

STL — формат для быстрого прототипирования

Часть I. Вывод в формате STL

Al Dean (editor of "Prototype" magazine)

©2005 Cyon Research Corporation

Итак, вы решили освоиться в мире быстрого прототипирования (*Rapid Prototyping* – *RP*). Возможно, ваша организация только что приобрела необходимое оборудование, или же вы ищите сервисную фирму, где можно было бы заказать изготовление ваших прототипов. По какому бы пути вы не пошли, вам придется подготовить STL-файл. В сфере CAD используется множество форматов – как стандартных, так и собственных форматов разных разработчиков, – что ежедневно (если не ежечасно) создает горы проблем при обмене данными. Однако в индустрии быстрого прототипирования безраздельно господствует один единственный формат – STL.

Аббревиатура STL расшифровывается как **STereoLithography** (то есть, объемная литография). Формат STL и его спецификации были созданы компанией **Albert Consulting group**, которая занималась разработкой первого алгоритма послеслойной обработки по заказу компании **3D Systems**. Для всех послеслойных систем необходимо, чтобы 3D-модель была “нарезана” горизонтальными ломтиками, чтобы затем можно было воспроизвести её геометрию в виде физической модели слой за слоем. В 1987 году **3D Systems** совершила поступок, совершенно нехарактерный для большинства технологических компаний – она открыто опубликовала STL-формат (по-видимому, это было сделано для того, чтобы обеспечить его поддержку со стороны CAD-компаний, работающих в области 3D-проектирования). Таким образом, STL быстро стал стандартом для передачи данных в установки прототипирования, большое разнообразие которых мы сегодня наблюдаем.

STL – это “мозаичный” формат, в котором для представления формы цифровой 3D-модели используется последовательность треугольников (*facetов*). Трехмерная геометрия в ведущих 3D CAD-системах описывается поверхностями высокого порядка, а при триангуляции поверхность модели разбивается на маленькие треугольнички. Как вы можете догадаться, каждый фасет описывается четырьмя наборами данных: координаты XYZ каждой из трех вершин и *нормальный вектор*, который описывает ориентацию фасета, указывая, как и в других форматах, направление наружу модели.

Имеются и другие факторы, важные в контексте данной статьи. Так, в спецификации специально оговаривается, что все координаты вершин фасетов в пределах системы должны принадлежать положительному октанту. Говоря простым языком, координаты вершин не могут находиться в пространстве отрицательных значений, и все значения координат X, Y и Z каждого фасета должны быть положительными. Кроме того, каждый фасет должен иметь по две

общие вершины с каждым из соседних фасетов. Это необходимо, чтобы обеспечить создание герметичной модели без щелей и зазоров.

Что касается сохранения данных в STL-файлах, то в официальной спецификации указываются два способа – формат ASCII (в этом случае записывается обычный, достаточно громоздкий текст) и двоичный формат (гораздо более эффективный). Необходимо также отметить, хотя это и выходит за рамки данной статьи, что некоторые производители оборудования вводят собственные расширения STL-формата для передачи информации о цвете. Например, компания **Z Corporation** в своих машинах Z406 и новых установках Z510 использует расширение STL-формата, в котором информация о цвете каждого треугольника сохраняется с помощью цветовой схемы RGB (*Red-Green-Blue*).

Управление выводом данных

Стандарт хорош настолько, насколько хорошо он воплощен. Какая функциональность должна быть у CAD-систем, поддерживающих вывод данных в формате STL? Первое, на что следует обратить внимание – это процесс триангуляции поверхности. Замена точной 3D-поверхности триангулированной полигональной сеткой всегда требует определенной аппроксимации и преобразования данных. Ключевой вопрос здесь – обеспечивается ли необходимая вам точность?

Такой фактор, как *разрешение*, пожалуй, наиболее критичен. Для управления этим показателем имеется несколько ключевых параметров. Сложность заключается в том, что в каждой системе управление этими параметрами производится несколько по-разному (об этом речь ниже). Но, в основном, управлять можно размерами треугольников, а также тем, как система обрабатывает закругления на модели. Например, **Pro/ENGINEER** предлагает два параметра для управления триангуляцией: *Chord Height* и *Angle Control*. Эти параметры, соответственно, задают размеры треугольников как функцию общего размера модели и определяют, каким образом система триангулирует неплоские поверхности (такие как скругления, отверстия и т.д.).

В системе **SolidWorks** пользователю тоже предлагаются две переменные – *Deviation* и *Angle Tolerance*. Они связаны с теми же факторами триангуляции, но используют другой язык и несколько иную систему измерений и связанных величин. В других системах применяется другой набор параметров, которые, в свою очередь, связаны с иными факторами, также оказывающими влияние на качество вывода данных и на функциональные возможности (или ограничения) каждой конкретной системы.

Помимо этого, заслуживает внимания способность системы выводить *STL*-файлы для сборочных моделей. Здесь существуют два способа:

1) весь узел может выводиться в один *STL*-файл, который содержит все выбранные детали в виде отдельных тел или оболочек;

2) система обрабатывает сборочную модель и выводит каждую деталь в отдельный *STL*-файл.

Очень полезным будет инструмент, обеспечивающий предварительный просмотр и визуализацию сетки перед выводом окончательного варианта *STL*-файла. Ясно, что такая возможность очень существенна (особенно, если вы работаете с поставщиком услуг прототипирования), так как сразу выявится, если разрешение оказалось недостаточно высоким для создания точного прототипа вашей модели.

Поддержка вывода *STL* в *CAD*-системах

Мы связались с основными *CAD*-поставщиками, чтобы выяснить, какие возможности для вывода *STL*-файлов существуют в их пакетах в базовой конфигурации и (что, пожалуй, еще более важно) какие инструменты предлагаются для проверки созданных данных. Помимо достаточно простого вопроса, поддерживает ли *CAD*-система вывод в *STL*-формате, мы хотели выяснить, обеспечивается ли вывод не только отдельных деталей, но и сборок.

Кроме того, мы хотели узнать, какие возможности управления процессом имеются у пользователя, какие ему доступны параметры и переменные, позволяющие быть уверенным, что данные, выводимые из *CAD*-системы, являются точным представлением прототипируемого объекта. Наконец, мы интересовались, какие дополнительные инструменты включены в систему, чтобы облегчить процесс быстрого прототипирования. Вся эта информация обобщена в табл. 1.

Autodesk Inventor

Пакеты *Inventor* и *Inventor Professional* поддерживают вывод *STL*-файлов на уровне ядра системы, однако в сравнении с другими системами доступные инструменты выглядят недостаточно гибкими. Возможность предварительного просмотра сетки отсутствует. Выводить можно только отдельные детали, но не сборки. Необходимо затратить усилия для того, чтобы экспортировать всю сборку в *STL*-файл, извлекая детали в сборку по одной, и это невозможно сделать имеющимися в ядре системы *STL*-инструментами. Что касается управления разрешением, то имеются три базовых предварительных установки – *Low*, *Medium* и

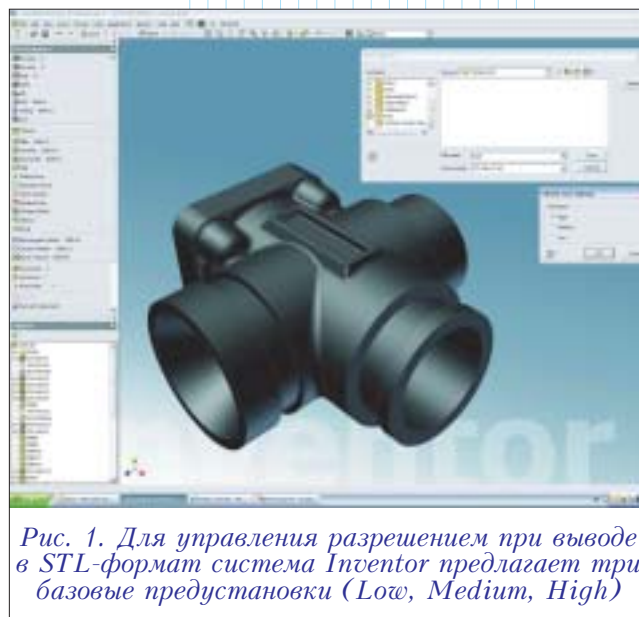


Рис. 1. Для управления разрешением при выводе в *STL*-формат система *Inventor* предлагает три базовые предустановки (*Low*, *Medium*, *High*)

Табл. 1. Поддержка *STL* в разных *CAD*-системах

Система	Поставщик	Версия	Вывод детали в формате <i>STL</i>	Вывод сборки в один <i>STL</i> -файл	Вывод сборки по деталям	Пред-просмотр
<i>Inventor Pro</i>	<i>Autodesk</i>	9	есть	нет	нет	нет
<i>CATIA V5</i>	<i>Dassault Systèmes</i>	<i>V5R14</i>	есть	есть	есть	есть
<i>I-deas</i>	<i>UGS</i>	–	есть	нет	нет	есть
<i>NX</i>	<i>UGS</i>	3	есть	есть	нет	есть
<i>Pro/ENGINEER</i>	<i>PTC</i>	<i>Wildfire 2</i>	есть	есть	есть*	есть
<i>Solid Edge</i>	<i>UGS</i>	<i>V16</i>	есть	есть	есть*	нет
<i>SolidWorks</i>	<i>SolidWorks (Dassault Systèmes)</i>	2005	есть	есть	есть	есть
<i>Rhino</i>	<i>McNeel & Associates</i>	<i>R3</i>	есть	н/д	н/д	есть
<i>StudioTools</i>	<i>Alias</i>	<i>R12</i>	есть	н/д	н/д	есть

(*) используется специальная функция либо написанная на *Visual Basic* программа

High (рис. 1), однако их изменение связано с существенными трудностями. Для того, чтобы это сделать, необходимо редактировать регистр операционной системы *Windows*. Более подробную информацию можно найти на сайте www.autodesk.com.

CATIA V5

На уровне ядра системы *CATIA V5* предлагает базовый *STL*-вывод только в формате *ASCII*. Имеется возможность вывести файлы отдельных деталей, а также поддерживаются оба режима вывода сборок (как в виде отдельных файлов деталей, так и в виде одного файла со множеством тел). Система не использует предварительно установленные параметры, но у пользователей есть возможность управления двумя ключевыми величинами: *Sag Value* (задает высоту хорды и она может быть установлена даже менее 0.10 микрона) и *Step* (задает максимальную длину грани треугольника).

Кроме того, в системе *CATIA V5* есть два связанных с *STL* модуля – *TL1* и *STL*. По существу, *TL1* предлагает возможность вывода в двоичном *STL*-формате и содержит некоторые возможности редактирования сетки. Модуль *STL* – более высокого уровня, в нем добавлены более продвинутые инструменты для ремонта и оптимизации сетки. Этот модуль включает инструменты для проверки качества сетки, которые отображают и “очищают” сетку – автоматически удаляют искаженные и дублированные треугольники, изолированные треугольники и т.д. Есть также модуль для автоматического заполнения дыр в сетке, инструменты регенерации сетки (генератор высококачественной *3D*-сетки для деталей сложной формы), инструменты сглаживания. Имеются такие функции, как разделение сетки на части (*splitting*), обрезка (*trimming*), соединение отдельных частей сетки (*merging*), эквидистантное перемещение (*offsetting*) и прореживание (*decimation*) сетки. Специальная функция под названием *Flip Edge* дает возможность

изменять стыковку вершин треугольников для улучшения качества формы, особенно на острых ребрах и скруглениях (рис. 2).

Конечно, в уме при этом неизбежно всплывает вопрос – сколько же придется заплатить за этот дополнительный функционал? Как мы уже сказали, вывод в кодах *ASCII* включен в ядро системы. Следующий уровень – модуль *TL1*. Он доступен уже для платформы *P1* (то есть, для всех пользователей *V5*) и стоит 3 500 долл. Чтобы иметь *STL*-инструмент более высокого уровня, вы должны быть пользователем платформы *P2* или *P3*, а сам модуль обойдется в 7 000 долл. Ни один из этих модулей не входит в какую-либо конфигурацию *CATIA* (которые *Dassault* и *IBM* называют группами модулей или *бандлами*) – оба продукта представляют из себя расширения системы (*add-ons*). Более подробную информацию можно найти на сайте www.3ds.com.

NX

Пакет *NX* компании *UGS* поддерживает вывод *STL* на уровне ядра системы и эта функция доступна без дополнительной оплаты во всех конфигурациях пакета (рис. 3). Говоря о возможностях, надо отметить, что система позволяет выводить файлы деталей, а также выбранные поверхности (хотя применимость этого в быстром прототипировании ограничена).

Что касается сборок, то *NX* позволяет экспортировать их в виде единой модели, в которой каждая деталь представлена как отдельный объем. Для управления пользователю не предлагается набор каких-либо предварительных установок, как это делается во многих других системах, так как можно полностью управлять процессом. Базовая переменная *Triangle Tolerance* определяет, насколько точно треугольники аппроксимируют грани поверхностей. Имеется возможность просмотра треугольников, созданных для выводе файла в *STL*-формате. Команда *Local Coordinate System*

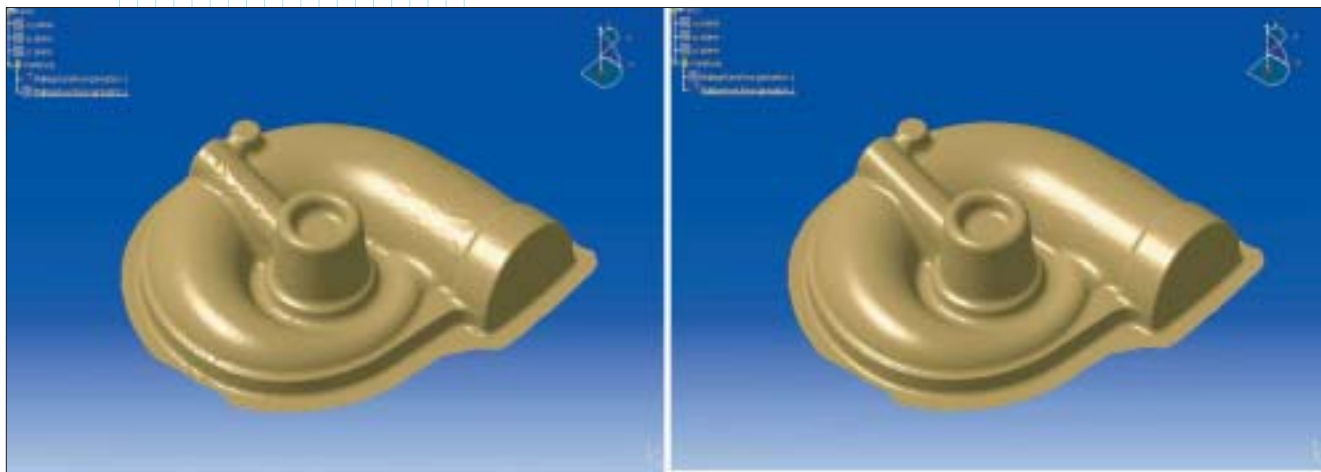


Рис. 2. Так работает функция *Flip Edge*, входящая в специализированный модуль *STL* пакета *CATIA*. Слева изображена *STL*-сетка до использования *Flip Edges* (острые грани и скругления воспроизводятся плохо). Справа показан результат работы функции – благодаря высококачественной сетке форма воспроизведена гораздо лучше

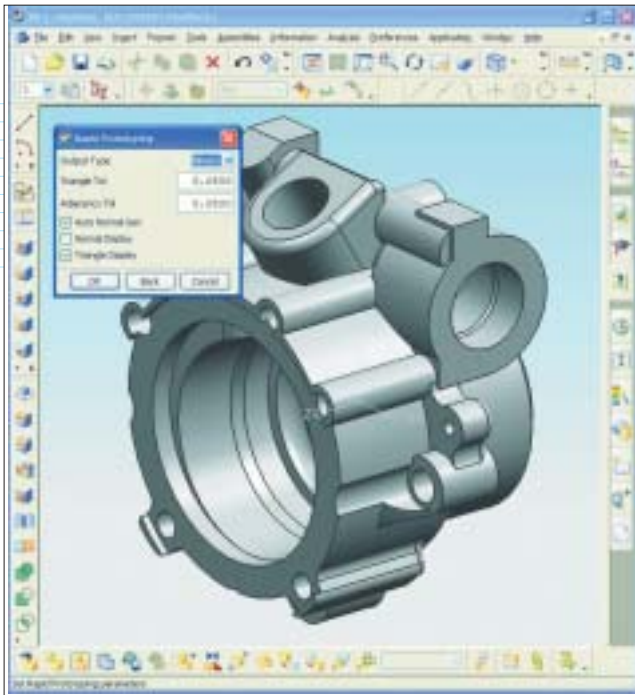


Рис. 3. Пакет NX позволяет выводить STL-файлы деталей и выбранные поверхности, а также экспортировать сборки в виде единой модели, где каждая деталь рассматривается как отдельный объем

позволяет убедиться, что после автоматического размещения все элементы находятся в области положительных чисел.

Другие параметры связаны с экспортом поверхностных моделей. Первым делом надо упомянуть параметр *Adjacency Tolerance*, позволяющий задавать точность сопряжения поверхностей. Когда вычисляемое расстояние между границами двух поверхностей меньше заданной величины *Adjacency Tolerance*, то две границы рассматриваются как совпадающие, а две поверхности – сопряженными по этой границе. Помимо этого, имеются инструменты, с помощью которых можно убедиться, что все нормали в STL-файле ориентированы правильно. Более подробную информацию можно найти на сайте www.ugs.com.

I-deas

Пакет *I-deas* компании *UGS* поддерживает вывод STL-файлов в базовой конфигурации, но только для отдельных деталей. Перед выводом обеспечивается просмотр сетки в графическом виде, однако какие-либо предварительные установки отсутствуют. Управлять можно параметром *Facet Deviation*, который определяет максимальное расстояние от поверхности до лицевой плоскости фасета, аппроксимирующего эту поверхность. Значения параметра можно выбрать из набора предварительно заданных параметров в зависимости от размеров прототипирующей машины (рис. 4). Более подробную информацию можно найти на сайте www.ugs.com.

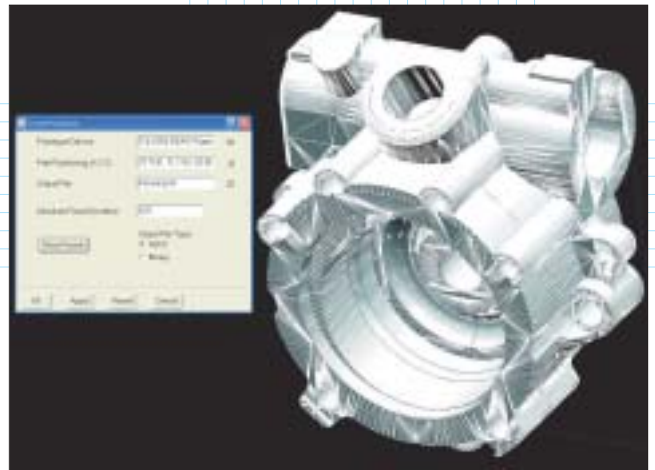


Рис. 4. В базовой конфигурации I-deas поддерживает STL-вывод для отдельных деталей

Pro/ENGINEER Wildfire 2

Вывод STL-файлов в пакете *Pro/ENGINEER* компании *PTC* является стандартным для всего ряда конфигураций и модулей. Возможен экспорт как отдельных деталей, так и сборок (рис. 5). Что касается набора переменных и управления, то пользователи могут управлять выбором связанной с деталью системы координат, выбрать вид STL-файла (*ASCII* или *Binary*), а также разрешить или запретить использование отрицательных значений (это относится к требованию, чтобы все детали были расположены в октанте положительных значений координат).

Для управления разрешением предназначены два параметра (имеющие значения по умолчанию): *Chord Height* и *Angle Control*. При триангуляции поверхности модели *Chord Height* действует как глобальная переменная. Она устанавливает максимальное расстояние между хордой и поверхностью. Чем меньше выбранное значение высоты хорды, тем меньше отклонение от фактически существующей поверхности детали. Параметр *Angle Control* управляет дополнительной триангуляцией вдоль

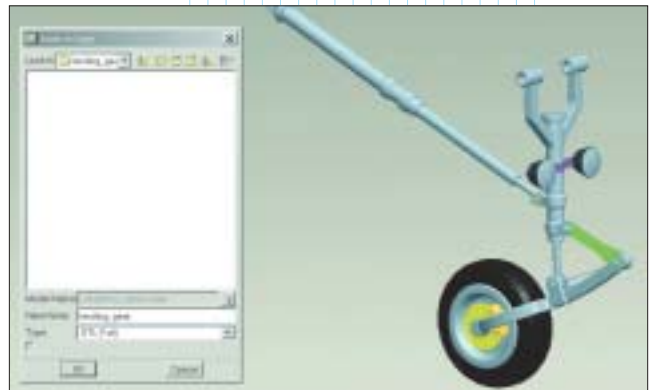


Рис. 5. Вывод STL-файлов в Pro/E является стандартным для всего ряда конфигураций и модулей, обеспечивая возможности экспорта как отдельных деталей, так и сборок

поверхностей с малыми радиусами – чем меньше значения радиусов, тем большее число треугольников используется при аппроксимации. *Pro/ENGINEER* обеспечивает возможность предварительного просмотра при разбиении поверхности на треугольники, что позволяет подобрать наилучшие значения параметров для достижения необходимого результата.

При выводе сборок параметры остаются теми же, однако работа будет несколько отличаться от работы с отдельной деталью. Во-первых, сборку в *STL*-формат можно вывести как составное тело в одном *STL*-файле. При этом пользователь может указать, какие детали сборки выводятся (часть деталей можно исключить из сборки). Для вывода деталей сборки в виде отдельных *STL*-файлов используется функция *Pro/Batch*, входящая в базовую конфигурацию пакета. Она позволяет выводить целые каталоги деталей и сборок вместо того, чтобы обрабатывать каждый объект отдельно. Этот инструмент позволяет также задать качество вывода для каждого объекта, что может быть полезным для изделий с различными по размерам деталями (что часто встречается в медицинских и электронных устройствах). Более подробную информацию можно найти на сайте www.ptc.com.

Solid Edge V16

Пакет *Solid Edge* компании *UGS* обеспечивает поддержку вывода *STL*-данных на уровне ядра системы, и эта возможность доступна в различных конфигурациях пакета. Модели в формате *STL* могут быть сгенерированы как для деталей, так и для сборок, однако сборку можно вывести только в виде общего *STL*-файла, в котором представлены все входящие в нее детали (рис. 6). По словам представителей *UGS*, из сборки можно сгенерировать и отдельные *STL*-файлы, но для этого необходимо использовать открытый интерфейс программирова-

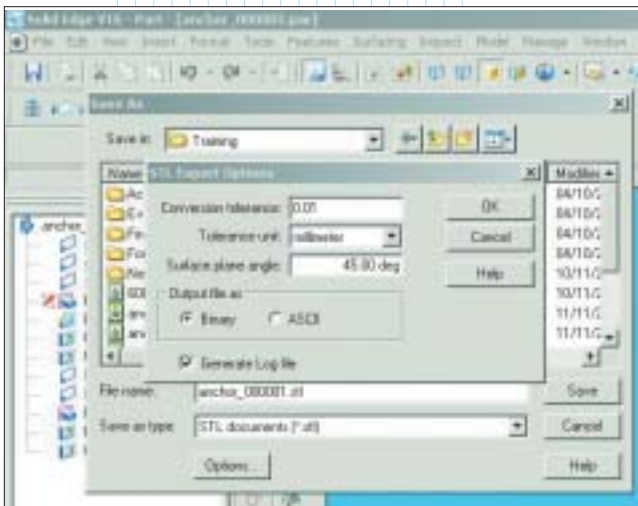


Рис. 6. Пакет *Solid Edge* позволяет генерировать модели в формате *STL* как для деталей, так и для сборок, однако сборку можно вывести только в виде общего *STL*-файла, в котором представлены все входящие в нее детали

ния приложений (*API*) и скрипты, написанные на *Visual Basic*. Пакет *Solid Edge* не предоставляет возможностей визуализации или предварительного просмотра сетки перед её экспортом.

Инструменты для *STL*-вывода имеют следующие опции. Параметр *Conversion Tolerance* ограничивает расстояние между поверхностью модели и аппроксимирующими её фасетами (рис. 6). Его значение вводится с клавиатуры и является важным фактором, определяющим глобальную точность, с которой *CAD*-геометрия представлена после триангуляции в виде *STL*-файла. К другим параметрам относятся *Tolerance Unit*, который задает единицы изменения для *Conversion Tolerance*, а также *Surface Plane Angle*, значение которого определяет допустимое отклонение между поверхностью и аппроксимирующими её фасетами. Файл *STL* можно вывести в *ASCII* или в двоичном формате. При работе система генерирует протокол, содержащий предупреждения и информацию о файлах, вовлеченных в процесс. Более подробную информацию можно найти на сайте www.ugs.com.

SolidWorks 2005

Пакет *SolidWorks* компании *Dassault Systèmes* во всех своих конфигурациях поддерживает *STL*-вывод и для деталей, и для сборок. При этом вся сборка может быть выведена в один *STL*-файл или каждая деталь в свой файл. Обеспечивается предварительный просмотр сетки (если эта установка включена) с двумя вариантами качества отображения, которые задаются двумя заранее заданными величинами: “грубо” (*Coarse*) и “точно” (*Fine*). Можно также изменять значения отклонения (*Deviation*) и углового допуска (*Angle Tolerance*), которые, соответственно, управляют тем, как система производит триангуляцию детали в целом и её отдельных элементов малого размера.

Кроме того, пользователь может задавать единицы измерения и выбирать между выводом файла в двоичном формате или в *ASCII*. Интересно, что при работе со сборками *SolidWorks* предлагает такую опцию, как проверка на соприкосновение или пересечение тел. Система также позволяет управлять ориентацией систем координат, автоматически переводя (или передвигая) детали в пространство положительных значений координат.

Наконец, компания *SolidWorks* предлагает *Print3D* – это *web*-портал, на котором пользователи могут контактировать с компаниями, предлагающими услуги быстрого прототипирования и изготовления деталей. Здесь можно разместить запросы на получение расценок и даже сделать заказ. Более подробную информацию можно найти на сайте www.solidworks.com.

StudioTools

В пакете *StudioTools* компании *Alias* вывод *STL*-файлов поддерживается на уровне ядра (как в двоичном виде, так и формате *ASCII*) и не требует каких-либо дополнительных затрат. Поскольку *StudioTools* является системой поверхностного

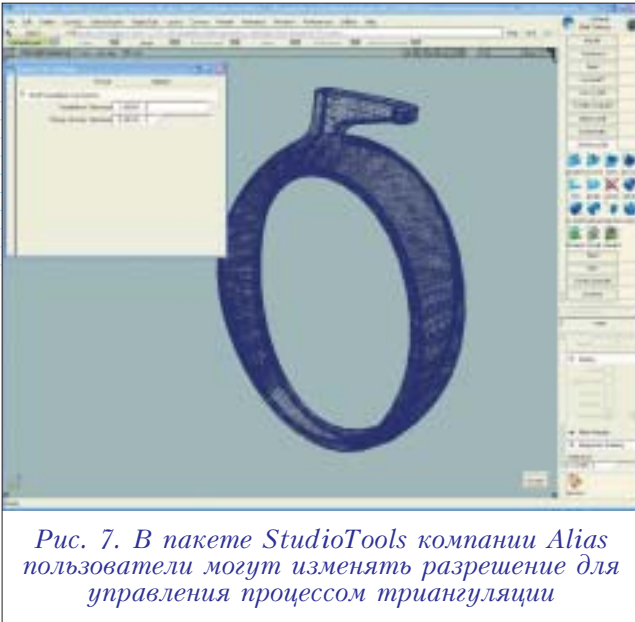


Рис. 7. В пакете StudioTools компании Alias пользователи могут изменять разрешение для управления процессом триангуляции

моделирования, то разделение на детали и сборки не используется. Компания *Alias* утверждает, что *StudioTools* не работает напрямую с деталями, но может работать с несколькими моделями в одном файле. При этом система может экспортировать любые отдельные модели, которые “сшиваются” вместе.

Что касается опций, то управлять процессом можно с помощью нескольких изменяемых по желанию пользователя параметров. Это предпочтительнее, чем пользоваться предустановленными значениями. Основной переменной является *Resolution*, числовое значение которой необходимо ввести – она используется для управления процессом триангуляции (рис. 7). Мгновенная обратная связь (в виде предварительного просмотра сетки перед её выводом) позволяет убедиться, что программа генерирует удовлетворительную сетку. В процессе триангуляции можно дополнительно управлять точностью, определяющей максимальное расстояние между сеткой и поверхностью, а также точностью стыковки вершин треугольников.

Кроме того, пользователи продвинутых конфигураций *StudioTools* (*Studio*, *Surface Studio* и *AutoStudio*) могут применять программу *Spider* компании *Alias*, которая обеспечивает несколько способов ремонта *STL*-моделей, имеющих прорехи. Выбор установки *Coarse* вызовет заполнение дыры минимальным числом многоугольников. Опция *Taut* позволяет закрыть любое найденное отверстие плоской “крышкой” из многоугольников. И, наконец, опция *Faired* служит для того, чтобы заделать прореху триангулированной поверхностью, которая плавно продолжает форму поверхностей вокруг отверстия. Более подробную информацию можно найти на сайте www.alias.com.

Rhino 3

Пакет *Rhino* компании *McNeel* поддерживает широкий спектр функций *STL*-вывода. Однако же,



Рис. 8. Поскольку Rhino является системой поверхностного моделирования, потенциальная вероятность появления ошибок при выводе в STL-файл достаточно высока. Однако, это нейтрализуется широким набором управляемых пользователем параметров вывода

поскольку это преимущественно система поверхностного моделирования, вероятно, нет смысла говорить о деталях и сборках. Таким образом, вопрос о выводе сборок в данном случае будет неуместен.

Что касается управления, то *Rhino* выделяется гибкостью и широкими возможностями пользовательских настроек – в основном, благодаря тому, что это система поверхностного моделирования. Пользователь может управлять выводом просто перемещая ползунок-регулятор. Помимо этого, можно управлять и всеми переменными, влияющими на *STL*-сетку. В их число входят параметры треугольников (углы, соотношения сторон, длина ребер), средства управления трансляцией зубчатых граней и наложением текстур на поверхности (рис. 8).

В отличие от других рассмотренных систем, *Rhino* обеспечивает поддержку данных для быстрого прототипирования и вне рамок стандарта *STL*. Так, можно выводить *STL*-файлы с информацией о цвете, а также данные в послыном формате *SLC* (**SLiCe**). Кроме того, есть возможность непосредственно передавать данные в программное обеспечение следующих *RP*-машин: *InVision* (3D Systems), *DeskProto* (Delft Spline Systems), *Catalyst* (Dimension), *Studio* (Objet), *Modela Player* (Roland), *ModelWorks* (Solidscape), *Insight* (Stratasys) и *ZPrint* (Z Corporation). Более подробную информацию можно найти на сайте www.mcneel.com.

В следующей части статьи мы рассмотрим некоторые типичные ошибки, встречающиеся в *STL*-файлах, реальный опыт использования *STL*-файлов, созданных в разных *CAD*-системах, а также поговорим о том, что ожидает *STL* в будущем. ☞

(Продолжение следует)