



## ➤ ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНЖЕНЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА В СРЕДЕ MSC APEx

Новые прогрессивные технологии вносят существенный вклад в создание современных конкурентоспособных изделий в кратчайшие сроки и с минимальными затратами ресурсов. Только хорошо оснащенные и подготовленные команды способны быстро выполнить проектирование на высоком инженерном уровне. Компании, в бизнес-процессах которых предусмотрены этапы проектирования сложных наукоемких изделий, имеют команды конструкторов, инженеров-расчетчиков и других специалистов, занятых созданием нового изделия. Такие команды должны быть оснащены современными средствами проектирования. Для конструкторов – это CAD-системы (Computer Aided Design), для инженеров-расчетчиков – CAE-системы (Computer Aided Engineering). И чем более совершенными средствами и инструментами обладают такие специалисты, тем выше производительность.

Наукоемкость и многообразие решаемых задач делают традиционные существующие CAE-системы весьма сложными. Пользователю приходится сталкиваться с огромным числом инструментов, некоторые из которых он использует повседневно, другие – реже. И нерациональное расположение этого функционала в программе ведет к увеличению времени на его поиск, усложнению выбора, росту вероятности появления ошибок. Пользователь вынужден сосредотачиваться не на проектирова-

нии изделия, а на поиске нужных инструментов.

Вместе со сложностью самих CAE-систем растут затраты труда и финансов на обучение специалистов. Как показывает практика, чтобы новичок смог нормально начать работать с традиционной CAE-системой, ему потребуется три-четыре недельных интенсивных учебных курса, желательно с перерывами в пару недель на осознание полученных знаний. Затем следует этап проб и ошибок при использовании нового программного обеспечения, растет число вопросов к службе технической поддержки и т.д. При этом финансовые затраты на обучение и расходы, связанные с отвлечением сотрудника от своих непосредственных рабочих обязанностей – проектирования, несет компания. Таким образом, чем сложнее система, тем больше затраты на ее эксплуатацию, а значит, ниже эффективность ее использования в целом.

Одной из сложностей для дальнейшего развития и совершенствования традиционных CAE-систем является их возраст. Действительно, проанализировав, например, даты появления всех наиболее известных CAE-систем, можно увидеть, что многие из них были созданы еще 20-25 лет назад. Если учесть современные темпы развития технологий, можно прийти к выводу, что это очень большой срок! Фактически почти все традиционные CAE-приложения имеют в своей основе старую архитектуру и технологии. К сожалению, обновления и не-

большие доработки лишь усложняют и без того сложные системы, но не делают их более современными. Более того, внедрение новых технологий в приложение, построенное по старой архитектуре, часто бывает неэффективным и очень затратным.

Так какое может быть решение? Инженеру-расчетчику крайне необходима собственная среда (не конструкторская, как иногда ошибочно считают разработчики интегрирующих всё и вся систем), в которой он может готовить модель необходимым ему способом, с понятными ему терминами и правилами. Эта среда должна позволять выполнять упрощение геометрической модели, чтобы не было необходимости задействовать конструктора или забирать лицензию на CAD-систему и тем более, чтобы расчетчику не было необходимости изучать CAD-систему помимо изучения инструментария CAE-среды.

Большое количество повторяющихся рутинных операций, выполняемых расчетчиком на этапе подготовки геометрической модели к построению конечно-элементной (КЭ) сетки, назначения атрибутов модели (например, толщины оболочечных элементов и их отступов от плоскости узлов сетки) приводит к увеличению затрат времени и труда специалистов. Это затягивает процесс проектирования изделия в целом и увеличивает себестоимость производства.

Что же необходимо сделать, чтобы решить данную проблему? Необходима со-

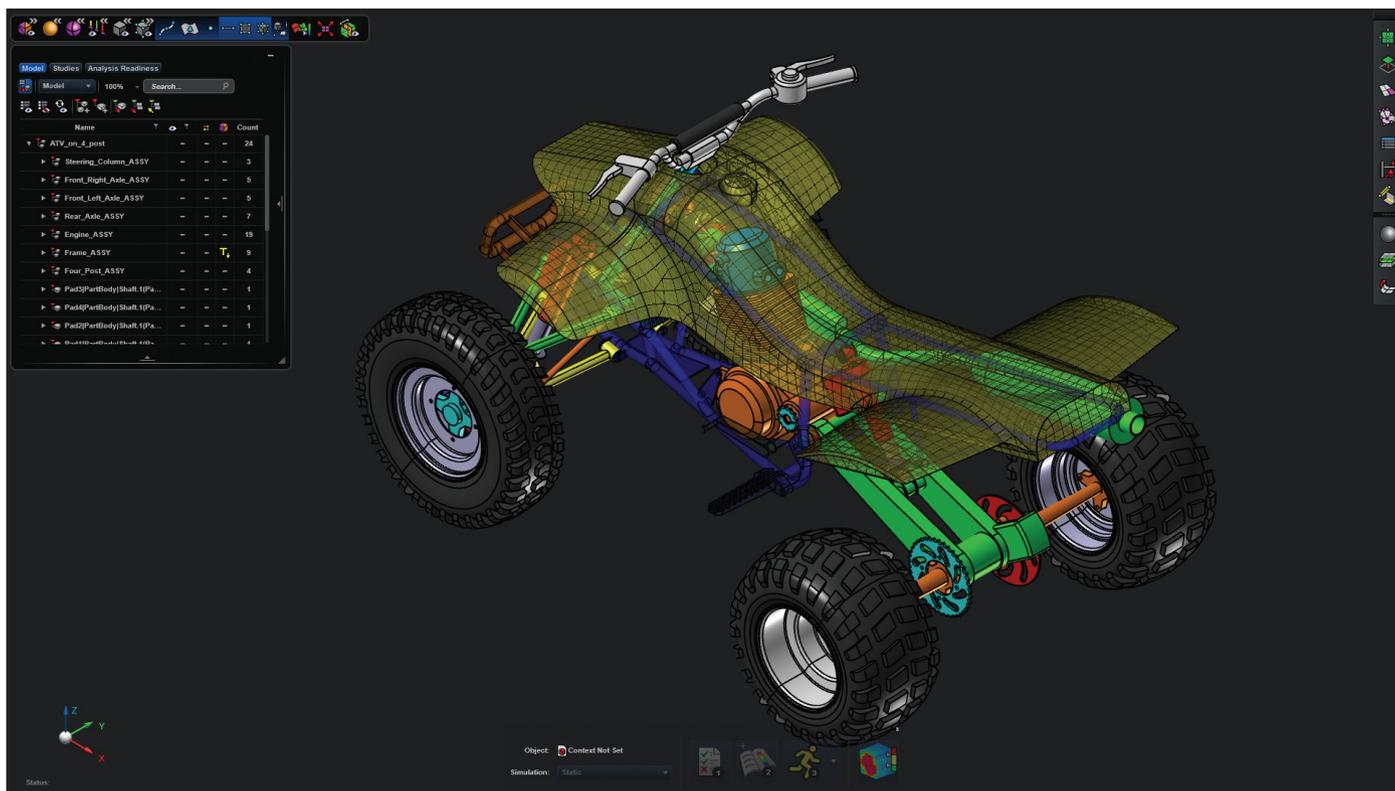


Рис. 1

временная высокоэффективная в повседневном использовании и легкая в освоении CAE-среда. Такая система должна обладать удобным дружественным пользовательским интерфейсом с максимальным пространством для модели и минимальным загромождением панелями инструментов и меню, интуитивно-понятная, а также снабженная всем необходимым комплексом инструментов для построения расчетной модели.

Компания MSC Software долгое время является одним из передовых мировых разработчиков систем инженерного моделирования и анализа. Такие программные продукты, как MSC Nastran, Marc, Dytran, Adams, Patran, уже давно широко используются инженерами во всем мире для моделирования и анализа самых разнообразных конструкций изделий в различных отраслях промышленности.

MSC Software постоянно развивает свои технологии, используя при этом все новейшие передовые идеи и подходы, которые по возможности внедряет в свои программные продукты.

Отслеживая и анализируя запросы и пожелания пользователей, специалисты компании пришли к выводу о необходимости создания принципиально новой CAE-среды, которая наилучшим образом сочетала бы весь накопленный

опыт предыдущих разработок, и в то же время максимально использовала бы современные идеи, разработки и технологии. Целью разработки новой рабочей среды для инженера-расчетчика стало повышение эффективности труда специалиста при обеспечении оптимального уровня комфорта работы пользователя в среде, не перегруженной огромным числом инструментов, но при этом с минимальным необходимым числом "умных" интуитивно-понятных многофункциональных инструментов, каждый из которых позволял бы в определенной степени автоматизировать рутинные операции. Это позволит существенно повысить производительность и качество работы инженера-расчетчика на одном из самых трудоемких и затратных этапов работы – этапе подготовки и отладки расчетной модели. Однако система должна оставаться простой в освоении, что снизит затраты компании на подготовку специалистов и времени на их включение в процесс проектирования. Обладая такой системой, предприятие может существенно сократить свои расходы на использование инженерного программного обеспечения и повысить эффективность процесса проектирования в целом.

Итак, после нескольких лет разработки MSC Software предлагает пользователям

CAE-систему нового поколения, которая получила название MSC Apex.

**MSC Apex** – совершенно новая программная платформа, основа для реализации новых возможностей в сфере CAE-моделирования и анализа. Это гибкая высокоэффективная компонентная среда для подготовки КЭ-моделей и их расчета методом конечных элементов (рис. 1). Состав компонентов среды MSC Apex расширяется от версии к версии. Для актуальной на момент выхода статьи версии MSC Apex – **Diamond Python** доступны два модуля: **Modeler** и **Structure**.

**MSC Apex Modeler** – основной многофункциональный модуль, предназначенный для эффективной работы с геометрическими моделями, полученными из CAD-систем, их доработки, упрощения для нужд CAE-анализа и одновременно для генерации конечно-элементной сетки.

**MSC Apex Structure** – дополнительный модуль, предоставляющий возможности подготовки модели к расчету, в частности, весь необходимый для этого набор инструментов задания граничных условий, нагрузок, свойств материалов, автоматизированной проверки готовности модели к расчету и непосредственного выполнения расчета.

Сочетание небольшого количества многофункциональных и интерактивных

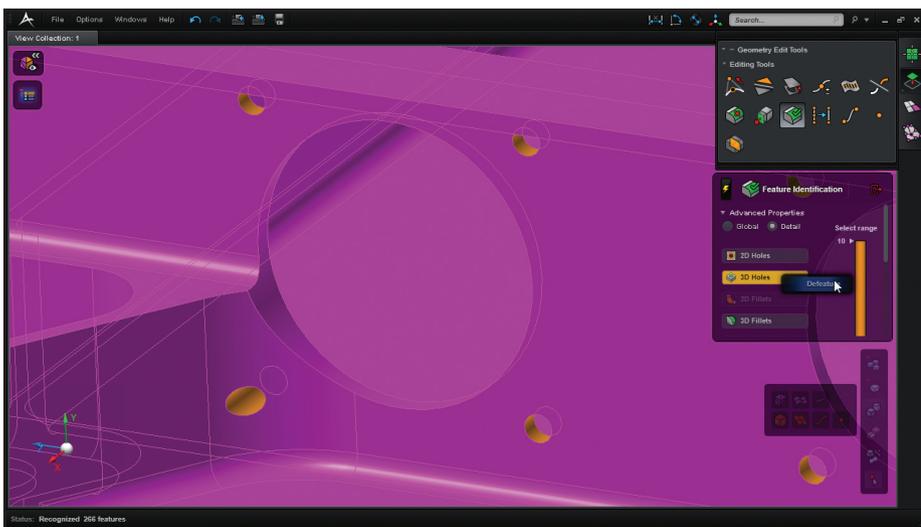


Рис. 2

инструментов моделирования обеспечивает беспрецедентную эффективность освоения и использования программного комплекса.

Основные особенности MSC Apex:

- реализация технологии прямого геометрического моделирования (хорошо зарекомендовавшей себя в CAD-системах) в сочетании с синхронным перестроением КЭ-сетки (на данный момент не имеет аналогов среди конкурирующих программных комплексов);
- комплекс высокоавтоматизированных средств подготовки геометрической модели для нужд расчетчика, а также инструменты, позволяющие упростить и автоматизировать некоторые рутинные операции, характерные для этого этапа работы с моделью;
- применение технологии расчетных компонентов и сборок (Computational Parts and Assemblies™), что, по сути, является новым уровнем использования метода подконструкций (суперэлементов) для работы со сложными моделями сборок и подборок;
- интегрированные методы конечно-элементного решателя (в данном случае – MSC Nastran) позволяют выполнять расчеты конструкции непосредственно в среде MSC Apex, то есть приложение является и пре-/постпроцессором, и решателем одновременно.

Каждая новая версия MSC Apex получает свое собственное имя – название животного, начинающееся с буквы, последовательно по латинскому алфавиту. Так, первые версии имеют имена Arctic Wolf, Black Marlin, Cheetah, Diamond Python.

**Интуитивность и простота.** Взаимодействии с компонентами геометрической модели осуществляется естественным и привычным для пользователя образом: перетаскиванием, дораиванием, заполнением отверстий и зазоров, масштабированием и т.д. За счет интуитивности действий над моделью освоение работы с системой происходит в течение очень короткого времени. Опытный пользователь CAE-систем способен изучить MSC Apex за 1-2 дня, а начинающие – за 3-4 дня.

**Работа с сеткой.** Геометрическое моделирование сопровождается синхронной генерацией КЭ-сетки. Если исходная модель уже содержала КЭ-сетку, эта сетка автоматически перестраивается, отслеживая изменения геометрии. Пользователь сразу может видеть, как его действия над геометрией влияют на качество КЭ-модели.

**Короткое время и низкие затраты усилий на освоение.** Интерактивные инструкции, примеры для пошагового выполнения, видео-уроки, система поиска нужных функций программы, а также поиск по справочной системе поставляются в комплекте с MSC Apex и легко доступны из интерфейса программы.

**Подкурсорные контекстные подсказки.** Инструменты графического интерфейса снабжены всплывающими подсказками и ссылками непосредственно на нужный урок или раздел справки. При выборе любого инструмента на любом шаге его использования под курсором появляется краткая подсказка о том, каких действий система требует от пользователя в данный момент.

## Этап CAD-to-Mesh подготовки расчетной модели в среде MSC Apex

Геометрическую модель в MSC Apex можно получить путем ее импорта из одной из широко распространенных CAD-систем (UG-NX, CATIA v4, CATIA v5, SolidWorks, Inventor, Pro/Engineer Wildfire и Creo) либо одного из стандартных форматов обмена геометрическими данными, таких как STEP, IGES, ACIS или Parasolid. Помимо этого, геометрические модели определенного уровня сложности можно создать и встроенными в MSC Apex средствами геометрического моделирования, используя инструменты эскизирования панели инструментов Geometry Create. Разумеется, возможности создания геометрии в MSC Apex уступают тем, которые предоставляются пользователю в CAD-среде, однако их вполне достаточно для выполнения вспомогательных построений или редактирования уже существующей геометрии после импорта.

Рассмотрим типовой сценарий подготовки геометрической модели и генерации конечно-элементной сетки. При этом обратим внимание на задействованные инструменты MSC Apex и на способ их использования.

Этап 1. Автоматическое удаление элементов геометрической модели заданного размера.

Пользователь может самостоятельно индивидуально удалять такие геометрические особенности, как скругления, фаски, цилиндрические поверхности и отверстия, используя инструмент *Defeature*. Однако когда речь идет о поиске и удалении из геометрической модели десятков, сотен и даже тысяч экземпляров подобных геометрических особенностей, индивидуальный подход уже не годится. Поэтому в MSC Apex реализован инструмент *Feature Identification* группы *Defeature*, позволяющий пользователю задать критерии поиска геометрических особенностей на нужной части модели. Система автоматически распознает эти особенности и подсвечивает их в модели в соответствии с поддиапазоном характерных размеров, которым отвечает данная особенность. Такие поддиапазоны можно интерактивно изменять и настраивать. После того как пользователь убедился в корректности выделенных геометрических особенностей, удовлетворяющих заданным критериям, он может одним нажатием клавиши мыши удалить все эти геометрические особенности (рис. 2).

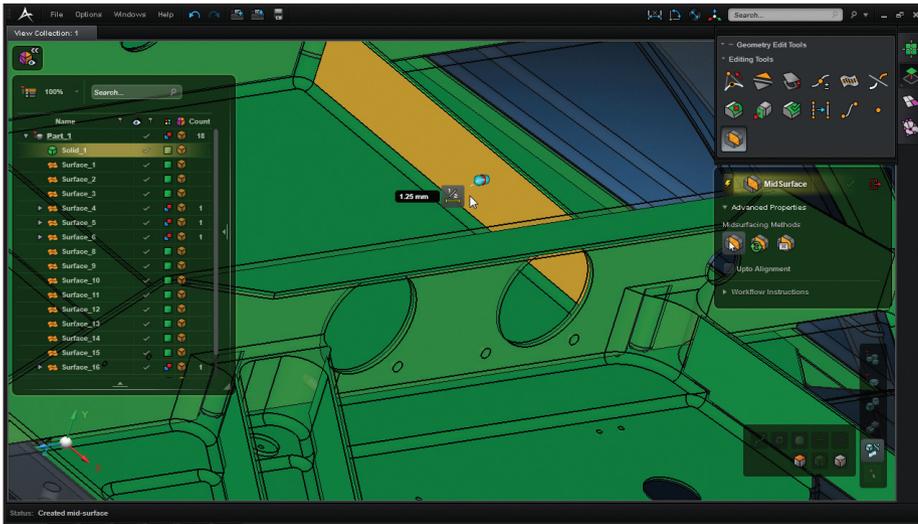


Рис. 3

Этап 2. Интерактивное построение срединных поверхностей.

Часто для выполнения анализа конструкции геометрическую модель, представленную в виде сплошных объемных тел, преобразовывают в поверхностную модель путем создания срединных поверхностей. Практически всегда это достаточно сложный процесс из-за особенностей трехмерной геометрии, поверхностей и их стыков сложной формы. Как следствие, возникают трудности при создании срединных поверхностей на таких участках объемной геометрической модели. При этом традиционных простых инструментов создания срединных поверхностей порой уже недостаточно. Необходим целый комплекс интеллектуальных интерактивных инструментов, способных помочь пользователю в решении задачи построения срединных поверхностей. MSC Apex обладает таким комплексом инструментов (рис. 3).

Инструменты создания срединных поверхностей включают:

- *Auto Offset* – автоматизированное создание срединных поверхностей с индивидуальным выбором позиции поверхности;
- *Constant Thickness* – массовое создание срединных поверхностей на объемных моделях с постоянной толщиной;
- *Distance Offset* – индивидуальное указание величины отступа явным образом;
- *Taper Midsurface Creation* – создание срединной поверхности на объемном ребре переменной толщины;
- *Upto Alignment* – быстрое выравнивание одной поверхности в плоскость другой поверхности;
- *Incremental Midsurface* – интерактивный комплекс инструментов, использующий технологию автоматического отыскания пар граней и создания на них срединных поверхностей, при этом позволяя пользователю вносить коррективы в конфигурацию пар и предоставляя средства визуализации будущей срединной поверхности на этапе подбора параметров работы инструмента (рис. 4).

Этап 3. Исправление поверхностей с помощью прямого редактирования геометрии.

После создания набора срединных поверхностей далеко не все из них удается связать в единое оболочечное пространственное тело, между поверхностями

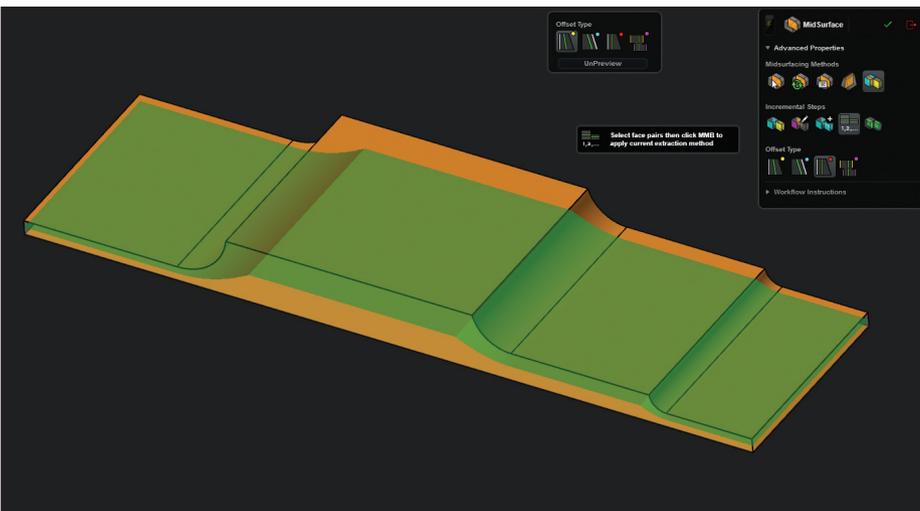


Рис. 4

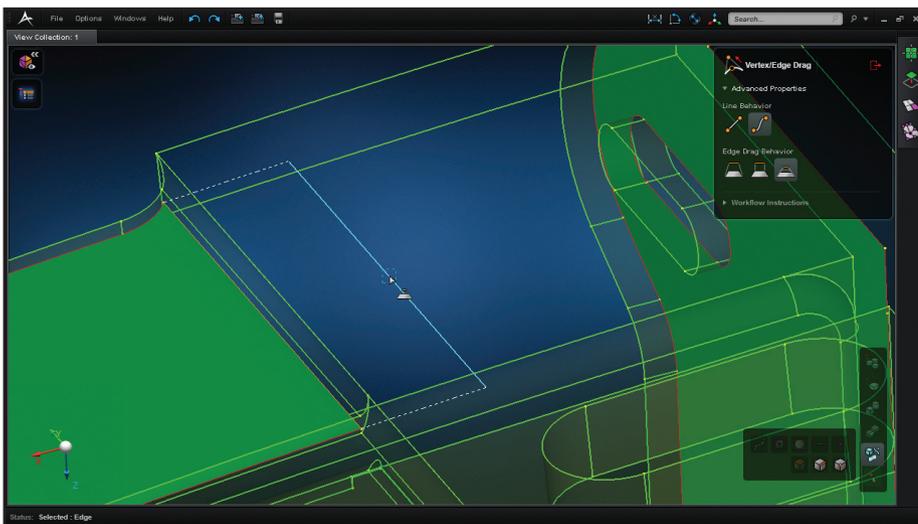


Рис. 5

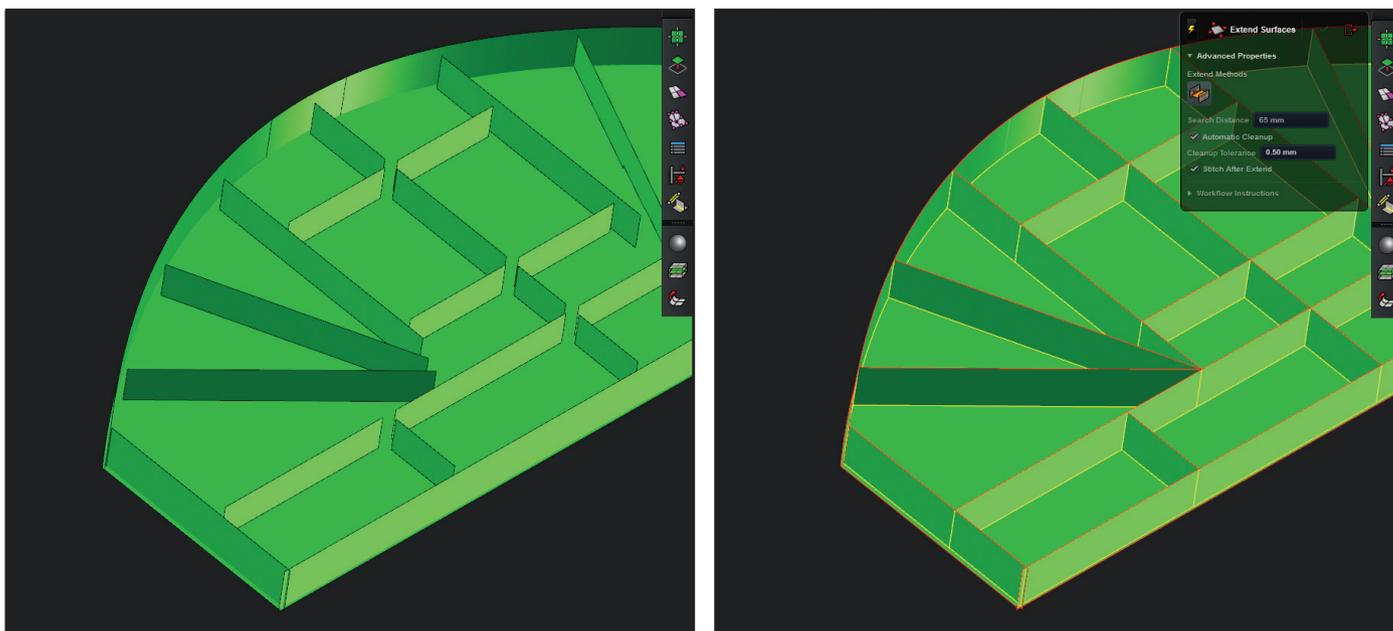


Рис. 6

остаются зазоры. Это следствие работы простых алгоритмов создания срединных поверхностей (инструменты *Incremental Midsurface* фактически лишены такой проблемы, так как создают состыкованную по кромкам гладкую срединную поверхность). На этом этапе применяются средства прямого геометрического редактирования — *Vertex/Edge Drag* (свободное перетаскивание вершин и кромок геометрической модели с возможностью привязки к элементам геометрии), *Extend Surfaces* (инструмент автоматического дотягивания срединных поверхностей до пересечения с прилегающими поверхностями с учетом требований пользователя). Первый инструмент применяется в случае инди-

видуального локального редактирования геометрии — пользователь просто перетаскивает необходимую вершину или кромку на нужное место, геометрическая модель перестраивается автоматически (рис. 5). Второй инструмент больше подходит для массового дотягивания кромок срединных поверхностей до пересечения. Пользователю достаточно ввести лишь один параметр — максимальный зазор, в пределах которого кромки будут стыковаться. Все остальные рутинные операции берет на себя MSC Apex: отыскивает удовлетворяющие критерию кромки, дотягивает их до пересечения с соответствующей поверхностью и осуществляет корректную стыковку поверхностей.

Этап 4. Построение КЭ-сетки и отображение параметров качества сетки.

На этом этапе пользователь создает КЭ-сетку на основе выбранного типа, характерного размера элемента, предварительной разметки (mesh seed) и с учетом особенностей геометрии. Поддерживаются все основные типы КЭ: одномерные, двумерные (как линейные, так и квадратичные), трехмерные (как линейные, так и квадратичные). При этом пользователь может задавать фиксированную плотность сетки на заданных участках, а также, используя инструмент *Feature Mesh Settings*, задавать "правила" генерации КЭ-сетки с учетом распознанных геометрических особенностей модели в локальных зонах. Пользователь имеет возможность предварительно назначать поддиапазоны характерных параметров таких геометрических особенностей, как скругления, фаски, цилиндры, полуцилиндры, отверстия, чтобы при создании сетки MSC Apex учел эти требования и создал сетку вблизи этих особенностей с заданными параметрами. Так, например, можно потребовать от генератора сетки, чтобы вокруг отверстий диаметром от 5 до 7 мм по периметру создавалось 12 конечных элементов правильной формы в два ряда, и при этом на отверстия диаметром от 7 до 12 мм предусмотреть другие правила (рис. 7).

В результате применения такого подхода пользователь может сразу получить КЭ-сетку более высокого качества (особенно в зонах вероятной концентрации напряжений), что позволит существенно сократить время отладки модели.

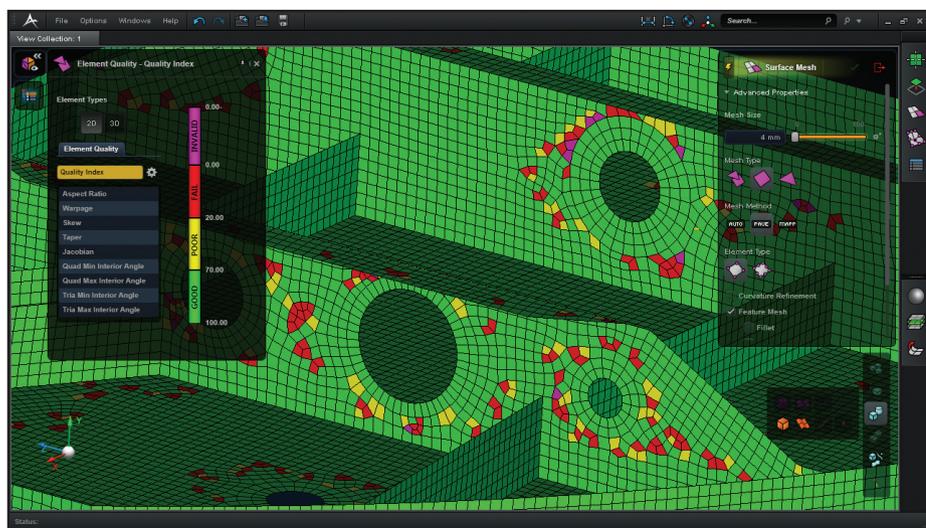


Рис. 7

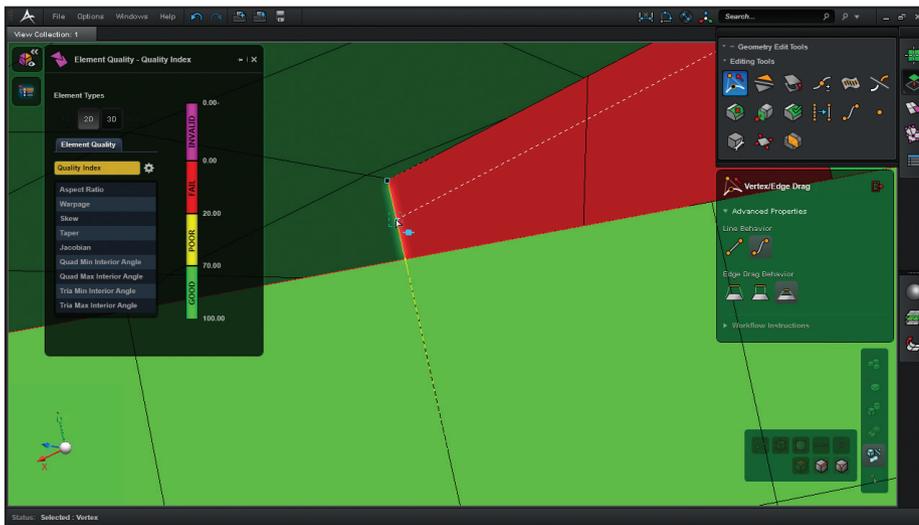


Рис. 8

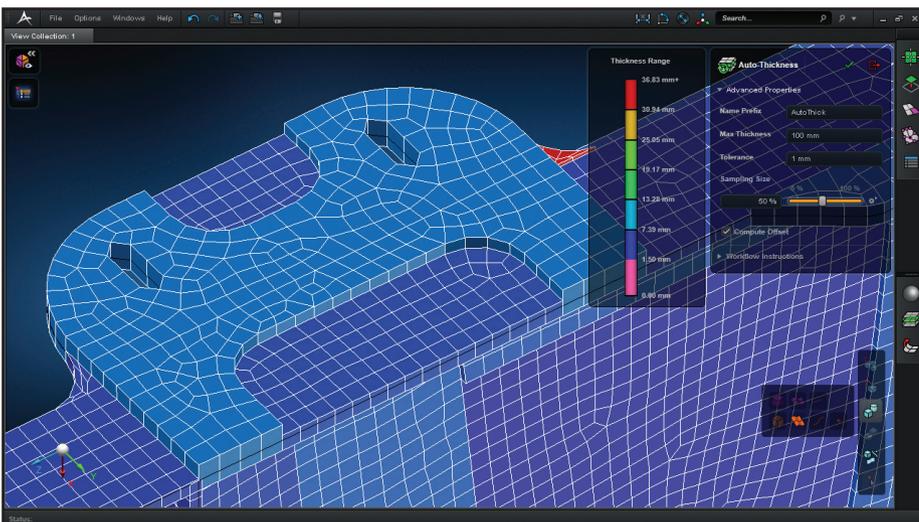


Рис. 9

Этап 5. Завершение построения геометрической модели и генерация КЭ-сетки.

Используя удобные интерактивные инструменты прямого редактирования геометрической модели – *Vertex/Edge Drag* (*Перетаскивание вершин/кромки*), *Filler* (*Заполнение зазоров и вырезов в поверхностях*), *Stitch Surfaces* (*Стыковка поверх-*

*ностей*), *Add/Remove Vertex* (*Добавление/удаление вершин*) для дальнейшего улучшения геометрии, пользователь отлаживает модель, контролируя изменение качества КЭ-сетки после любых внесенных в геометрическую модель изменений. MSC Apex обладает уникальной возможностью синхронного перестроения сетки и одновременно отображения

ее качества при любых вносимых пользователем изменениях в геометрическую модель. Зазоры и вытянутые поверхности могут быть легко удалены из модели, при этом сетка перестраивается автоматически (рис. 8).

Этап 6. Автоматическое назначение толщин и отступов.

После отладки модели и контроля качества созданной КЭ-сетки наступает этап атрибутирования модели, то есть назначения свойств материалов, конечных элементов (толщин, отступов от плоскости узлов для оболочечных элементов). Помимо возможности задавать свойства индивидуально на отдельных фрагментах модели, пользователь может автоматизировать этот процесс, используя инструмент *Auto Thickness* для автоматического задания толщин и отступов оболочечных элементов. При этом MSC Apex автоматически назначает необходимые значения с учетом исходной объемной геометрии (рис. 9). Если участки исходной объемной модели имеют переменную толщину, пользователь может выбрать опцию назначения переменных толщин на соответствующих участках оболочечной модели. При этом толщины на оболочечной сетке назначаются индивидуально для каждого узла и являются переменными для каждого конечного элемента.

На следующем этапе построенная конечно-элементная модель как для отдельных деталей, так и сборки в целом может быть экспортирована в формате входного файла MSC Nastran (\*.bdf). Экспортированная в формат Parasolid отложенная геометрическая модель и входной файл решателя позволяют продолжить работу в традиционной САЕ-среде для завершения постановки задачи.

На данный момент уже существует немало примеров эффективного использования новой САЕ-среды. Производительность труда инженера в некоторых случаях возрастает в пять и более раз по сравнению с применением традиционных САЕ-систем. Один из таких примеров приведен ниже.

На разработку САЕ-модели представленной на рис. 10 конструкции авиационного силового шпангоута (подготовка геометрической модели и генерация КЭ-сетки) с помощью традиционного подхода было затрачено 50 часов. Рассматривались четыре стадии этапа подготовки геометрической модели и построения КЭ-сетки: а) импорт геометрической модели

Таблица 1

	Текущее состояние	Примен. MSC Apex
Требуемый опыт	Высокий	Низкий
Расчетная геометрия	35 ч.	3 ч.
Генерация КЭ-сетки	3 ч.	2 ч.
Назначение свойств	12 ч.	0,5 ч.
Весь сценарий	50 ч.	5,5 ч.

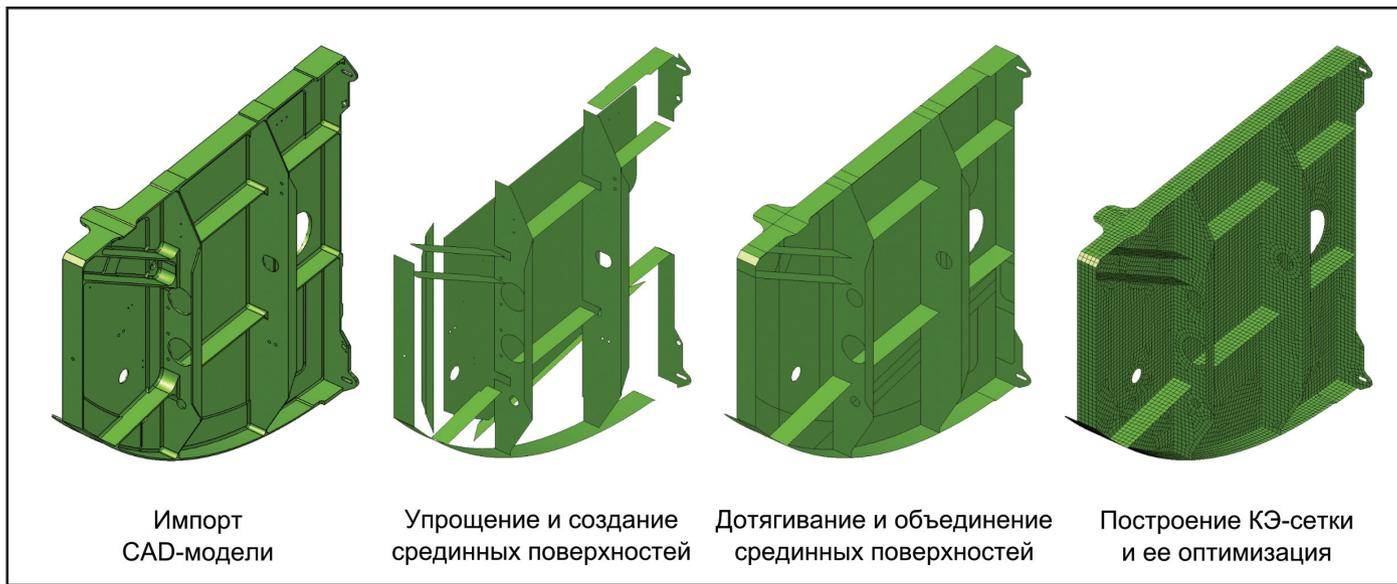


Рис. 10

из CAD-системы, чистка и "лечение" геометрии, то есть выявление проблемных участков модели (длинные вытянутые поверхности, короткие кромки, нестыковки кромок и т.п.) и их устранение; б) упрощение геометрической модели, удаление малых особенностей, ненужных для построения сетки; в) создание срединных поверхностей и их стыковка; г) генерация КЭ-сетки, оптимизация ее качества, назначение толщин и отступов от плоскости узлов. В то же время, данный процесс в MSC Apex Modeler занял всего

5,5 часов и при этом потребовал гораздо меньше усилий для выполнения указанных операций.

### Модуль MSC Apex Structures

Это дополнительный модуль, который расширяет функционал базового модуля MSC Apex Modeler возможностями проведения линейного структурного анализа конструкции и/или анализа ее на собственные частоты и формы.

MSC Apex Structures содержит в себе как современный графический пользова-

тельский интерфейс для задания различных сценариев расчета и обработки результатов, так и интегрированный решатель. Такой подход является уникальным, поскольку сочетает в себе технологию расчетных компонентов и сборок с высокопроизводительной средой моделирования, которая позволяет производить интерактивный и инкрементальный (поэтапный, пошаговый) анализ конструкции (рис. 11).

Интеграция современного пользовательского интерфейса с высокоэффек-

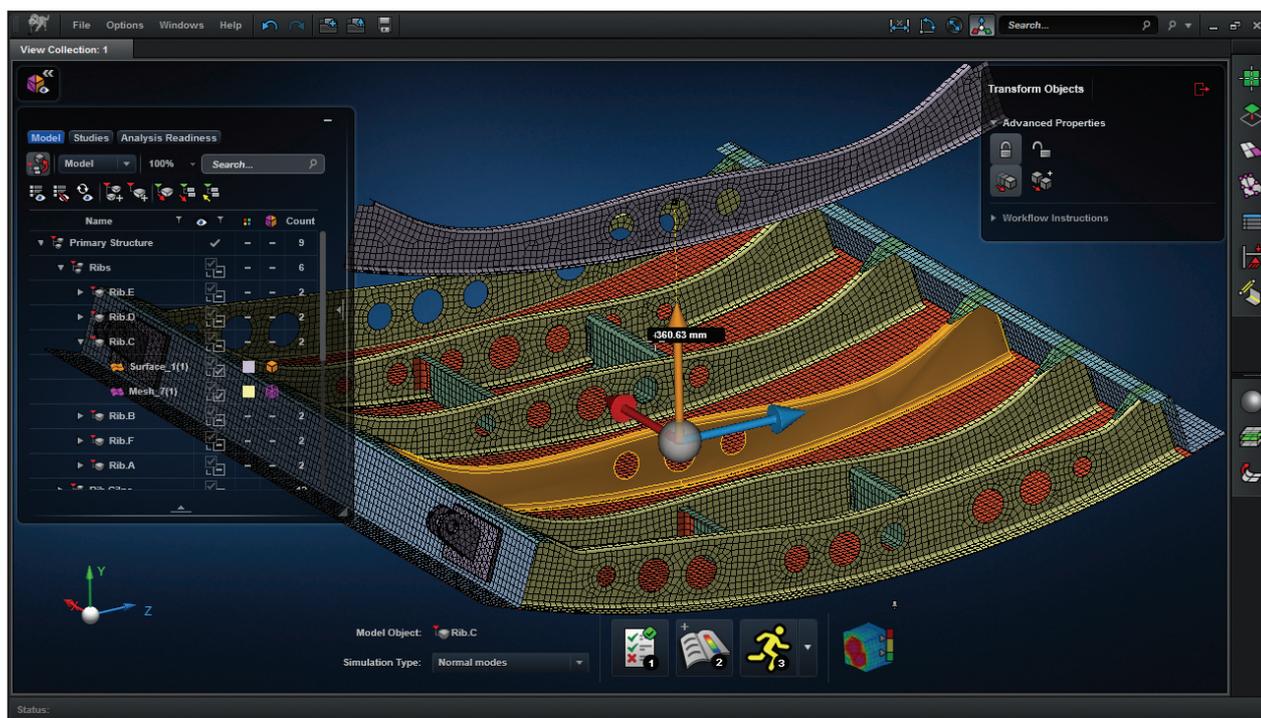


Рис. 11

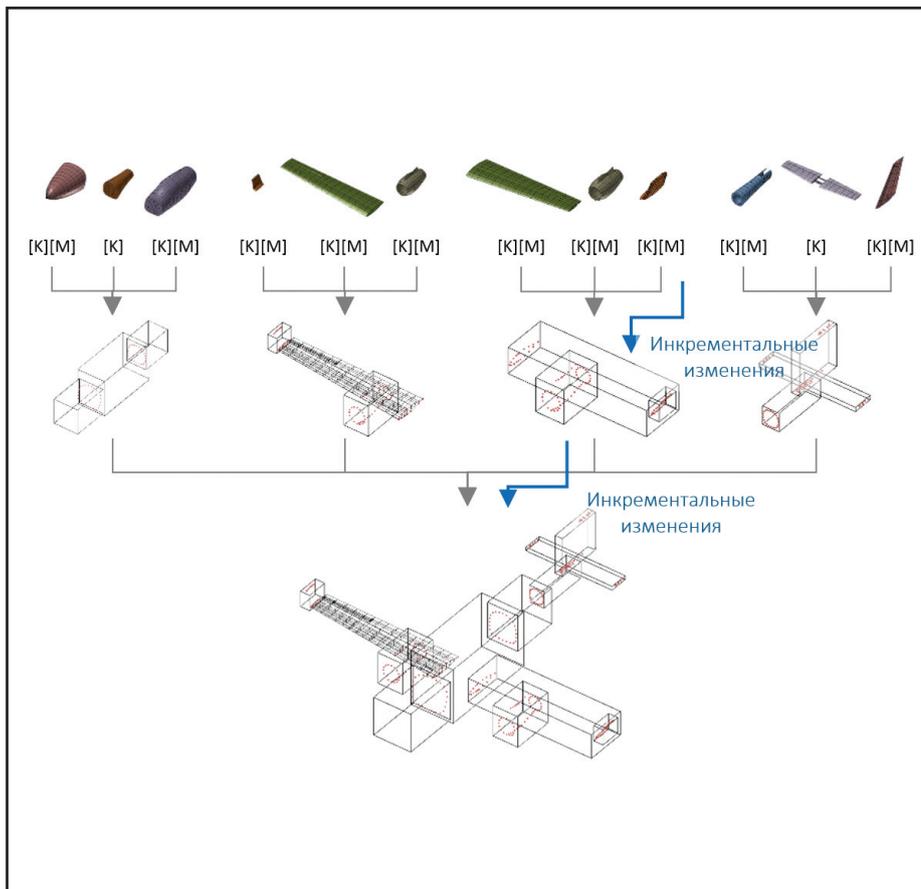


Рис. 12

тивным решателем предоставляет пользователю уникальную возможность проводить интерактивную и инкрементальную валидацию модели, то есть отлаживать любые конфигурации частей изделия на ранних стадиях моделирования и подтверждать, что КЭ-модели готовы к проведению расчета модели всего изделия. По запросу может быть выполнена серия автоматических проверок как на отдельных деталях, так и на всей сборке с автоматической генерацией отчета на панели оценки готовности модели к расчету — *Analysis Readiness*. Реализованный подход с возможностью пошаговой валидации радикально отличается от затратного с точки зрения времени традиционного подхода, где пре-/постпроцессор и решатель разделены.

Необходимо отметить, что с технологией расчетных компонентов и сборок модуль MSC Apex Structures является решением, основанным на реальной структуре изделия, где представление поведения

(жесткость, масса и демпфирование) каждой отдельной детали (компонента структуры изделия) могут быть рассчитаны заранее, храниться и применяться в расчете НЕЗАВИСИМО! (рис. 12). По сути, речь идет о новом уровне использования технологии суперэлементов (или подконструкций) с высоким уровнем

На данный момент уже существует немало примеров эффективного использования новой CAE-среды. Производительность труда инженера в некоторых случаях возрастает в пять и более раз по сравнению с применением традиционных CAE-систем. Один из таких примеров приведен ниже

танты заранее, храниться и применяться в расчете НЕЗАВИСИМО! (рис. 12). По сути, речь идет о новом уровне использования технологии суперэлементов (или подконструкций) с высоким уровнем

нем автоматизации всех рутинных операций формирования и управления суперэлементами. Этот подход особенно эффективен, когда комбинируется с высокопроизводительной средой MSC Apex, где каждый последующий запуск решателя будет пересчитывать только ту часть модели, которая затронута изменениями. Мы называем такой подход "инкрементальным решением". Эта новая архитектура решения особенно эффективна при выполнении множественных вариантных исследований модели.

На следующем этапе пользователь выбирает тип решения задачи и конфигурацию деталей и подборок, которые будут рассчитываться. Все эти данные в совокупности формируют "контекст решения" (Set Analysis Context). На сегодняшний момент доступны два типа решений — линейный статический анализ (static) и анализ на собственные частоты и формы колебаний (normal modes).

Поскольку расчетные компоненты и сборки являются полностью независимыми объектами, пользователь получает возможность проводить экспресс-анализ практически любых конфигураций деталей в сборке, а также предварительный анализ отдельных деталей (инкрементальная поддетальная валидация модели). Это позволяет отладить решаемую сложную задачу за гораздо меньшие сроки, чем при традиционном подходе, когда существует необходимость запуска полной модели на расчет со всеми затратами времени и ресурсов на формирование сборки, ее трансляцию и прочие накладные расходы.

Для реализации технологии расчетных компонентов и сборок в MSC Apex внедрены инструменты создания постоянного клевого соединения между деталями. Пользователю достаточно выбрать детали, которые следует соединить и задать область поиска (tolerance) зоны постоянного клевого контакта. При этом MSC Apex автоматически определяет те зоны сеток на деталях, которые будут связаны. В результате отпадает необходимость в выстраивании совпадающих узлов на КЭ-сетках стыкуемых деталей благодаря использованию технологии независимого от сетки постоянного клевого соединения. Контактные зоны сетки автоматически определяются с учетом толщин деталей (рис. 13).

Технология расчетных компонентов и сборок видится перспективной для

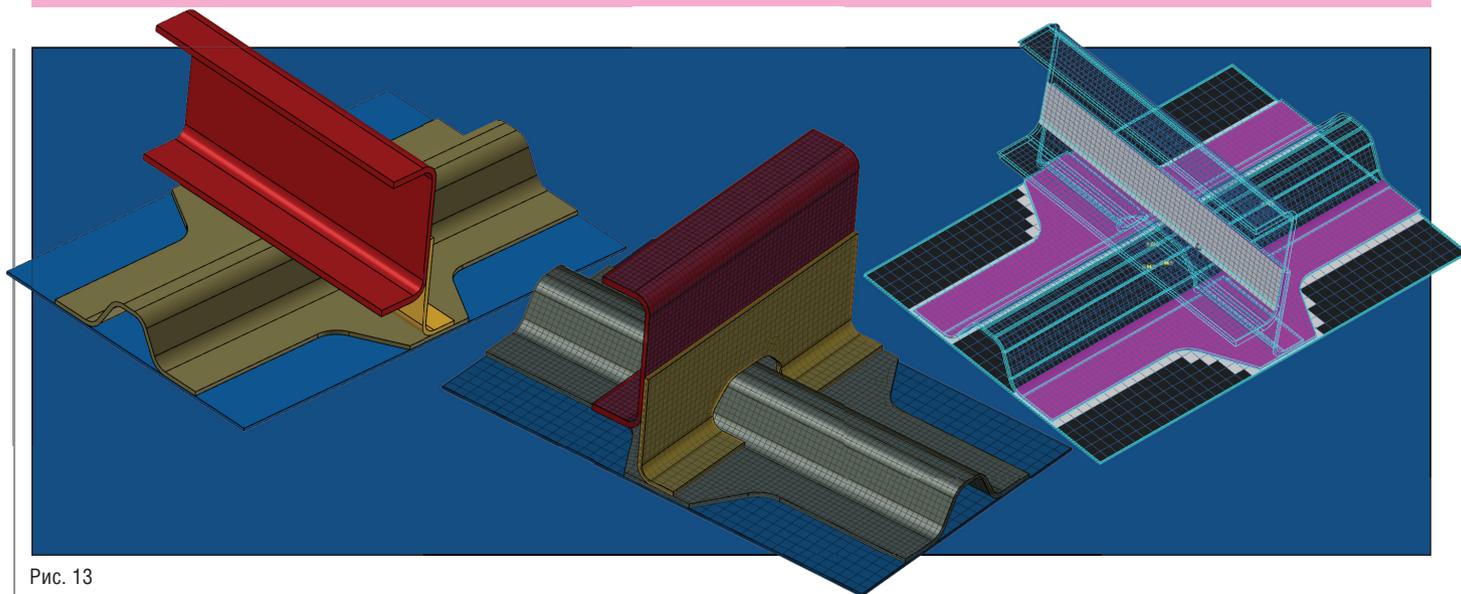


Рис. 13

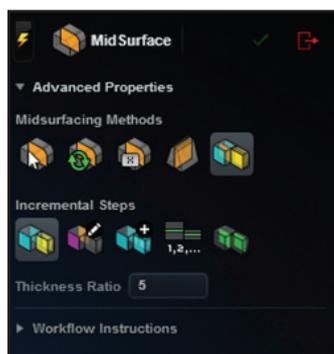


Рис. 14

высокопроизводительной работы пользователя с большими сборками, а также с частыми изменениями, вносимыми в модель. В этом случае достигается наибольший эффект, выражающийся в существенном сокращении затрат времени и усилий пользователя по расчету сложных сборок изделий. Новый подход позволяет проводить данный этап работ в несколько раз быстрее.

**Incremental Midsurface – уникальный комплекс инструментов создания и редактирования срединных поверхностей**

MSC Apex имеет расширенный набор инструментов для создания и редактирования срединных поверхностей. Некоторые из данных средств уникальны и на сегодняшний день не имеют аналогов среди CAE-систем. Этот комплекс инструментов можно разделить на три основных группы по степени интерактивности (то есть непосредственного участия пользователя при формировании срединной поверхности) (рис. 14).

Группа 1 – интерактивный метод. Используются инструменты *Auto Offset* (создание срединной поверхности на грани объемного тела с непосредственным указанием пользователем грани и выбором позиции срединной поверхности относительно базовой грани) в сочетании с инструментами автоматического дотягивания и стыковки срединных поверхностей – *Extend Surfaces* и перемещения вершин и кромок – *Vertex/Edge Drag*.

Группа 2 – полностью автоматизированный метод "в один клик". К этому методу относятся инструменты *Constant Thickness* для создания срединных поверхностей на объемных деталях с заранее известной постоянной толщиной стенок (например, листовые детали, трубопроводы и т.п.), *Distance Offset* – срединная поверхность создается на середине виртуальной толщины, заранее указанной пользователем, причем не зависит от реальной толщины объемного тела. К этой же группе относится инструмент *Taper Midsurface Creation* для создания срединных поверхностей на объемных телах с переменной толщиной стенок. Указанные инструменты работают эффективно на достаточно простых объемных телах. При сложной форме объемных тел или нетривиальной стыковке граней объемных тел эти инструменты уже не позволяют получить высокий уровень автоматизации создания срединных поверхностей.

Группа 3 – полуинтерактивный метод. К данной группе относится уникальный комплексный инструмент *Incremental Midsurface*. По сути, это набор из пяти инструментов в одном.

Первый инструмент – *Extract Pairs* автоматически распознает пары граней объемного тела, между которыми возможно построение срединной поверхности. Каждая распознанная пара граней кодируется своим цветом (рис. 15).

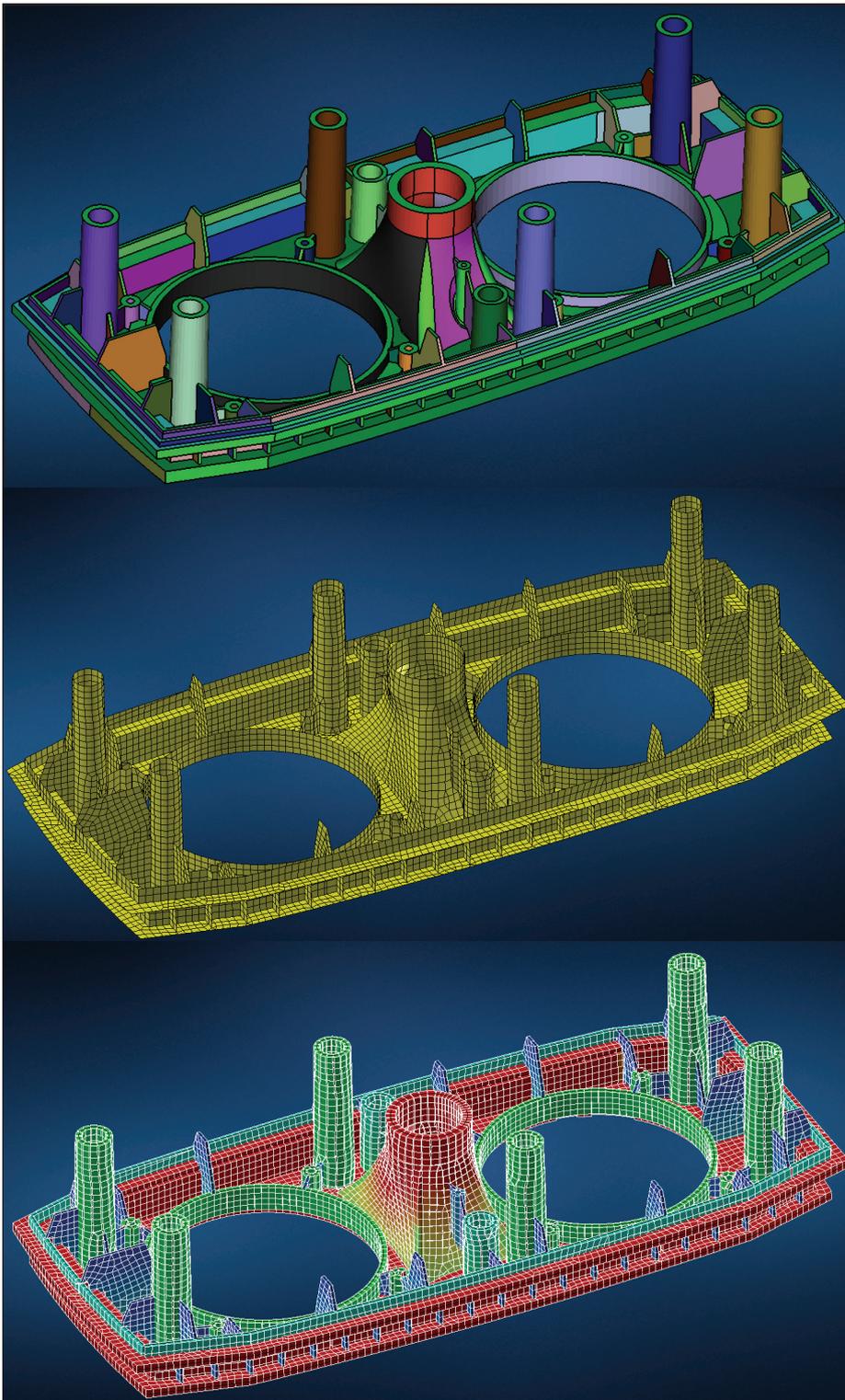
Второй инструмент – *Edit Pairs* позволяет пользователю отредактировать распознанные пары, включить в описание пар дополнительные грани объемного тела или наоборот, выключить.

Третий инструмент *Merge Pairs* позволяет объединить распознанные пары для их дальнейшей совместной обработки и получения сложных состыкованных срединных поверхностей.

Четвертый инструмент – *Define Offset Type* позволяет просмотреть форму будущей срединной поверхности и выбрать один из четырех типов ее выравнивания: левый, правый, эквидистантные отступы с одной из сторон, срединное положение (точно посередине между левой и правой сторонами), а также режим *One Cut* – положение срединной поверхности определяется средневзвешенным положением срединных поверхностей на всех участках пары с несколькими переменными по толщине участками. Пользователь имеет возможность еще до создания срединных поверхностей просмотреть их форму и расположение в пространстве (рис. 16).

Наконец, пятый инструмент – непосредственно создание срединных поверхностей.

Таким образом, набор инструментов *Incremental Midsurface* обладает достаточной степенью автоматизации и предоставляет пользователю возможность влиять на процесс создания срединных поверхностей.



Примененная технология позволяет существенно сократить затраты времени и не требует высокой квалификации пользователя для подготовки готовых к расчету деталей со срединными поверхностями.

Инструменты *Incremental Midsurface* особенно хорошо подходят для тех пользователей, которые занимаются моделированием пластиковых и металлических литейных и композитных деталей, особенно если речь идет о сложных, комплексных деталях.

### Заключение

Рассмотренный новый и активно развивающийся программный продукт MSC Software – MSC Apex обладает целым рядом качеств, которые на данный момент являются уникальными среди подобных CAE-систем. Благодаря целому комплексу высокоэффективных универсальных и интуитивно понятных инструментов, автоматизирующих многие характерные рутинные операции, связанные, в первую очередь, с подготовкой геометрической модели к построению качественной КЭ-сетки и подготовкой расчетной модели, а также новейшим перспективным разработкам и ноу-хау, реализованным в продукте, достигается существенное (в несколько раз!) повышение эффективности труда инженера по сравнению с традиционными CAE-системами, повышается уровень комфорта работы пользователя, снижаются затраты на освоение и повседневную эксплуатацию программного продукта. За счет этого растет эффективность процессов моделирования и анализа на предприятии в целом, что, безусловно, положительно сказывается на сроках проектирования изделий, снижении финансовых затрат предприятия на проектирование.

Более подробную информацию по MSC Apex можно получить на сайтах [www.mscapec.com](http://www.mscapec.com), [www.mscsoftware.com](http://www.mscsoftware.com) или [www.mscsoftware.ru](http://www.mscsoftware.ru), а также в офисе московского представительства MSC Software по адресу: Москва, ул. Зоологическая, д. 26, стр. 2.

Рис. 15

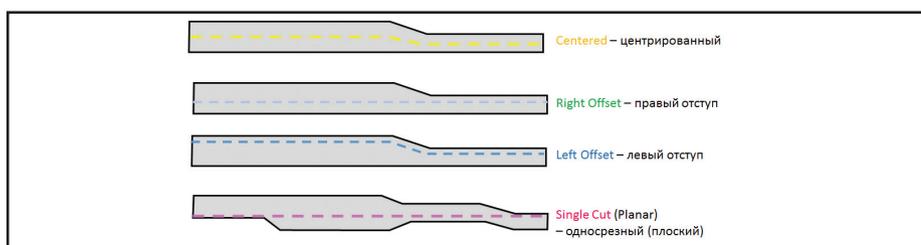


Рис. 16

*Александр Гуменюк,  
старший технический эксперт  
MSC Software RUS  
Тел.: (495) 363-0683  
E-mail: Alexander.Gumenyuk@  
MSCSoftware.com*