

STL — формат для быстрого прототипирования

Часть II. Реальный опыт вывода STL-файлов

(Окончание. Начало в #5/2005)

Al Dean (editor of 'Prototype' magazine)

©2005 Cyon Research Corporation

В первой части статьи рассматривались факторы, влияющие на качество получаемой *RP*-модели (*RP* – *Rapid Prototyping*) при выводе *STL*-файлов, а также параметры, которые позволяют пользователям управлять их созданием в различных *CAD*-системах. Во второй части мы обратимся к типичным ошибкам, которые встречаются в *STL*-данных, а также к реальному опыту работы с этими данными.

Типичные ошибки

Существует несколько типичных ошибок, которые появляются при экспорте в формат *STL*. Первая из них связана с полигонально-сеточной природой самого формата, из-за которой *STL*-файлы всегда являются *аппроксимацией* полной *3D*-модели. Вопрос состоит только в том, насколько точно вы хотите аппроксимировать форму вашей детали. По существу, при уменьшении размеров треугольников накладываемой сетки (где это необходимо) увеличивается разрешение, а значит и точность, с которой цифровая *3D*-модель представлена в *STL*-файле. Проблемы, связанные с выбором оптимального разрешения, особенно существенны для неплоской геометрии, поскольку сложная поверхность, точно определяемая полученными в *CAD*-системе данными, заменяется аппроксимирующей поверхностью, состоящей из треугольников (*фасетов*).

Если аппроксимация компьютерной *3D*-модели будет достаточно грубой, то на *RP*-модели вы

увидите фасеты, из которых состоит сетка. Эти фасеты удаляются на стадии финальной доработки, однако при этом можно потерять и мелкие элементы детали, или даже материал, который удалять нельзя. Особенно это критично, когда *SLA*-установки (*SLA* – *Stereolithography Apparatus*) или аналогичное оборудование используются при серийном производстве деталей методом вакуумного или терморективного литья (более подробную информацию о технологиях быстрого прототипирования см. в *Observer* ##2,4/2003, #2/2004. – *Прим. ред.*). Если вы работаете с поставщиком *RP*-услуг, это также означает, что за доработку придется платить дополнительно.

Конечно, есть и обратная сторона медали. Если уменьшать размеры треугольников, то для аппроксимации той же геометрии понадобится больше треугольников, что приведет к увеличению размера файла (рис. 9). Например, когда в пакете *Autodesk Inventor* мы изменили установку разрешения с *Medium* на *High*, то при выводе той же *CAD*-модели в формате *STL* размер файла утроился. Однако при современных высокоскоростных средствах коммуникации передача большого объема *STL*-данных не является проблемой. Даже если файл окажется слишком велик для передачи через *FTP*-сервер или пересылки по *e-mail*, его можно записать на *CD*.

Что еще, кроме неправильного выбора разрешения при выводе *STL*-файла, может оказать

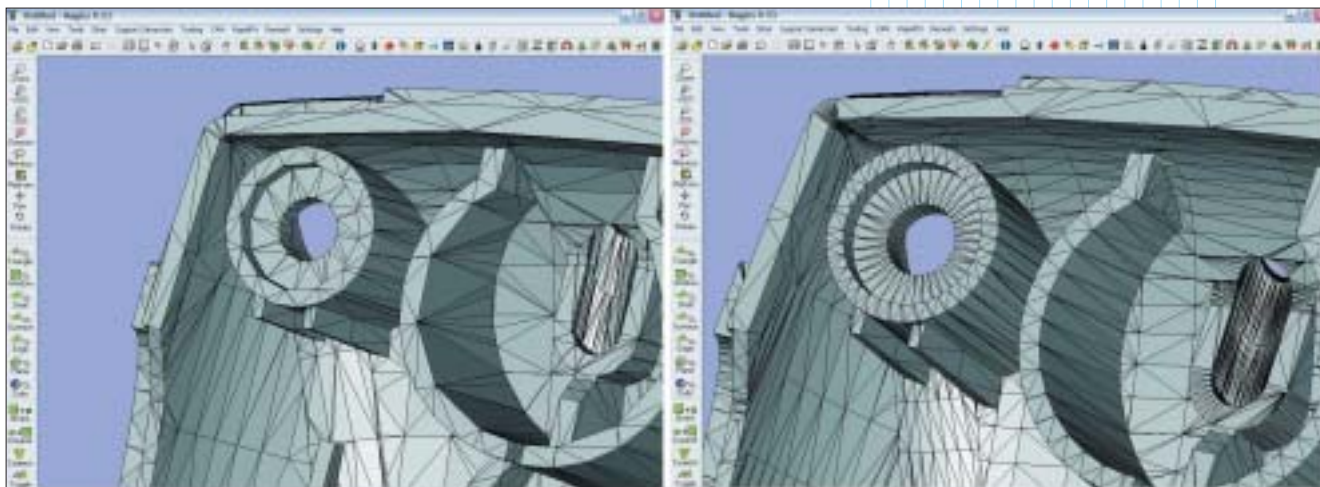


Рис. 9. С помощью программы *Magics* компании *Materialise* можно наглядно увидеть, как неправильный выбор разрешения при экспорте в *STL*-файл влияет на детальность представления *CAD*-модели. На левом скриншоте показан элемент конструкции, экспортированный из *SolidWorks* с установкой “грубо” (*Coarse*), на правом – с установкой “точно” (*Fine*)

неблагоприятное влияние на форму получаемой в итоге *RP*-модели? Множество факторов.

Не будем закрывать глаза на недостатки *RP*-машин, но множества общих проблем можно избежать, если немного глубже понять, каким образом влияют на процесс прототипирования параметры той или иной системы. Например, поскольку *STL* является мозаичным форматом и для получения *STL*-файла практически из любой *CAD*-системы требуется какая-то конвертация данных, всегда существует потенциальный источник ошибок.

Для большинства *аддитивных RP*-технологий (когда материал добавляется, а не удаляется, как при фрезеровании на станке с ЧПУ) требуется, чтобы модель была “герметичной”, а её форма была совершенно однозначно определена не только снаружи, но и внутри. То есть, должно быть абсолютно четко понятно, где материал осаждается, а где – нет.

Любая ошибка в *STL*-файле может привести к нарушению процесса построения *RP*-модели. В качестве примера можно назвать следующие типичные проблемы:

✓ Часть треугольников в *STL*-файле имеет неправильные направления нормалей. Как это ни тривиально, но в этом случае программное обеспечение, отвечающее за генерацию управляющих данных о форме каждого слоя для *RP*-машины, будет добавлять материал вне объема *RP*-модели, а не внутри. Это приведет к браку и потере материала.

✓ Неверная стыковка треугольников сетки. Если грани фасетов неправильно стыкуются с соседями, это повлечет ошибки при воспроизведении отдельных ребер или даже всего контура. Результатом будут ошибки при построении *RP*-модели (что потребует её последующей доработки) или же, в отдельных случаях, нарушение процесса послойного синтеза.

Обзор возможностей вывода *STL*-файлов в *CAD*-системах

Вам, вероятно, хотелось бы, чтобы уже в базовой конфигурации *CAD*-системы поддерживались функции предварительного просмотра аппроксимирующей сетки и точной настройки параметров, влияющих на достижение необходимого результата. Иными словами, требуется возможность задать оптимальную точность модели, обеспечивающую баланс между частотой сетки и размером экспортируемого *STL*-файла.

Не все *CAD*-системы предоставляют такую возможность. Самой слабой из всех рассмотренных систем в этом смысле является, пожалуй, *Autodesk Inventor*. Функция предварительного просмотра сетки отсутствует, а для установки разрешения имеются три заранее определенные настройки, которые непросто приспособить для нужд пользователя. Как уже отмечалось в первой части статьи, для модификации этих настроек необходимо редактировать регистр операционной

системы *Windows*. Такие системы, как *SolidWorks*, *Solid Edge*, *NX* и *Pro/ENGINEER*, выгодно отличаются от *Autodesk Inventor* и предлагают средства управления большинством параметров, влияющих на качество сетки, а также средства предпросмотра *STL*-файла до его сохранения.

Чтобы оценить, насколько эффективно каждая из основных *CAD*-систем преобразует данные в формат *STL*, мы попросили производителей программного обеспечения прислать свои образцы *STL*-файлов. Это были как отдельные детали, так и сборки – в зависимости от того, какой вывод поддерживает *CAD*-система.

Оценка качества *STL*-данных производилась с помощью программы **Magics 9.5** компании **Materialise**. Этот продукт используется в *RP*-индустрии для импорта, ремонта и редактирования промышленных *STL*-данных на протяжении уже длительного времени (компания *Materialise* зарегистрированная в Бельгии в 1990 году, была одним из первых в Европе центров *RP*-сервиса. – *Прим. ред.*). Программа *Magics* позволяет выявлять наиболее общие проблемы и ошибки в *STL*-файлах. Поскольку файлы отличались как по размеру, так и по сложности, считать это сравнение строго научным нельзя. Тем не менее, мы постарались подробно изучить ошибки, обнаруженные во время нашего исследования, и определить наилучшие пути для их устранения – как в целом, так и для каждой конкретной *CAD*-системы.

Для отдельных деталей все основные *CAD*-системы выводят *STL*-данные достаточно хорошего качества и практически без ошибок. Единственная общая проблема была выявлена у пакетов, которые относятся к классу систем поверхностного моделирования – таких, как *Rhino* компании *McNeel* и *StudioTools* компании *Alias*. В отличие от твердотельных моделлеров, в системах поверхностного моделирования построение точной, полностью замкнутой (герметичной) модели не является обязательным. Поэтому потенциальный риск появления ошибок при использовании таких систем достаточно велик. Поскольку изначально средства для вывода в формат *STL* и у *StudioTools*, и у *Rhino* были очень плохими, их разработчики признали это и включили в свои пакеты инструменты, которые позволяют убедиться, что результирующие *STL*-файлы относительно свободны от ошибок.

Кроме того, у нас возникли некоторые проблемы при работе с *I-deas* – треугольники с неправильным направлением нормали, дыры в сетке и искаженные грани. Опять-таки, это не стало большим сюрпризом, поскольку *I-deas* – более старая система по сравнению с остальными.

Вывод сборок

Всего лишь пять разработчиков *CAD*-систем предоставляют своим пользователям возможности вывода *STL*-данных прямо сборочных моделей. При этом, только *SolidWorks* и *Pro/ENGINEER* позволяют генерировать серию

STL-файлов – то есть, отдельно для каждой компоненты. Остальные системы поддерживают лишь создание сборки как составного тела в одном STL-файле.

Несмотря на то, что этот процесс очень удобен для автоматизации создания STL-данных по сборочным моделям, в целом мы нашли, что работа со сборками приносит в STL-файлы ошибки. Если для отдельных деталей практически все CAD-инструменты позволяют выводить STL-данные, близкие к идеальным, то когда дело доходит до сборок – это часто становится настоящим бедствием. Треугольники с неправильным направлением нормали были наиболее общей проблемой, проявившейся практически во всех данных, присланных нам. Хотя системе *SolidWorks* удалось избежать проблемы с неправильным направлением нормали треугольников, наш эксперимент показал, что и она допускает различные виды ошибок, связанных с искажением граней и дырками в сетке. Это особенно удивительно, если принять во внимание, что присланные файлы отдельных деталей вообще не содержали ошибок.

У системы *Pro/ENGINEER* также возникли занятные проблемы. Вывод файлов для отдельных деталей сборки прошел успешно, но когда та же самая сборка была выведена в виде единого STL-файла, число деталей в ней возросло с 19 до 40, что указывает на появление “мусора”. Под мусором в данном случае понимаются отдельные поверхности, не связанные ни с одной деталью. Можно предположить, что во время генерации STL-файла какие-то элементы сборочной модели распадаются на множество поверхностей, увеличивая количество деталей в файле.

Сходные проблемы наблюдаются в системах *CATIA V5* и *NX*. Набор данных, присланный компанией *Dassault Systèmes*, содержал 13 компонентов. Однако, когда мы открыли эту сборку при помощи нашей тестовой программы *Magics*, в ней обнаружили 1472 лишние поверхности. Система *NX* не была столь расточительная, но в сборке из четырех деталей всё равно присутствовало 36 лишних поверхностей.

Причина ошибок (прежде всего – неправильного направления нормалей треугольников) кроется, вероятно, в методике построения исходной модели. Для всех её элементов должно выполняться условие единства модели. Это означает, что все элементы модели используют одно и то же 3D-пространство и между ними отсутствуют щели (какими бы малыми они ни были). Зазоры между элементами модели являются одной из главных причин возникновения проблем в процессе триангуляции. В результате

получаются различные пересечения, изменяются направления нормалей треугольников (или, как в случае с *CATIA*, образуется “мусор” в виде большого количества лишних поверхностей).

Это говорит о том, что проблемы нарушения целостности сборки при выводе файлов из *Pro/ENGINEER*, *CATIA V5* и *NX*, не могут быть объяснены условиями сопряжения деталей в сборке. Действительно, никто из разработчиков CAD-систем не смог дать удовлетворительных объяснений по поводу причин дезинтеграции своих сборок в процессе вывода. В результате **идея использования единого STL-файла для представления всей сборки была нами отвергнута.**

Работа над ошибками

Как уже говорилось, многие пользователи технологий прототипирования доверяют программе *Magics* компании *Materialise* (www.materialise.com). Эта программа предлагает богатый набор инструментов для анализа и ремонта электронных моделей (рис. 10). Помимо прочего, с их помощью можно убедиться, что подготовленные STL-данные удовлетворяют нашим требованиям. Некоторые поставщики RP-решений (например, компания *EOS*) поставляют в комплекте и адаптированную версию *Magics*.

Кроме того, у компании *Materialise* есть и *online*-сервис под названием *STLfix*. На сайте предлагаются инструменты для ремонта и конвертации CAD-данных различного формата (*Unigraphics/Parasolid*, *IGS*, *VDA*, *CATIA V5*, *Pro/ENGINEER*, *STEP*, *Solid Edge*, *SolidWorks*, *CWG93D*, *VRML*, а также *CATIA V4*) в STL-файлы с гарантированным качеством.

На базовом уровне сервис *STLfix* позволяет бесплатно использовать автоматические процедуры, позволяющие решать ряд стандартных проблем. Однако, если этого недостаточно и требуется

ручная доработка, то *Materialise* предлагает услуги своих сотрудников. В этом случае компания направляет заказчику оценочную стоимость доведения STL-файла до хорошего уровня качества из расчета 100 евро за первый час работы, плюс по 50 евро за каждый последующий.

Автор опробовал этот сервис на примере проблемного файла сборки, полученного от одного из поставщиков CAD-систем. Для автоматических процедур эти проблемы оказались не по плечу, а стоимость ремонтных услуг своих специалистов компания *Materialise* оценила примерно в 130 долл.

В этой связи уместно посмотреть и на то, что предлагается

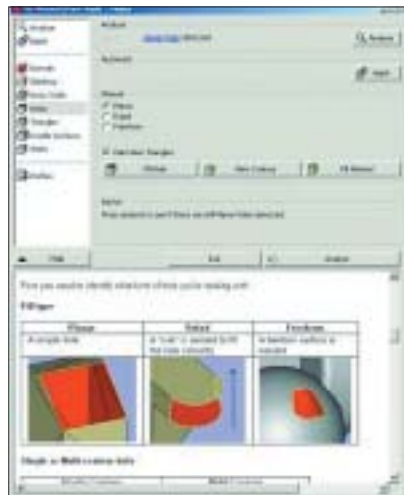


Рис. 10. Программа *Magics* компании *Materialise* часто используется для анализа и ремонта STL-данных

традиционными специалистами по трансляции CAD-данных. Например, сервис **CADverter.com** (www.cadverter.com) компании **Theorem Solutions** обеспечивает конвертацию в формат STL практически любых CAD-файлов. Цена, в основном, зависит от сложности файла.

Компания **Delcam** также предлагает STL-вывод – как часть сервиса трансляции данных **PS-Exchange** (www.ps-exchange.com). С его помощью можно конвертировать из формата в формат различные CAD-данные: CATIA V4 и V5, I-deas, Cimatron, AutoCAD, Pro/E (2000i, 2000i2, 2001 и Wildfire), Rhino 3DM, Unigraphics (в том числе и детали, созданные в NX2), SolidWorks (от версии 2004 до текущей), Solid Edge, Parasolid, ACIS, IGES, VDA-FS STEP и DGK от Delcam. Стоимость услуги фиксированная и достаточно привлекательная – 34 фунта стерлингов (примерно 65 долл.).

Выводы

Специалисты по технологиям быстрого прототипирования и все, кто тесно связан с этим процессом, скорее всего уже сталкивались с трудностями, которые описаны выше. Однако те сотрудники, которые готовят данные для RP-специалистов в своих компаниях (или, что чаще бывает, для сторонних поставщиков RP-услуг) не всегда подозревают о проблемах, которые могут вызвать присланные ими STL-файлы. Да и при тестировании покупаемой RP-системы зачастую возникает соблазн объяснить нарушение процесса синтеза модели несовершенством оборудования, хотя в большинстве случаев это не так – просто низкое качество RP-модели является следствием использования некачественных STL-данных.

С несколькими поставщиками RP-услуг мы обсудили те проблемы, с которыми они сталкиваются постоянно. Очевидно, что большой проблемой является разрешение. **Phill Adamson**, управляющий директор компании **Paragon Rapid Technologies**, дал следующее пояснение: “Пользователи присылают нам плохие файлы. При выводе STL-файла из CAD-пакета, в котором была разработана модель, может быть задано различное разрешение. Иногда мы получаем “экономные” файлы, в которых детали как будто граненые. В этом случае и RP-модель будет состоять из набора плоских поверхностей. И наоборот, если при выводе было задано слишком высокое разрешение, размер файла оказывается слишком большим для обработки. Нужна “золотая середина” между размером и качеством.”

При таком разнообразии качества файлов поставщикам RP-услуг нередко приходится тратить часы на устранение ошибок, чтобы сделать данные пригодными для синтеза RP-модели. А это, конечно, работа, требующая дополнительных затрат.

Пытаясь обнаружить причины возникновения многих из указанных проблем, мы связались

с некоторыми CAD-разработчиками, отвечающими за генерацию STL-файлов. Из многих источников нам доводилось слышать, что в системах I-deas и CATIA V4 экспорт в формат STL работает неудовлетворительно (надо отметить, что **Dassault Systèmes** отказалась предоставить данные, экспортированные из CATIA V4, для подготовки этой статьи). Наши тесты подтвердили это мнение.

В ответ на замечания о проблемах с выводом STL-файлов в системе I-deas представитель UGS сказал следующее: “У компании UGS нет информации о проблеме с качеством экспортируемых STL-файлов. В базе данных нашего центра технической поддержки GTAC (Global Technical Access Center) отсутствуют какие-либо записи, касающиеся данной проблемы. Отсутствуют также и какие-либо запросы об улучшении вывода в формат STL. Тем не менее, разработчики UGS изучают проблемы, отмеченные вами”.

Мы также связались с компанией **Autodesk**, чтобы выяснить, каковы причины столь невыразительной поддержки STL-вывода и крайне ограниченных возможностей управления этим процессом в пакете **Autodesk Inventor**. Как ответила нам **Amy Bunzel**, менеджер по **Autodesk Inventor Professional**: “Мы, безусловно, примем во внимание ваши слова о том, что данный функционал **Inventor** находится на низком уровне, однако мы считаем, что этот уровень определяется приоритетами в удовлетворении потребностей клиентов. Мы прислушиваемся к запросам клиентов о необходимости экспорта STL-сборок и сейчас работаем над тем, чтобы обеспечить поддержку этой функции в следующей версии пакета. Тем не менее, мы пока озабочены реализацией более важных функций. У нас нет информации, что упомянутая вами функция критична для наших пользователей. Поэтому в настоящее время мы не делаем акцент на решении этой специфической проблемы. Вместо этого мы ведем работу в тех направлениях, по которым запросы пользователей пакета **Inventor** поступают к нам наиболее часто”.

STL – наиболее примитивный формат представления 3D-данных. Он не аккумулирует в себе какую-либо дополнительную информацию. Некоторые разработчики снабжают CAD-систему вполне приличной поддержкой вывода STL-файлов, тогда как некоторые – весьма посредственной. Как мы уже отметили, у продуктов компании **Autodesk**, вероятно, самый слабый функционал с точки зрения управления процессом, хотя у некоторых других поставщиков тоже бывают проблемы с файлами.

Компания UGS являет собой чрезвычайно странный случай, поскольку в её системах NX и I-deas проблемы с STL-экспортом возникают, тогда как в **Solid Edge** их нет. Вероятно, командам разработчиков необходимо сесть и разобраться, почему имеет место столь разительный контраст между пакетами среднего и высшего уровня.

Пакеты *Pro/ENGINEER* и *SolidWorks* обеспечивают высокое качество *STL*-вывода для деталей, а также хорошие возможности управления процессом. В то же время качество вывода сборок достаточно низкое. Однако, оба пакета предоставляют пользователям инструменты для вывода деталей из сборок с генерацией отдельного файла для каждой детали. Кроме того, включенные в *SolidWorks* функции проверки пересечения деталей должны помочь избежать ошибок при создании *STL*-файлов, содержащих несколько деталей. Другие системы тоже имеют подобные инструменты, но они еще не интегрированы в процесс вывода и их применение требует дополнительных шагов, которые можно забыть или пропустить.

Будущее *STL*

Итак, каковы же перспективы быстрого прототипирования и методов, используемых для передачи данных в *RP*-машины? Хотя *STL*-формат представляет собой общепринятую платформу и стандартный метод передачи данных из виртуального цифрового мира в реальный физический, автор решил проявить любознательность и выяснить альтернативу.

Имеются ли потенциальные возможности для улучшения интеграции *CAD*-систем и программного обеспечения, используемого при *RP*-синтезе? Одно из решений, которое приходит на ум, предлагает компания **McNeel** в системе **Rhino**. Речь идет о функции, которая позволяет передавать данные непосредственно на *3D*-принтеры различных типов. Такое средство может эффективно использоваться даже отдельно от остальных инструментов.

Пока я разбирался с указанной выше функцией системы **Rhino**, компания **3D Systems** выпустила пресс-релиз, в котором можно увидеть намек на то, что она проводит работы по созданию “более прямого интерфейса” между *CAD*-системами и разработанным ею *3D*-принтером **InVision**. Как следует из пресс-релиза, **3D Systems** предлагает “основу, позволяющую интегрировать функцию *Print Preview* для *3D*-принтера **InVision**, в любую *CAD*-систему или другое соответствующее программное обеспечение”. Утверждается, что это даст возможность “отправлять задания на *3D*-принтер **InVision** прямо из *CAD*-пакета, который клиент выбрал для работы”.

Чтобы получить немного больше информации, я обменялся несколькими электронными письмами с г-ном **Mervyn Rudgley**, чья должность — *Senior Director of Product Management* компании **3D Systems**.

Во-первых, я был заинтригован, каким же образом эта “основа” может быть встроена в различные *CAD*-приложения. Как объяснил г-н **Rudgley**, “задача состоит в том, чтобы включить в *CAD*-интерфейс соответствующий пункт меню, который позволяет компилировать и посылать на *3D*-принтер **InVision** необходимую последовательность команд”.

Реализовать это можно при помощи *API* (*Application Programming Interface*) каждой *CAD*-системы. На вопрос, в чьи же обязанности будет входить разработка и интеграция в систему этих инструментов, г-н **Rudgley** ответил, что один такой интерфейс уже разработан для *SolidWorks*. Он полагает, что “найдутся продвинутые пользователи и других *CAD*-систем, которые разработают подобные инструменты и распространят их среди пользователей”.

После инсталляции упомянутого интерфейса для *SolidWorks* (он устанавливается вместе с программным обеспечением принтера **InVision**) в меню добавляется новый пункт — *Send to InVision*. При выборе этого пункта появляется окно предпросмотра (*print preview*) модели, подготовленной к “печати” на **InVision**. Далее пользователь может, при желании, переставить (*reposition*), отмасштабировать (*scale*) или откопировать (*copy*) модель, после чего следует выполнить команду *Submit*. При этом автоматически генерируется *STL*-файл, который и отправляется в очередь “печати” на **InVision**. Хотя система всё равно транслирует данные в *STL*-формат, для пользователя это незаметно. По словам г-на **Rudgley**, пользователи пакетов **Rhino** и **Solid Edge** также “выразили интерес”.

В общем, идет довольно интересный процесс. Если верить активной рекламе поставщиков *CAD*-систем, возможность быстрого преобразования компьютерных моделей в прототипы является солидным преимуществом при переходе к *3D*-проектированию. На любой выставке мы обнаружим нескольких поставщиков *RP*-систем, которые вместе со специалистами по программному обеспечению работают над укреплением сотрудничества двух сторон, вовлеченных в этот процесс. Тем не менее, как показывает наше исследование, часть представителей *CAD*-сообщества пока еще не имеет достаточно хороших инструментов для решения проблем, с которыми ежедневно сталкиваются пользователи *RP*-технологий.

Конечно радует, что большинство *CAD*-систем выводит *STL*-файлы хорошего качества. Это позволяет быть уверенным, что используемые *STL*-данные точно отображают разрабатываемое изделие на текущей стадии проектирования. Однако, только в том случае, если параметры заданы корректно.

STL-формат не собирается сходить со сцены, и я рад, что он будет служить в качестве формата *RP*-данных еще многие годы. В данный момент ему нет реальной альтернативы. Можно предположить, что работы, которые компания **McNeel** ведет с системой **Rhino** (а **3D Systems** уже провела с системой **SolidWorks**), указывают на возможность реализации гораздо более интегрированных решений, однако это достаточно долгий путь. А до тех пор, пока не наступят эти времена, пользователям по-прежнему будет нужно экспортировать *STL*-файлы с помощью тех инструментов, которые есть в используемых ими *CAD*-системах и приложениях для моделирования. 