контакта между элементами модели. Пользователю не нужно предварительно знать, где конкретно происходит контактное взаимодействие между компонентами сборки: достаточно указать, какие тела имеют потенциальную возможность вступать в контакт. Признак контактного взаимодействия (вместе с параметрами, уточняющими условия контакта) формально вводится как вид граничных условий в рамках конкретной группы нагрузок и краевых условий (в терминах MSC.Marc группа нагрузок и краевых условий,

одновременно действующих на объект, обозначается как *Load Case*). При этом можно задавать два вида контактных тел — деформируемые (*deformable*) и абсолютно жесткие (*rigid*).

В рассматриваемой задаче деформируемым телом являлась цилиндрическая деталь, а опорные поверхности пресса моделировались как жесткие тела — плиты (рис. 3), причем они были представлены как

геометрические объекты: плоскости, примыкающие к нижнему и верхнему торцам цилиндра.

При формировании информации по контактным телам автоматически формируется контактная таблица (рис. 4), где между всеми парами контактных тел по умолчанию задается признак контакта (Т — *Touch*). Внешне она напоминает таблицу с результатами группового турнира, проходящего по круговой системе.

Предусмотрены три варианта взаимодействия между компонентами: возможность вступать в контакт (Т — от английского *Touch*, прикасаться); монолитное соединение (G — от *Glue*, склеить); отсутствие возможности контакта между парой компонентов (пустое поле).

Колонка *Release* позволяет включать отдельные компоненты в спи-

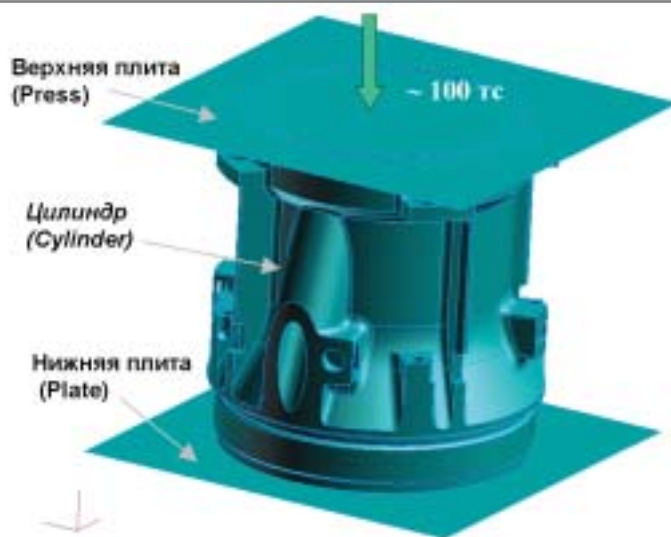


Рис. 1. Схема нагружения корпусной детали

НОВОСТИ

Технологии виртуальной разработки изделий MSC.Software — эффективный инструмент проектирования в железнодорожной отрасли

Авиационная и автомобильная промышленность, судостроение, производство подвижного состава железных дорог были, есть и будут "локомотивом" экономики всех развитых стран. Состояние предприятий транспортного машиностроения во многом является показателем "самочувствия" экономики страны в целом.

Преобразования в железнодорожной отрасли России способствуют ускоренному развитию предприятий транспортного машиностроения, которые, в свою очередь, проявляют повышенный интерес к внедрению технологий автоматизированного проектирования и инженерного анализа.

Только за второй квартал 2005 года два крупных предприятия российского транспортного машиностроения — ЗАО "Управляющая компания ВКМ" и ОАО "Коломенский завод" — стали обладателями лицензий на программные продукты MSC.

Понимая важность применения передовых компьютерных технологий в проектировании, эти предприятия сделали выбор в пользу "жетонной" системы лицензирования MSC.MasterKey, соответствующей самому современному уровню технологий VPD*.

ЗАО "Управляющая компания ВКМ" — крупный производитель железнодорожного подвижного состава, внедряющий новейшие инженерные компьютерные технологии в процесс разработки конструкции перспективных тележек железнодорожных вагонов.

ОАО "Коломенский завод" — крупнейший российский разработчик и производитель локомотивов и дизельных двигателей, используемых в локомотивостроении, судостроении и других отраслях. Предприятие уже обладает рядом систем MSC на базе "традиционных" сетевых лицензий, но с приобретением широкого комплекса VPD-систем, основанных на "жетонном" лицензировании, возможности инженерного анализа существенно расширились.

* VPD (Virtual Product Development) — виртуальная разработка изделий

сок взаимодействующих тел или исключать их из этого списка. Такая опция полезна при моделировании технологических процессов (ковка, штамповка и т.д.), когда на каждом шаге формоизменения заготовки меняется инструмент и, соответственно, условия контакта заготовки с инструментом.

При формировании шага по нагрузке (в терминах MSC.Marc — *Load Step*) пользователь устанавливает ссылки на соответствующую группу нагрузок и краевых условий (*Load Case*) и при необходимости вносит изменения в таблицу контактов. Для каждой контактной пары можно задать индивидуальные характеристики — в частности, коэффициент трения.

Применительно к нашему случаю верхняя часть таблицы контактов выглядит так, как это показано на рис. 5: мы считаем, что деформации цилиндра не настолько велики, чтобы это могло привести к самоконтакту.

Для моделирования сжимающего усилия со стороны верхней плиты пресса (в таблице она обозначена как *3-press*) используется следующий формальный прием. В пространстве размещается дополнительный узел, к которому прикладывается нагрузка соответствующего значения и направления (в нашем случае — вертикальная, равная 10^6 Н). При формировании контактной информации по верхней плите задается ссылка на этот узел в поле *First Control Node* (см. рис. 3). Теперь верхняя плита будет двигаться поступательно вниз, сохраняя свою исходную ориентацию и действуя на цилиндр с силой 10^6 Н.

Помимо силы похожим способом можно моделировать воздействие в виде момента, а также кинематические условия (предписанные переме-

щения и повороты, линейные и угловые скорости).

Для улучшения кинематической определенности расчетной модели в отдельных узлах нижнего торца цилиндра были введены нуль-мерные элементы типа SPRING (пружина) с жесткостью 1000 Н/м в горизонтальной плоскости. Эти элементы практически не влияют на конечный результат, но повышают вычислительную устойчивость решения.

При решении задач методом конечных элементов особое значение имеет адекватное конечно-элементное представление области. Для получения приемлемой точности решения в зонах, где возможен большой градиент напряжений, а также в зонах большой кривизны, размер ребра конечных элементов необходимо уменьшить. Существует и другой способ — повысить порядок используемых конечных элементов.

При решении рассматриваемой задачи мы выбрали квадратичные 10-узловые тетраэдральные изопара-

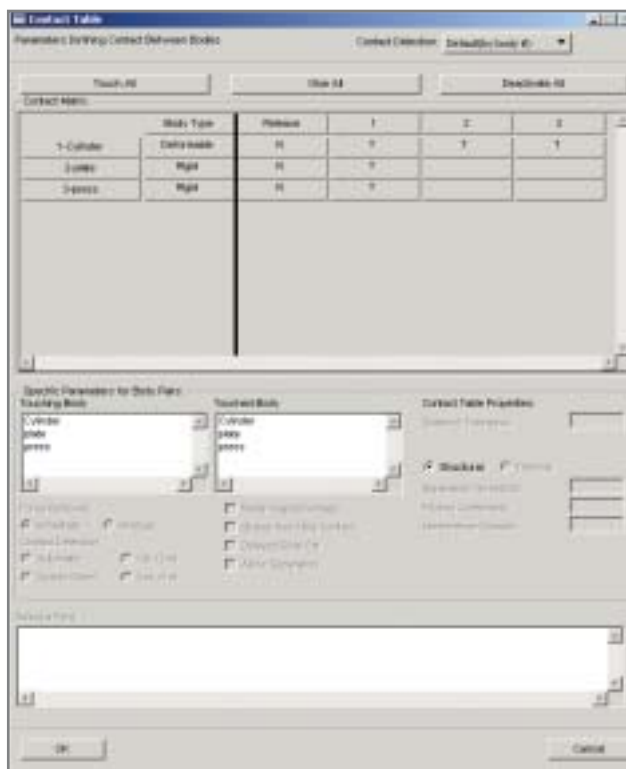


Рис. 4. Исходная таблица контактов, формируемая по умолчанию

Contact Name	Body Type	Material	1	2	3
1-Cylinder	Cylindrical	IN	0	0	0
2-Plate	Right	IN	0	0	0
3-Press	Right	IN	0	0	0

Рис. 5. Таблица контактов, соответствующая принятой расчетной схеме

НОВОСТИ

Вторая Европейская конференция
"Виртуальное моделирование
в судостроении"

Насущная необходимость повышения эффективности проектирования заставляет специалистов всех отраслей промышленности искать пути уменьшения стоимости и сокращения времени процесса разработки проектной документации. Не является исключением и судостроительная отрасль.

Судостроительные КБ и заводы прилагают постоянные усилия для внедрения передовых технологий.

В настоящее время затраты на разработку и изготовление нового судна стремительно возрастают по мере приближения срока сдачи судна заказчику.

Наиболее важные конструктивные решения, определяющие объем и структуру капиталовложений в проект, принимаются как раз на самом раннем этапе проектирования. Чем позже возникает необходимость корректировки проекта, тем большие затраты это вызывает. Поэтому с повышением достоверности имеющейся информации о характеристиках будущего изделия уменьшается вероятность внесения каких-либо изменений в проект, а если такие изменения все-таки потребуются, они обойдутся гораздо дешевле.

Таким образом, чем выше достоверность информации об изделии на ранних стадиях проекта, тем лучше защищены уже сделанные и планируемые капиталовложения, что особенно важно для судостроения, поскольку стоимость каждого отдельного изделия здесь может достигать астрономической величины. Опыт ведущих мировых компаний указывает на путь решения этой проблемы — использование технологий VPD. Самым крупным разработчиком и поставщиком наиболее совершенного и гибкого пакета систем VPD является MSC Software.

2-3 июня 2005 года в Гамбурге компании MSC Software и Germanischer Lloyd совместно провели Вторую Европейскую конференцию "Виртуальное моделирование в судостроении", в которой приняли участие специалисты ведущих европейских КБ, специализирующиеся в области судо- и кораблестроения, а также консалтинговых фирм и компаний, разрабатывающих CAD/CAE-системы.

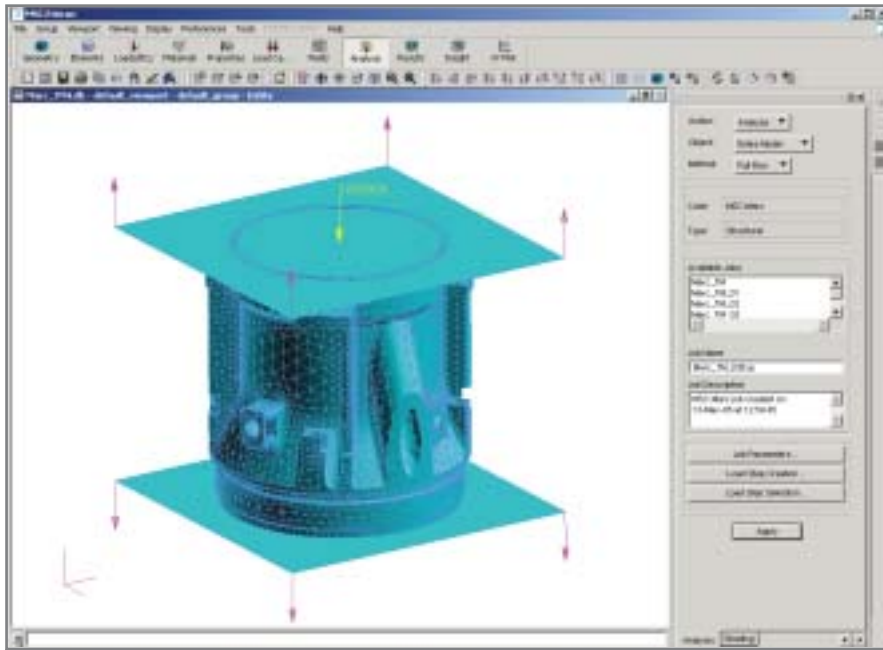


Рис. 6. Окно MSC.Patran с визуализацией маркеров нагрузки и контактных компонентов сборки

метрические элементы. Желтая стрелка на рис. 6 показывает приложенную нагрузку (10^6 Н), а стрелки, выходящие из угловых точек поверхностей, направлены в сторону, противоположную направлению нормали к контактной стороне.

Важнейший этап работы с комплексом — настройка параметров решения (рис. 7).

Активация кнопки *Job Parameters* открывает окно, в котором задаются

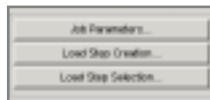


Рис. 7. Кнопки для настройки параметров решения

параметры, общие для всей истории нагружения (рис. 8), — в частности, тип решателя (например, прямой, итерационный или мультифронтальный) и используемая модель трения.

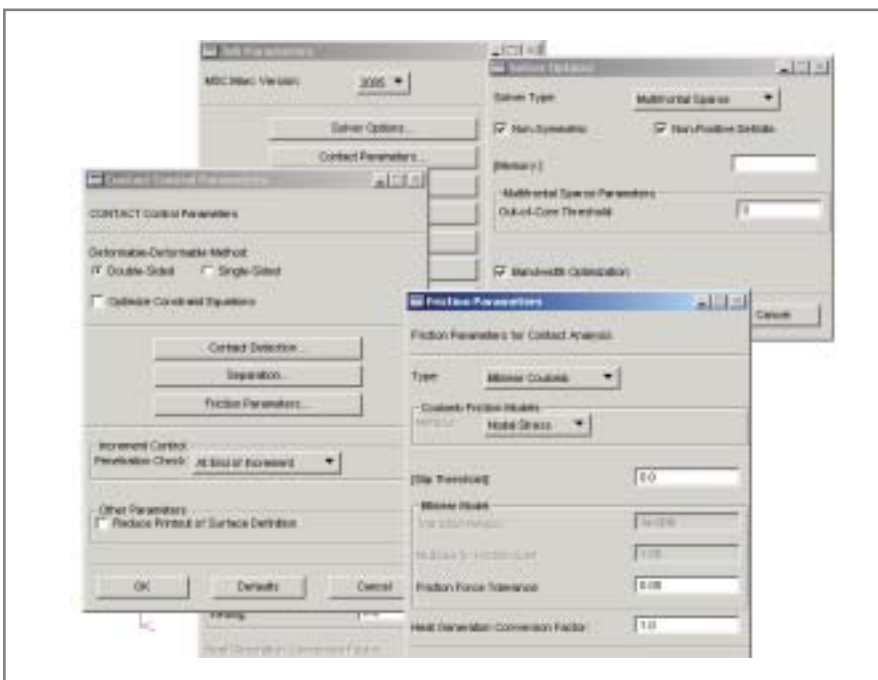


Рис. 8. Группа окон для указания общих параметров задачи

Здесь же можно активировать опцию сохранения промежуточных данных с возможностью в дальнейшем продолжить счет (*Restart Parameters*) и т.д.

Кнопка *Load Step Creation* обеспечивает доступ к функциям для формирования параметров конкретного шага нагружения: определяется тип шага (линейный или нелинейный), уточняется формулировка, в которой решается задача, выбирается необходимый набор нагрузок (соответствующий *Load Case*), редактируется контактная таблица и определяются параметры итерационного процесса.

В разделе *Load Step Selection* формируется история нагружения — как список уже подготовленных шагов.

Обычно большую часть табличных параметров можно принимать по умолчанию. Но чтобы быть полностью уверенным в результатах решения, необходим взвешенный подход, а это требует серьезного изучения теоретических основ, реализованных в алгоритмах MSC.Marc, и определенного опыта работы с комплексом.

На этапе первоначального знакомства с функциональными возможностями MSC.Marc неоценимую помощь нам оказали специалисты московского представительства MSC.Software Corporation. Итоговая модель для расчета была сформирована в тесном сотрудничестве с ними.

На рис. 9-13 приведены примеры графической интерпретации результатов решения, полученные с помощью MSC.Patran, располагающего богатыми возможностями обработки и визуализации результатов расчета.

Анализ полученных результатов показал, что они соответствуют физической картине явления и коррелируют с результатами как экспериментальных исследований, так и расчетов с использованием другого программного обеспечения. При этом нужно отметить, что по результатам сравнения с экспериментальными данными принятая расчетная схема более адекватна моделируемому процессу, чем те, что использовались ранее, а трудоемкость создания расчетной модели оказалась невысокой.

Опыт работы с MSC.AFEA подтвердил правильность выбора, сделанного КБ "Точмаш".

Когда первая задача была решена, появилось желание провести более серьезное испытание программы. На сей раз с использованием MSC.AFEA

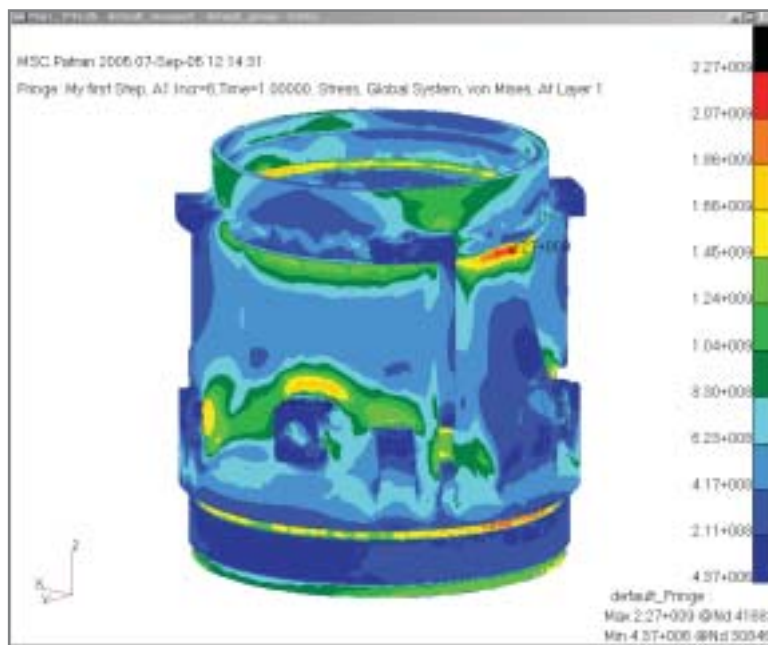


Рис. 9. Поле эквивалентных напряжений по Мизесу (меню *Results*)

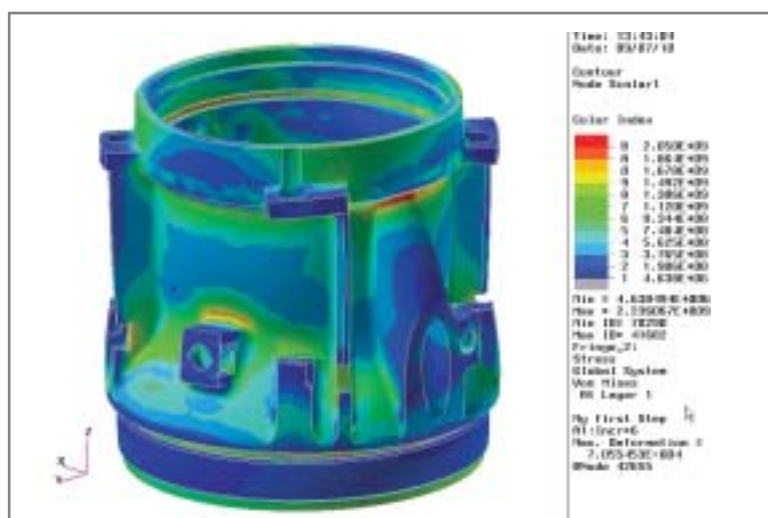


Рис. 10. Поле эквивалентных напряжений по Мизесу (меню *Insight*)

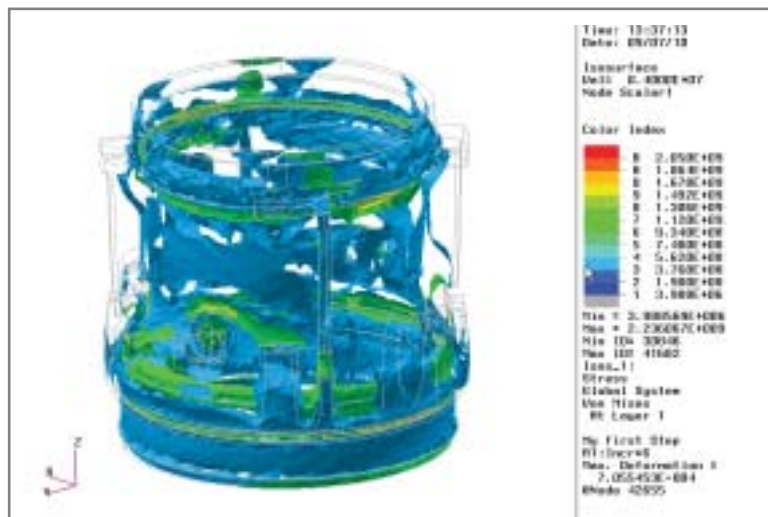


Рис. 11. Исоповерхности для эквивалентных напряжений по Мизесу (меню *Insight*)

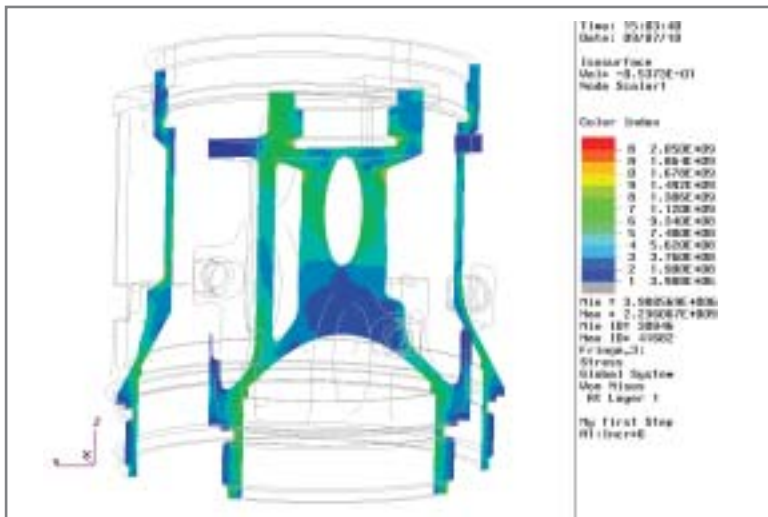


Рис. 12. Поле эквивалентных напряжений по Мизесу в выбранных сечениях модели (меню *Insight*)

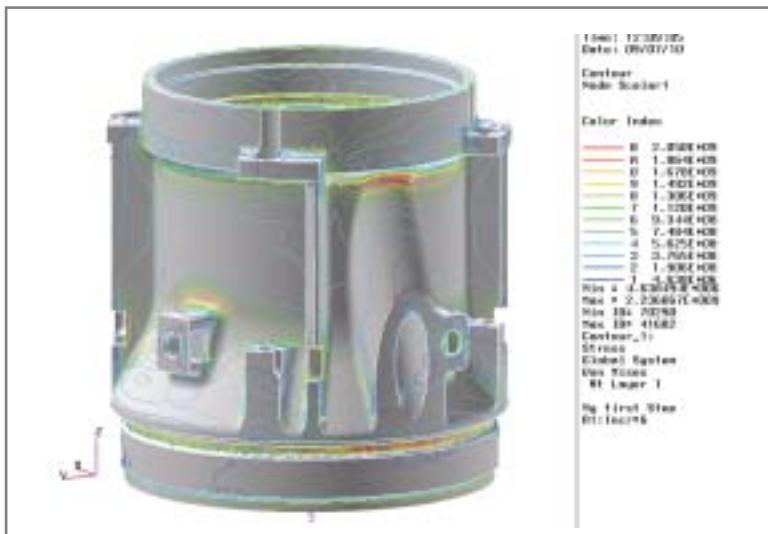


Рис. 13. Изолинии для эквивалентных напряжений по Мизесу (меню *Insight*)

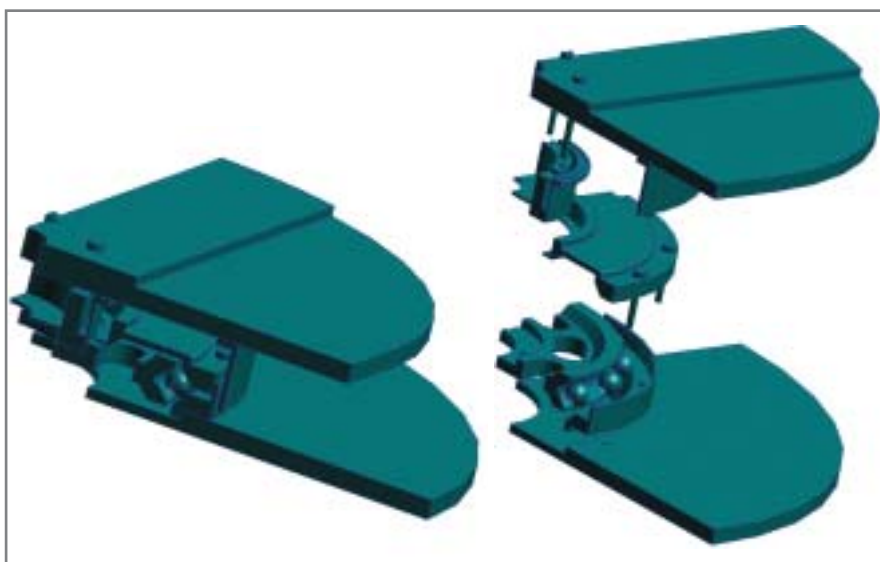


Рис. 14. Расчетная область, выделенная по условиям симметрии (геометрической, по нагрузке и закреплениям) для расчета напряженно-деформированного состояния подшипника

предстояло решить задачу, которая в свое время отняла у специалистов КБ "Точмаш" немало времени и сил. Рассматривалось поведение подшипника, который в процессе эксплуатации нагревается на 60°C и нагружается осевой силой в три тонны. В состав подшипника входят компоненты, изготовленные из разных материалов. Особенность задачи — предварительная затяжка винтами корпусных деталей, крепящих подшипник, таким образом, что напряжение в сечении винтов составляет 50 кг/мм^2 (рис. 11).

Основной интерес состоял в том, чтобы найти ответ на вопрос, не произойдет ли заклинивание шариков подшипника при нагреве вследствие разного температурного расширения разнородных материалов.

В качестве расчетной области рассматривалась 1/4 часть подшипника, выделенная из соображений условий симметрии (геометрической и по нагрузке).

Задача является существенно нелинейной вследствие большого количества контактных поверхностей и, с точки зрения инженерного анализа, действительно является крепким орешком.

Несмотря на всю сложность задачи, хотелось "честно", без упрощений, смоделировать поведение конструкции, максимально учесть нюансы. Как решалась эта задача, с какими трудностями пришлось столкнуться и как они были преодолены, мы расскажем в следующих номерах журнала.

Алексей Корнеев,
к.т.н.,
начальник теоретического отдела
ФГУП "КБ Точмаш"

Сергей Моргулец,
к.т.н.,
начальник сектора
теоретического отдела
ФГУП "КБ Точмаш"

Максим Климов,
инженер теоретического отдела
ФГУП "КБ Точмаш"
Тел.: (095) 333-6113
E-mail: kbtm13@tochmash.rmt.ru

Сергей Девятков
CSoft
Тел.: (095) 913-2222
E-mail: devyatov@csoft.ru