

# В мире современного проектирования недостаточно одних лишь методов твердотельного моделирования

Зачем нужны движки для работы с сетками, такие как *Polygonica*

*Roopinder Tara (engineering.com)*

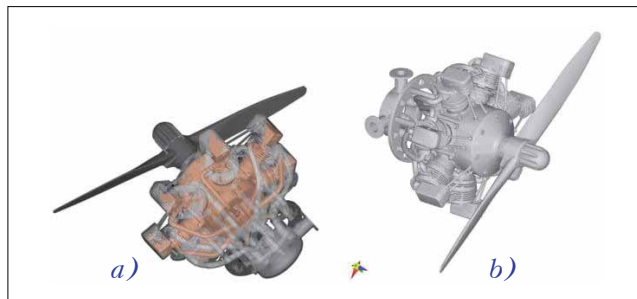
Поскольку почти всё в мире проектируется в 3D и представляется с точностью 10 градусов гладкими кривыми и прямыми линиями, то мы можем упустить из виду очень важную деталь: реальный мир можно назвать каким угодно, но только не гладким и прямым. Природные объекты в лучшем случае неровные, но иногда скалистые, зазубренные или вообще произвольной формы. Не бывает двух одинаковых снежинок, горы – это не конусы, а Земля – это не совсем сфера. Даже рукотворные предметы, изначально представленные в виде точной геометрической модели, существуют с не совсем идеальными формами – их несовершенство является результатом производственной погрешности.

Подумайте о высокоточных лазерных сканерах, которые возвращают облако точек, состоящее из миллионов, если не миллиардов, точек с координатами X, Y и Z. Эти точки образуют многоугольники (обычно – треугольники), которые соединяются, формируя фасетную (негладкую) поверхность. По ряду причин, несмотря на возможную большую детализацию, полигональная сетка сканируемого объекта может оказаться неточной и не представлять его в должной мере.

Возьмем в качестве примера дверную ручку. Сканер не вернет гладкие модели литых деталей, образующих её. Модель не будет выглядеть в точности как ручка, поскольку будет фасетной, и, конечно же, не будет вести себя как единый механизм.

## Насколько точна созданная нами сетка

Для работы с такими нерегулярными формами, которые генерируют 3D-сканеры, нужны моделиеры другого типа. Именно так думали



*Пример работы алгоритмов Polygonica:  
a) исходная CAD-сборка – 5.4 млн. граней;  
b) упрощенная полигональная модель для быстрого рендеринга в приложениях дополненной и смешанной реальности – 69 000 граней.  
(Иллюстрация любезно предоставлена компанией MachineWorks)*

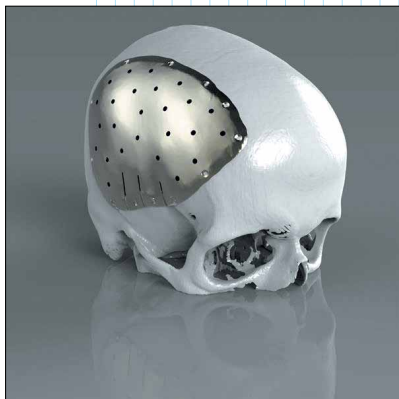
создатели *Polygonica*. Большинство твердотельных моделлеров пытаются представить естественные формы и управлять объектами, состоящими из набора примитивных форм, опираясь на свое геометрическое ядро, но эти моделлеры не способны работать со всеми сканированными объектами. Поскольку инструментов не хватало, представление объектов на основе *NURBS* стало почти безнадежным делом.

В 2010 году компания *MachineWorks* создала *Polygonica* – движок геометрического моделирования для работы с сетками (*Mesh Modeling*), предназначенный специально для исправления, оптимизации и манипуляций с моделями, представленными сетками многоугольников, так как подобные модели появлялись всё чаще.

## Генеративное проектирование

Одним из современных способов геометрического моделирования является генеративное проектирование. Его сторонники, компании *Autodesk* и *Altair*, пропагандируют этот подход, как способный создавать естественные формы при помощи алгоритмов “нарастания кости”, на которых основано их ПО.

Когда поломанная кость заживает, через месяц-другой вокруг места перелома формируется нечто вроде защищающей его манжеты. В течение следующего года (или дольше, в зависимости от возраста



*Создание металлической печатной пластины для черепа начиналась со сканирования. Исправления вносились с помощью геометрического ядра Polygonica, причем геометрия импланта была смоделирована непосредственно как сетка.  
(Иллюстрация любезно предоставлена компанией Renishaw)*

человека) этот нарост “рассасывается”, пока зажившая кость снова не станет гладкой.

Такой процесс добавления материала туда, где он нужен, и удаления там, где не нужен, воспроизводится в компьютерных программах оптимизации формы, опирающихся на CAE. Череда следующих друг за другом симуляций позволяет автоматически добавлять материал туда, где нагрузка больше, и удалять его оттуда, где нагрузка меньше. При наличии достаточного количества времени генеративное проектирование должно формировать гладкие элементы. Однако время стоит дорого, поэтому созданные таким способом конструкции, которые мы видели, всегда были бугристыми. Следует отметить, что генеративные конструкции невозможно точно и эффективно смоделировать гладкими поверхностями, которые предлагают геометрические ядра, поэтому для этого используются полигональные 3D-сетки.

## Идеализация мира. Как мы до этого дошли?

Имеющиеся инструменты для моделирования накладывают ограничения на то, как мы моделируем мир. На чертежных досках мы проектировали, используя линейки и циркули, а изредка еще и лекала. В первых компьютерных системах эти механические инструменты черчения были заменены их CAD-эквивалентами. Нас привлекала аккуратность и точность CAD, однако мы по-прежнему были связаны нашим инструментарием. Наши конструкторские решения оставались прежними, состоящими из прямых линий и дуг.

Революцией стал переход в 3D. Или не стал? Конструкции всё так же тяготеют к прямым линиям и квадратам, а здания представляют собой коробки, так как все инструменты 3D CAD создавались на основе геометрических ядер, хорошо работающих с прямыми и квадратами. Скруглить что-либо было, и всё еще остается, сложной задачей. Простое физическое действие – скругление острой кромки детали, которое станочник делает вручную за несколько секунд – в виртуальной среде обычной CAD-системы может закончиться тем, что движок моделирования войдет в ступор. К такому же результату нередко приводит и попытка осуществить сопряжение поверхностей – например, крыльев с фюзеляжем. И, конечно же, не стоит и думать про [достаточно реалистичное] моделирование всего того, что создано природой – например, деревьев вдоль дороги.

Самыми популярными геометрическими ядрами стали Parasolid от Siemens и ACIS от Dassault Systèmes. Компания PTC создала свое – Granite, а продукты Autodesk сначала строились на ядре ACIS – до тех пор, пока компания не решила перейти на собственное. Теперь Dassault Systèmes предлагает CGM – ядро системы CATIA. Все

они обеспечивают представление поверхностей, в широком смысле похожее на NURBS (неоднородные рациональные B-сплайны), что хорошо подходит для моделирования прямого и квадратного, но в меньшей степени – для моделирования криволинейных объектов, которые должны представляться B-сплайнами.

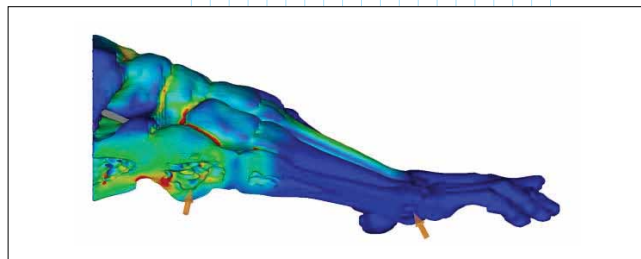
Отдельный вид манипуляций с геометрией – SubD-моделирование. Поверхности с иерархическим разбиением (Subdivision Surfaces) представляют собой нечто среднее между параметрическими поверхностями, описываемыми математически, и полигональными. Они объединяют в себе их черты и позволяют получить объекты с гладкими поверхностями (что характерно для NURBS-моделей), сохраняя возможность создавать их вытягиванием из полигональных примитивов, как это принято в полигональном моделировании, и деформировать нажатием. Работа с subD достаточно долго, вы действительно можете создать объекты естественной формы. Мы видели модель стула и даже человеческое лицо, полученные из кубика. Однако универсальное и гибкое subD-моделирование так и не стало общепринятым в сфере CAD, хотя эта возможность и предлагалась в виде дополнительных модулей к некоторым широко используемым CAD-системам.

## Лазерное 3D-сканирование

Для современного лазерного 3D-сканера не составляет проблем сгенерировать миллиарды точно позиционированных точек. Формирование поверхностной сетки – упражнение из области

3D-геометрии для алгоритмов по соединению точек в треугольники (или другие многоугольники). Треугольники создаются на основе трех близлежащих точек.

Но это еще не всё. Триангуляционная сетка, называемая цифровой моделью рельефа (Digital Terrain Model, DTM) сканированной сцены, могла бы быть более полезной, если бы объекты можно было распознавать. Возьмем для примера одно из распространенных применений 3D-сканирования: имеется технологическая



Сочетание возможностей Polygonica и ANSYS Discovery Live позволяет менее чем за 30 секунд сделать анализ напряжений для “грязной” геометрической модели, основанной на полигонах.  
(Иллюстрация любезно предоставлена компанией ANSYS)

установка, представляющая собой плотное переплетение труб, клапанов, насосов, измерительных приборов, опор и мостиков. С помощью сканера можно сгенерировать миллиарды точек и создать полигональную сетку, но как пользователи отличат трубу от удерживающей её скобы? Как они узнают, что это труба?

Лазерный сканер может оцифровать только то, что видно с его позиции. Та часть объекта, которая находится за пределами прямой видимости, не захватывается, что ведет к появлению теневых зон. Чтобы охватить картину целиком, сканеры несколько раз переставляют. Однако полное 100%-е сканирование в тесном, забитом до отказа пространстве является недостижимым идеалом. Для наружного сканирования операторы дронов будут придумывать хитроумные траектории полета – к примеру, петлять вокруг моста, – чтобы насытить представление объекта точками. Тем не менее, несосканированные зоны всё равно останутся.

## Корни уходят в сферу САМ

Компания *MachineWorks*, основанная в 1994 году, находится в городе Шеффилд (Англия). Название её первого продукта совпадает с названием компании. Система *MachineWorks* позволяет симулировать на компьютере будущий процесс обработки на оборудовании с ЧПУ и, таким образом, верифицировать траектории инструмента до того, как УП пойдет в цех.

“Относительная уникальность движка *MachineWorks* заключается в том, что он основан на граничном представлении (*Boundary Representation, BREP*)”, – говорит **Dr. Fenqiang Lin**, управляющий директор *MachineWorks Ltd.* и один из двух разработчиков ядра, стоявших у истоков. – “Он достаточно быстрый, чтобы справиться с сотнями тысяч сложных булевых операций, необходимых для симуляции обработки, – потому что *BREP* строится на полигональных сетках”.

Первыми заказчиками системы стали *CAD/CAM*-вендоры *Vero* и *Dassault*.

“Девять из двенадцати ведущих *CAM*-компаний интегрировали [в свои решения] *MachineWorks* для симуляции обработки”, – говорит д-р *Lin*.

Работая с *Okuma*, японским производителем станков с ЧПУ, компания *MachineWorks* помог-

ла им разработать первую станочную систему предотвращения столкновений.

“Мы очень гордимся этим”, – говорит д-р *Lin*. – “Мы проделали огромную работу по оптимизации, чтобы обеспечить выполнение булевых операций за миллисекунды и соответствовать длительности цикла в УЧПУ”.

Твердотельные моделлеры *SpaceClaim* и *CimatronE*, приобретенные компаниями *ANSYS* и *3D Systems* соответственно, первыми расширили область применения *Polygonica* за пределы *CAD/CAM*. Позднее компания *ANSYS* подписала соглашение, позволяющее ей использовать *Polygonica* в качестве сеточного пре- и постпроцессора во всей линейке продуктов.

Компания *Renishaw*, еще один из первых заказчиков, лицензировала использование *Polygonica* для задач своего стоматологического бизнеса – *3D*-печати таких деталей, как коронки. Функционал *Polygonica* позволяет найти и заделать в сканированной модели мельчайшие отверстия, размером в площадь лазерного луча, что дает герметичную модель. В противном случае на выходе будет тонкая как яичная скорлупа оболочка, а не твердотельные зубы.

## Важность программирования переоценена

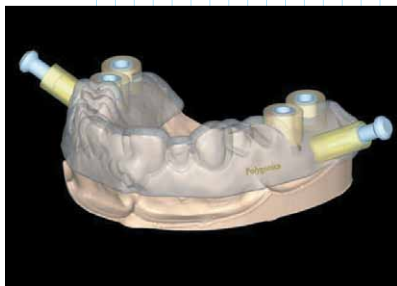
“Мы не ищем программистов-кодеров”, – говорит д-р *Lin*. – “По большей части мы нанимаем математиков, а также физиков и инженеров, в настоящее время – только из ведущих университетов Великобритании. Восемь из двенадцати наших основных разработчиков являются докторами философии (кандидатами наук).

В первую очередь, нам необходимы те, кто может найти решение. Мы даем нашим разработчикам проблему, и даем время и свободу, чтобы отыскать решение. Есть время поиграть, свободно подумать. Решение – вот что нам нужно. Когда мы нашли правильных людей, то можем научить их, как писать программный код”.

Устроиться на работу в *MachineWorks* нелегко.

“Зачастую уходит больше года на то, чтобы найти подходящего человека, который сможет пройти через наш строгий процесс отбора”, – говорит д-р *Lin*.

Он также обращает внимание на долгосрочность процесса разработки их программного



*Применение функций Polygonica по “лечению” и смещению поверхностей (offsetting), а также булевых операций поможет исправить сканированную модель для зубопротезирования. В исходной полигональной сетке могли быть пропущены элементы, которые невозможно определить на каркасной модели, но видны на окрашенной. Отправка некорректной модели на 3D-принтер дала бы бесполезный результат – пустую оболочку. Polygonica позволяет определить и восстановить пропущенный элемент, сделать его твердотельным. (Иллюстрация любезно предоставлена компанией MachineWorks)*

продукта, в отличие от подхода “делай то, что злободневно и можно продать завтра”.

## Бизнес *Polygonica*

Как и основные геометрические ядра, *Polygonica* лицензируется для вендоров ПО, включая разработчиков CAD-, CAM- и CAE-приложений, которым нужна обработка сеток. В настоящий момент компания *MachineWorks* имеет 38 заказчиков их комплектов для разработки ПО (*Software Development Kit, SDK*), в том числе таких лидеров в области 3D-печати, как *3D Systems, Stratasys* и *Renishaw*. Библиотеки программ *Polygonica* анонимно работают в недрах более крупных программных систем: бренд *Polygonica* нигде не демонстрируется, и конечные пользователи даже не догадываются, что используют его возможности.

Компания *MachineWorks* разглядела на горизонте облака точек, а также поверхности в виде сеток, состоящих из треугольников, созданных по этим точкам. В новом тысячелетии быстрое развитие всех видов сканирования и рост компаний, занимающихся этим, позволили дополнить возможности существующих в медицине методов магниторезонансной томографии (*MRT*) и компьютерной томографии в аксиальной проекции (*CAT*). Начался бум цифровой стоматологии.

Полигональные сетки давно использовались в играх и CGI (сгенерированные компьютером изображения); они же стали основой для большинства алгоритмов, которые разрабатывались для задач, следующих за этапом CAD-проектирования – таких, как инженерный анализ (*CAE*) и формирование траекторий инструмента для оборудования с ЧПУ (*CAM*).

“CAD-модели, основанные на *NURBS*, были исключением”, – говорит д-р *Lin*. – “Несмотря на их широкое распространение в сфере проектирования, когда дело доходило до реального производства, оказывалось, что математически они слишком сложны”.

Сотрудники *MachineWorks* обнаружили, что более общее решение для моделирования и манипулирования полигональными сетками, которое предназначалось бы для промышленных 3D-систем, отсутствует. В 2010 году, используя движки и технологию, созданную для CAM-отрасли, компания начала фокусироваться на своем геометрическом ядре *Polygonica*.

“Поначалу было нелегко убедить крупных CAD/CAM/CAE-разработчиков в ценности *Polygonica*”, – вспоминает д-р *Lin*. – “У большинства CAM- и CAE-компаний имелся наработанный десятилетиями опыт работы с полигональными сетками, тогда как большинство CAD-компаний предпочитало поддерживать обратный инжиниринг для преобразования сеток в свое родное CAD-представление. Проблема заключается в том, что даже лучшие решения для обратного инжиниринга являются сложными, требуют

большого объема памяти и работают медленно. Тот факт, что основные поставщики CAD-ядер сейчас тоже разрабатывают собственные средства моделирования для работы с полигональными сетками, показывает, что эта технология здесь будет применяться”.

“Когда был запущен продукт *Polygonica*, мы продемонстрировали свой 16-летний опыт в сфере *mesh*-моделирования и смогли захватить и сохранить доминирующую долю на CAM-рынке. Опираясь на эти технологии в *Polygonica*, мы медленно, но уверенно показывали всем, что наши алгоритмы настолько хорошо реализованы, что их стали использовать такие ведущие вендоры ПО, как *ANSYS, SpaceClaim, Cimatron* и *OpenMind*”, – вспоминает он.

## Как это работает

3D-распечатки обычно создаются на основе файлов для стереолитографии (*STL*), которые являются фасетной аппроксимацией той точной, упорядоченной и гладкой геометрии, которая формируется в 3D-моделлерах. Попытки представить CAD-геометрию полигональной сеткой, фасетной по своей природе, чтобы получались законченные герметичные (водонепроницаемые) модели, не всегда достигают цели. Нередко 3D-печать заканчивается неудачей именно потому, что 3D-сетка была не совсем корректной.

## Начнем лечение

*Polygonica* обеспечивает проверку печатаемых моделей на водонепроницаемость и отсутствие самопересечений в ходе контроля пригодности моделей для печати.

“Существует общая отраслевая потребность в “лечении” моделей, которая не ограничивается полигональными сетками и аддитивным производством”, – говорит д-р *Lin*. – “К примеру, даже при условии, что исходная конструкция была смоделирована идеально, каждый раз при передаче данных из одной системы в другую у вас может возникнуть необходимость исправлять их. Поставщики ключевых программных технологий, на которые во всем мире опираются при создании автомобилей и самолетов, уже более 15 лет предлагают лечение своих *NURBS*-подобных моделей, а в последнее время работают над аналогичными возможностями лечения полигональных сеток”.

“Но у нас есть серьезное преимущество: по большинству аспектов мы ушли на годы вперед”, – продолжает он. – “Мы лечим сетки уже 20 лет, и наши алгоритмы лечения широко используют наш булев движок, который каждый день тестируют пользователи в CAM-отрасли. Загрузите свою сетку в *Polygonica* – и программа вылечит её автоматически с вероятностью более 99%. Наши клиенты описывают это как волшебство”.

Другая ключевая особенность подхода *Polygonica* к исправлению модели заключается

в том, что модифицируется только та часть исходной сетки, которая нуждается в этом. Исходная сетка сохраняется настолько, насколько это возможно.

“Альтернативные подходы разбивают сетку на мелкие кусочки, воксели, а затем перестраивают её”, – поясняет д-р *Lin*. – “Это должно давать эффект, но результат лечения может очень сильно отличаться от исходной сетки, что может стать проблемой для производства высокого класса, особенно авиакосмического”.

“Но в долгосрочной перспективе *Polygonica* фокусируется не на лечении сеток, а на моделировании”, – продолжает он. – “Лечить модели – это только весьма полезный первый шаг. В отношении сеток, независимо от их происхождения, нашей целью является уменьшить потребность в обратном инжиниринге для моделирования”.

“Большинство современных *CAD*-моделлеров испытывают шок, если вы их загружаете работой с сетчатыми моделями даже умеренных размеров. А это проблема, так как вам для ее решения нужно или купить дорогие специализированные инструменты реверс-инжиниринга, или заново построить модель детали”, – говорит д-р *Lin*. – “*Polygonica* же может естественным образом работать с такими более крупными сетками”.

Переход от полигонов к *CAD*-представлению действительно очень сложен, но переход от *CAD* к полигонам осуществлять сравнительно проще. Так, если вам необходимо совместить *CAD*-модель с полигональной моделью (например, после сканирования), то конвертация *CAD*-модели в полигоны и использование возможностей *Polygonica*, скорее всего, будет намного более быстрым и простым путем”.

По его словам, *Polygonica* работает очень быстро. К примеру, производственные центры, входящие в сектор автомобилестроения, использовали *Polygonica* для утолщения листовых

частей больших и сложных автомобильных панелей. “*Polygonica* делает за минуты то, что массовые *CAD*-системы делают за несколько часов. Результаты не являются *CAD*-моделью, но они достаточно точны для подготовки детальных техпроцессов производства”, – утверждает он.

“Я очень горжусь тем, что *Polygonica* является лидером в том, что касается лечения полигональных сеток, булевых операций и смещения поверхностей, но это не должно быть сюрпризом для тех, кто работал с *MachineWorks* многие годы. И каждый год мы добавляем в арсенал *Polygonica* всё больше и больше возможностей – идентификация конструктивных элементов, упрощение, сглаживание, придание обтекаемой формы, заполнение отверстий с учетом кривизны поверхности, анизотропный сдвиг, смещение кривой по поверхности, склеивание, обнаружение пересечений. И это не полный список”.

Хотя *Polygonica* часто ассоциируется с аддитивным производством, стратегия *MachineWorks* имеет более общий характер.

“Происходит перекрестное оплодотворение идей”, – поясняет д-р *Lin*, приводя примеры алгоритмов, разработанных для более точной настройки, с учетом усадки, для аддитивного производства, которые теперь используются в ходе больших строительных проектов. Еще один из его примеров – алгоритм, разработанный для создания уровней детализации для *VR/AR/XR* отрасли, который нашел применение для лучшего создания сеток по результатам лазерного сканирования подземных туннелей.

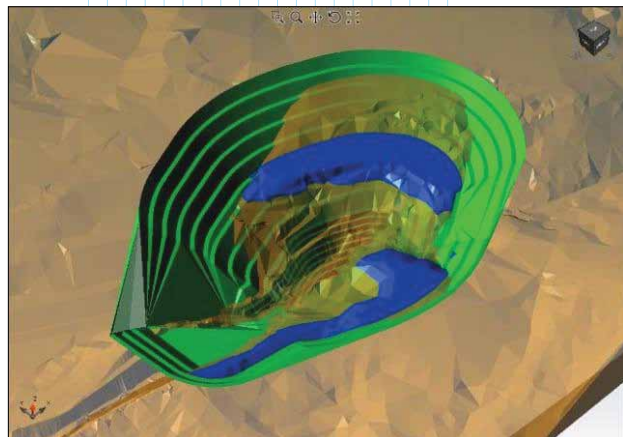
“Мы фокусируемся на математике и геометрии”, – говорит д-р *Lin*. – “Мы позволяем нашим клиентам владеть своими сферами деятельности”.

Тот же самый булев движок, который компания *MachineWorks* разработала для компьютерной симуляции процесса обработки на станках с ЧПУ, сейчас используется в горнодобывающей промышленности. Он позволяет, опираясь на цифровую модель рельефа, рассчитать объем грунта, который предстоит удалить при открытой разработке карьера.

“Реальный мир – это довольно сложное место, и нам нужны все типы и структуры данных для его цифровой фиксации, мониторинга, моделирования и отображения”, – подводит черту д-р *Fenqiang Lin*. – “Это означает, что требуются *CAD*-ядра, полигональные *mesh*-моделлеры, воксельные движки, точечные движки и многое другое. Но мы фокусируемся только на одном из всего этого – хотим сделать *Polygonica* самым лучшим полигональным сеточным моделлером, который вы можете купить”.

Больше узнать о ядре *Polygonica* можно на сайте: [www.polygonica.com](http://www.polygonica.com).

Спонсором данной статьи является компания *MachineWorks*.



Горнодобывающая промышленность.  
Булевы операции с топографической моделью (DTM) и моделью открытого карьера.  
(Иллюстрация любезно предоставлена компанией *Alastri*)