

Для микрообработки требуются нетривиальные решения и подходы

Комбинация *Mastercam+Haas+Renishaw* спасает людские жизни

Matt Danford

©2010 Gardner Publications, Inc.

Matt Danford – редактор сетевого журнала по металлообработке “Modern Machine Shop” (MMSOnline.com), выпускаемого компанией Gardner Publications (www.gardnerweb.com). Оригинал статьи можно найти по следующему адресу: <http://www.mmsonline.com/articles/it-takes-firm-resolution-to-master-the-micro>.

Представляемая в данной статье компания накопила успешный опыт механической обработки микроклипс для зажима аневризмы (аневризма – это патологическое выпячивание стенки артерии; зажим аневризмы препятствует её разрыву и кровотечению в мозг). Клипсы изготавливаются из *нитридкремниевой керамики*. Опыт компании *Micro Precision Parts Manufacturing (MPPM)* свидетельствует, что для таких работ необходимы мощные и точные CAD- и CAM-системы, специальный инструмент и станки с ЧПУ, обладающие повышенной точностью (*high resolution*); кроме того, требуется и умение объединять все эти средства в едином процессе.

Несмотря на свою специализацию, связанную с обработкой маленьких сверхточных деталей, компания *Micro Precision Parts*

Manufacturing (www.precisionmicromachining.com) никогда не сталкивалась с такой работой. При изготовлении хирургической клипсы размером не больше спичечной головки требуется запрограммировать порядка миллиона перемещений инструмента в объеме примерно 1 см³. Если всё это вас еще не впечатлило, представьте себе, что для изготовления клипсы применяется один из самых твердых материалов на Земле.

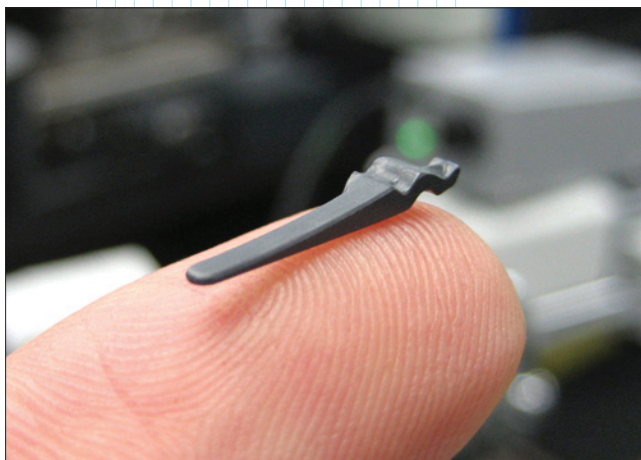
От многих производителей, которые не взялись за эту работу, считая её невыполнимой, компанию *MPPM* отличает твердая решимость изобрести жизнеспособный метод изготовления сложных деталей с допуском 20 микрон. Метод, который разработал **Steve Cotton**, владелец компании *MPPM*, основан на глубоком понимании различных факторов, влияющих на точность обработки. Он базируется на знаниях, каким образом точностные характеристики (*resolution capability*) всех вовлеченных в производственный процесс средств (начиная от программного обеспечения для создания CAD-модели и УП, вплоть до особенностей работы исполнительных механизмов станка с ЧПУ) влияют на предел точности изготавливаемой детали.

По словам г-на *Cotton*, в большей степени это относится к функционалу CAM-системы, обеспечивающему ультравысокую точность (*ultra-high resolution*), что, с позиции производственных возможностей компании, “открывает мир” обработки сложных деталей экстремально малых размеров (*minute*).

Далее мы рассмотрим опыт компании *MPP*, обсудим способы и приемы решения технологических проблем, прямо влияющих на точность обработки, особенно на микроуровне.

Фабрика в подвале

Карьера г-на *Cotton* в часовом бизнесе началась более 25 лет назад. После окончания обучения по программе *WOSTER* (*Watchmakers of Switzerland Training and Education Program*, www.wostep.ch), которая, по словам г-на *Cotton*, является наиболее уважаемой и



Одна из губок зажимного механизма клипсы аневризмы, изготовленная из нитридкремниевой керамики. Изделия из этого материала остаются невидимыми на медицинских томограммах.

По словам г-на *Cotton*, владельца *MPPM*, заложенная в систему *Mastercam* стратегия расчета траекторий обработки сложных поверхностей с постоянной шероховатостью (*scallop toolpath*) позволила компании эффективно использовать возможности 4-осевого фрезерного станка *Haas OM-2A* серии *Office*, применяя алмазные резцы

высококачественной в мире, он занялся обслуживанием и ремонтом часов на своей родине, в Новой Зеландии. Это случилось незадолго до переезда в Австралию, где он получил должность в компании *Rolex*, и последовавшего затем возвращения в Швейцарию для продолжения обучения в интересах компании. В дальнейшем он переехал в Канаду, где организовал ремонтную мастерскую и выполнял определенный объем работ как специалист компании *Rolex*.

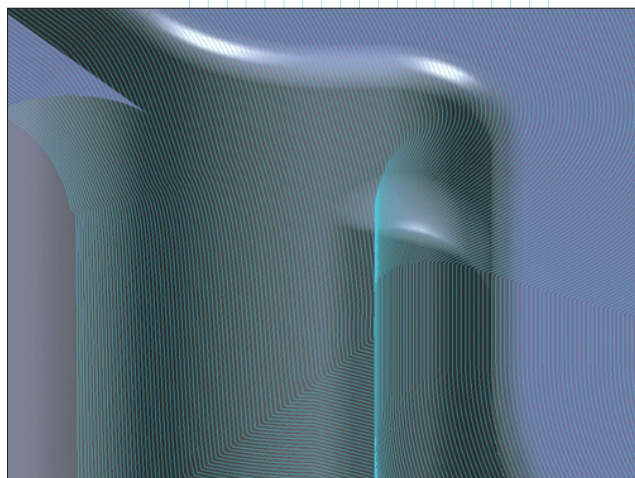
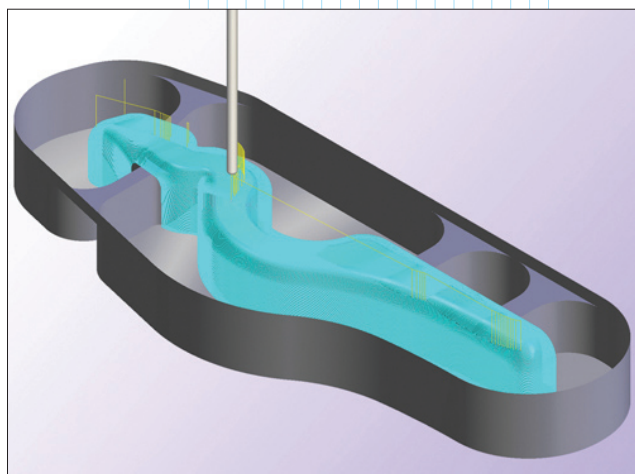
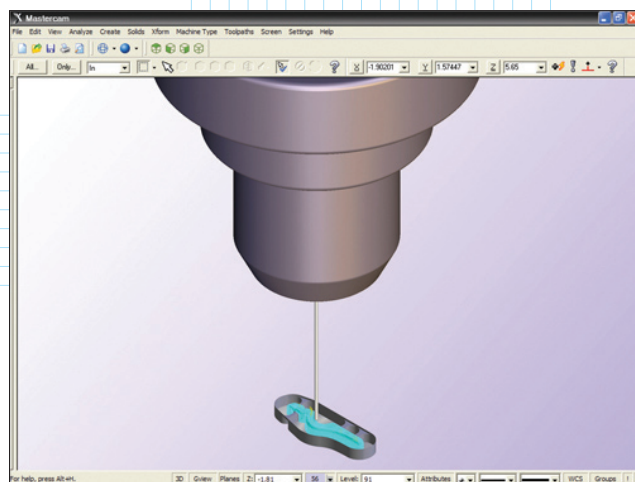
Серьезная автомобильная катастрофа в 2003 году заставила г-на *Cotton* на короткое время отойти от дел. В 2004 году он учредил компанию *MPPM* и разместил её в подвале своего дома, находящегося в городе *Qualicum Beach* (остров Ванкувер, провинция Британская Колумбия, Канада). В настоящее время список оборудования компании включает:

- фрезерный и токарный станки производства компании *Sherline* (гор. *Vista*, штат Калифорния);
- токарный станок *OL-1* из серии *Office* компании *Haas* (гор. *Oxnard*, штат Калифорния);
- два фрезерных станка *OM-2A* производства *Haas*, оборудованные лазерными устройствами для предварительной настройки инструментов (*laser tool presetter*) от компании *Renishaw* (гор. *Hoffman Estates*, штат Иллинойс).

Большую часть работы по программированию обработки на станках с ЧПУ выполняет *Matthew Cotton*, сын владельца, используя для этого CAM-систему *Mastercam* от компании *CNC Software* (город *Tolland*, штат Коннектикут).

В отличие от предыдущих компаний, которые создавал г-н *Cotton*, *MPPM* вышла за пределы ремонта и изготовления деталей для высококачественных наручных, настенных и настольных часов. Сегодня примерно 80% бизнеса компании относится к изготовлению миниатюрных (*minute*) и точных деталей, таких как монтажные платы, детали медицинского назначения и даже микроскопа для *Caltech* (подразделение *NASA*).

Расширение возможностей компании *MPPM* в значительной степени произошло тогда, когда были предприняты попытки изготовления опытных образцов хирургической клипсы новой конструкции, разработанной в компании *Concept Solutions* (Ванкувер, провинция Британская Колумбия). По словам г-на *Cotton*, сотрудник медицинского факультета Университета Калгари (гор. Калгари, провинция Альберта, Канада) *Dr. Garnette Sutherland* считает, что это приспособление, если оно будет одобрено, может продвинуть нейрохирургию в развитии на 30 лет вперед.



При симуляции обработки траектория инструмента видна только при многократном увеличении. Чтобы расчет миллиона перемещений инструмента в области объемом в кубический сантиметр выполнялся без задержек, компания *MPPM* приобрела четырехъядерный компьютер, охлаждаемый жидким азотом. Это позволило запрограммировать обработку мельчайших деталей и ускорить изготовление зажимного механизма клипсы (с одного месяца до примерно 12 дней при круглосуточном режиме работы)

От измерения времени к сохранению жизни

Самое важное в конструкции новой клипсы – это материал, из которого она изготовлена: *нитриды кремниевая керамика*. Как и титан, этот материал не вызывает отторжения со стороны тела. Но, в отличие от титана, он практически невидим при сканировании с использованием магнитно-резонансной или компьютерной томографии, и, таким образом, не препятствует получению полного отображения аневризмы. Появление таких клипс – важное событие для нейрохирургии. Однако для любого, кто пытается изготовить такую деталь, проблему создает твердость нитриды кремниевой керамики. Этот материал имеет твердость 9.4 по алмазной шкале (то есть, шкале Мооса, которую ввел немецкий минеролог и геолог *Carl Friedrich Christian Mohs*. – Прим. ред.), притом что твердостью 10 обладает сам алмаз. Если добавить к этому 20-микронные допуски, сложную трехмерную форму и миниатюрные конструктивные элементы, требующие применения фрез диаметром всего 0.017 дюйма (то есть, чуть больше 0.4 мм. – Прим. ред.), становится понятным, почему многие компании-изготовители отказались от выполнения проекта, за который взялась компания *MPPM*.

По словам г-на *Cotton*, компания *Concept Solutions* нашла его мастерскую в интернете, обратив внимание на то, что сертифицированный компанией *Rolex* специалист может выполнить работу тонко и искусно. Несмотря на высокую сложность заказа, г-н *Cotton* выразил уверенность, что с его навыками и технической оснащенностью он сможет выполнить эту работу. По его словам, именно его решимость сыграла ключевую роль и убедила *Concept Solutions*, что он сможет справиться с заказом.

“Мы не являемся типичными машиностроителями, и мыслим нестандартно”, – объясняет г-н *Cotton*. – “Я не могу много распространяться о том, что мы делали, поскольку есть много материалов, к которым никто не знает, как подступиться. Скажу только, что мы взглянули на проблему совершенно под другим углом, что действительно нам очень помогло”.

Как решалась задача по обработке микроскопических деталей

Несмотря на свою уверенность, г-н *Cotton* столкнулся с рядом препятствий, когда компания *MPPM* начала изготовление зажимных приспособлений (*jaw*) из нитриды кремниевой керамики. В конечном итоге работа заняла полгода, а сам проект состоял из нескольких итераций. На первом этапе научились фрезеровать детали из титана – материала, который можно было обработать относительно легко. Затем без особых проблем был обработан агат,

имеющий твердость 7 по алмазной шкале. Однако нитриды кремниевая керамика оказалась настолько твердым материалом, что потребовался месяц, чтобы изготовить первый набор крошечных зажимных приспособлений.

Вполне объяснима была обеспокоенность заказчика по поводу сроков выполнения заказа, поскольку он стремился передать новую клипсу для тестирования [в соответствующие институты для получения разрешения на их применение]. Свои заботы были и у хозяина мастерской: он опасался увеличивать скорость обработки и скорость подачи, так как это могло привести к поломке тонкого инструмента и



До того как изготовить клипсу из нитриды кремниевой керамики, компания *MPPM* освоила обработку титана

превратить в отходы почти готовую деталь на завершающем этапе продолжительного и дорогого процесса механической обработки.

Чтобы найти эффективный способ ускорения обработки деталей из неподдающегося материала, г-н *Cotton* обратился за помощью к поставщикам станков, инструментов, оснастки, а также к поставщику САМ-системы. Все они взялись за трудное дело, ну а интеграцией всего процесса в целом занималась *In-House Solutions* – эта компания, базирующаяся в гор. *Surrey* (провинция Британская Колумбия), является поставщиком *Mastercam* в Канаде.

К тому моменту, когда компания *MPPM* уже располагала необходимым оборудованием, фрезами и навыками обработки, выяснилось, что этого недостаточно. Основная проблема, с которой ей пришлось столкнуться, касалась САМ-системы. Г-н *Cotton* не мог добиться формирования с достаточной степенью точности траекторий обработки с расстоянием между проходами меньше, чем 0.01 мм, что требовалось для обработки поверхностей сложной формы. Трудности возникали и с обработкой миниатюрных конструктивных элементов с радиусами меньше 0.2 мм: при попытке рассчитать для них траекторию как для обычного скругления, в определенных ситуациях появлялись ошибки.

Проблема настройки точности для обработки сильно различающихся видов изделий, которая, скорее всего, не удивила бы инженера-машиностроителя, стала неожиданностью для г-на *Cotton*: “Мы, часовщики, всегда имели дело с маленькими деталями. Поэтому моей первой реакцией было недоумение – почему система не может этого сделать?”



Для обработки деталей из нитрида кремния, близкого по твердости к алмазу, *MPPM* использовала шпиндель с приводом от воздушной турбины (*air spindle*) от компании *NSK*. По рассчитанным средствами *Mastercam* траекториям с расстоянием между проходами менее 0.01 мм перемещается армированный алмазом инструмент диаметром 0.43 мм

Решение проблемы точности расчета траекторий оказалось сравнительно простым: разрешающая способность (*resolution*) или точность определяется набором настраиваемых параметров САМ-системы. Чтобы помочь *MPPM* справиться с задачей, представители компании *In-House* два дня потратили на модификацию настроек и подбор значений параметров (отличных от тех, которые используются по умолчанию), в таком ключе, чтобы САМ-система могла рассчитывать траекторию с более высокой точностью, чем это обычно требуется при традиционной механической обработке, но время вычислений при этом оставалось в разумных пределах.

Настройка параметров *Mastercam* обеспечила компании *MPPM* возможность создавать более точные и проработанные траектории инструментов, которые позволили изготавливать детали с заданной геометрией в соответствии со спецификацией, причем за разумное время. Конечно, это существенно повысило нагрузку на САМ-систему ввиду значительного роста объема вычислений при решении задачи. Чтобы ускорить вычислительный процесс, компания *MPPM* приобрела четырехъядерный охлаждаемый азотом компьютер с многочисленными вентиляторами. После этого работа выполнялась без особых задержек.

“Траекторий было так много, что, пока мы не увеличили масштаб изображения в 40÷50 раз, вообще ничего невозможно было разглядеть – картинка на экране была похожа на моток голубых ниток”, – рассказывает г-н *Cotton*. – “Наш старый компьютер с помощью системы *Mastercam* отлично справлялся с вычислениями традиционных траекторий. Однако как только мы занялись миниатюрными деталями и изменили параметры настройки, для загрузки файла потребовалось целых полчаса”.

В условиях круглосуточной работы изменения, внесенные компанией *In-House Solutions*, позволили уменьшить время изготовления комплекта клипсовых зажимов с месяца до 12 дней, отметил г-н *Cotton*. И добавил, что программирование с повышенной точностью существенно повысило воспроизводимость результатов обработки: “Я могу взять деталь, повторять её изготовление снова и снова, и буду уверен, что каждый раз она будет близка к совершенству”.

Как свести всё воедино

Несмотря на то, что общими усилиями удалось решить вопросы достижения необходимой точности со стороны *Mastercam*, было бы слишком просто считать, что это единственный ключевой фактор, когда речь идет об изготовлении миниатюрных точных деталей. Как считает **Ben Mund**, менеджер по маркетингу системы *Mastercam*, применение параметров сверхвысокой точности

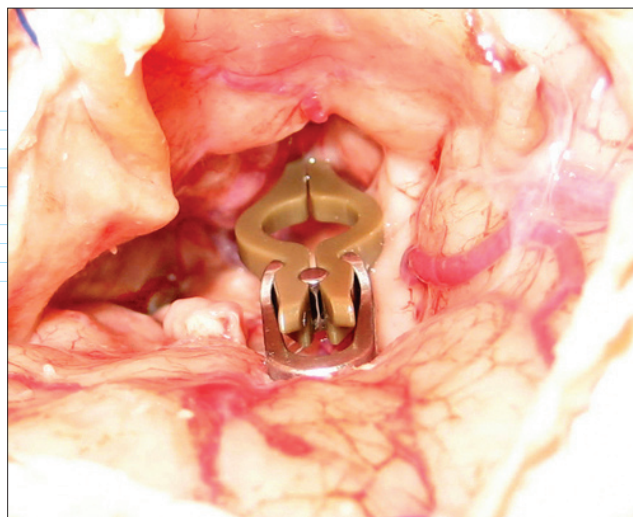
будет эффективным только в том случае, если все средства, используемые в процессе производства, будут обладать аналогичными возможностями настройки согласно специфике изделий. Например, высокоточный расчет траектории в САМ-системе является абсолютно бесполезным, если станок не обеспечивает столь малые дискретные перемещения инструмента или если исходная САД-модель выполнена с недостаточной точностью.

Поскольку компания MPPM с самого начала была ориентирована на изготовление достаточно маленьких деталей, проблем с точностью станков не возникло. В четырехосевом фрезерном станке Haas OM-2A серии Office использовались приводные винты (*pitch lead screw*) с шагом 5 мм, обеспечивающие дискретность перемещения 0.00015 мм, то есть 0.15 микрона. Для сравнения: г-н Mund говорил о типичных значениях точности станка порядка 5 микрон.

При предварительной размерной настройке инструмента с помощью лазерного устройства компании Renishaw тоже возникли определенные сложности. Дело в том, что некоторые фрезы оказались слишком маленькими, чтобы лазер мог их обнаружить. Если для г-на Cotton маленькие инструменты являются привычными (самая крупная фреза для торцевания заготовки имеет размер $\frac{3}{4}$ дюйма), то у посетителей его цеха это вызывает недоумение. “Некоторые приходят только для того, чтобы увидеть мои инструменты, поскольку не верят, что с такими можно работать. Многие смеются и говорят, что я над ними просто подшучиваю”, – сказал г-н Cotton.

По его словам, специалист компании Renishaw, которому была поручена перекалибровка лазерного устройства, посмотрев на фрезу диаметром 0.001 дюйма (0.0254 мм), отреагировал аналогично. Тем не менее, после перекалибровки удалось настроить лазерный луч толщиной 12 микрон так, чтобы он обнаруживал 0.001-дюймовый инструмент и позиционировал его с точностью ± 0.00025 дюйма (примерно ± 6.35 микрон) по высоте и ширине.

Конечно, если исходная САД-модель построена с недостаточной точностью, то уже не имеет значения, какими характеристиками обладают все описываемые средства. Поэтому на начальной фазе работ проводятся интенсивные консультации с заказчиками, цель которых – убедиться, что 3D-модели корректны (*up to par*), а весь проект в целом является технологичным (*machineable*). Так, компания-изготовитель может внести предложения об изменении радиусов [скруглений] или каких-либо других размеров. “Вы можете намоделировать всё, что душе угодно, однако совершенно необязательно, что существует реальный способ изготовить это на станке”, – отметил г-н Cotton.



Аневризма – это патологическая выпуклость в стенке артерии. Зажим клипсой препятствует разрыву аневризмы и кровотечению в мозг

Именно поэтому компания MPPM обращается к каждому заказчику с просьбой предоставить PDF-файл чертежей, которые детализируют спецификации для каждой заказываемой детали. Затем компания осуществляет полную проверку всей модели. Степень участия заказчика в этом процессе зависит от глубины необходимых корректировок. Как бы то ни было, САД-функционал системы Mastercam является достаточно развитым, что позволяет компании MPPM в случае необходимости вносить изменения самостоятельно, говорит г-н Cotton.

Самое слабое звено?

Как подчеркнул г-н Cotton, тот факт, что компании MPPM понадобилось подбирать параметры настройки Mastercam, чтобы обеспечить высокую точность [расчета траекторий инструментов за разумное время], совершенно не означает, что это является недостатком системы. Скорее можно говорить о том, что необходимый MPPM уровень детализации траекторий далеко выходит за пределы потребностей обычных пользователей. По его мнению, можно было и без помощи компании In-House Solutions самостоятельно произвести настройку точности, используя стандартный функционал Mastercam, что является ценным качеством системы. “Прелесть этой системы состоит в том, что можно сказать ей, какой должна быть точность, и она будет генерировать траекторию с той точностью, которую мы указали для каждой конкретной работы”, – отмечает г-н Cotton.

Точность расчетов, проводимых системой, определяется такими параметрами, как:

- расстояние до хорды (*chordal height*);
- отклонение формы реальной поверхности от идеальной (*surface deviation*);

- линейная и дуговая точность;
- расстояния между проходами (*stepover*).

Предусмотрены и другие максимально допустимые отклонения для траектории инструмента. У пользователей есть возможность осуществлять настройки этих параметров в определенном диапазоне, однако, как считает г-н *Mund*, многие просто не принимают это во внимание.

Он пояснил, что диапазон изменения параметров системы *Mastercam*, установленный по умолчанию, по существу отражает компромисс между скоростью вычислений и точностью. Если увеличивается точность траектории инструмента, то растёт и время расчета – именно поэтому компании *MPPM* пришлось приобрести более мощный компьютер. Большинство пользователей не располагает аппаратными средствами, способными обеспечить расчет траектории с экстремально высокой точностью, да и не нуждается в этом, отмечает г-н *Mund*. Стандартные настройки *Mastercam* вполне достаточны для абсолютного большинства задач обработки и не требуют огромных вычислительных ресурсов.

Тем не менее, для некоторых областей применения, как показывает случай с компанией *MPPM*, установленные по умолчанию минимальные значения точности оказались недостаточными. Когда *In-House Solutions* и *MPPM* вместе занимались настройкой системы, они не повысили значение точности в общепринятом смысле, отметил *Ajmer Gill*, технический специалист компании *In-House*. Представители поставщика системы просто помогли расширить нижние пределы диапазона, в котором пользователь может выбирать необходимые допуски.

В частности, они продемонстрировали, как настроить постпроцессор, который непосредственно управляет процессом формирования УП. По умолчанию для постпроцессора была указана точность с четырьмя знаками за запятой, но для задач *MPPM* этого оказалось недостаточно. Теперь, по словам г-на *Gill*, они научились управлять настройками и могут указывать для каждой траектории свои параметры – например, задать расстояние между проходами любым числовым значением, не превышающим глобального минимума.

Компания *MPPM* эту возможность интенсивно использует, причем точность зачастую настраивается не только для отдельной детали, но и для отдельных операций при изготовлении одной детали. Например, можно выполнить операцию черновой обработки при одном значении расстояния между проходами, а затем увеличить точность для финишной обработки.

Естественно, что чем выше точность, требуемая при изготовлении детали, тем выше и стоимость работы компании *MPPM*. “Если

необходимо качество финишной обработки, близкое к зеркальной поверхности, вам следует увеличить точность”, – поясняет г-н *Cotton*. – “Значит нужно сделать один или два черновых прохода и три чистовых. При этом для каждой следующей операции уменьшается предельное значение расстояния между проходами. Кроме того, меняется инструмент, установка которого проверяется с помощью лазерного устройства. Всё это требует времени, а время – это деньги”.

Сторонняя помощь

Для того чтобы изготовить клипсу анеризмы за разумное время, помимо повышения точности расчета траекторий в САМ-системе, г-ну *Cotton* пришлось решить и множество других проблем. Это потребовало значительных усилий и времени, уверенности в собственных силах, а также знаний и изобретательности. Как уже упоминалось выше, *In-House* была не единственной компанией, поделившейся своим опытом для того, чтобы процесс изготовления деталей сложился в своей окончательной форме. А г-н *Cotton* был рад принимать полезные советы и поддержку от тех, чьим долгом это является.

Так, компания *Haas* порекомендовала установить на фрезерном станке *OM-2A* серии *Office* дополнительный воздушный (пневматический) шпиндель от компании *NSK*. Таким образом, скорости вращения шпинделя выросли до 200 000 оборотов в минуту (вместо прежних 40 000), что дало возможность вести обработку твердого материала еще более мелким режущим инструментом, чем прежде. Модификация станка в совокупности с применением заложенных в систему *Mastercam* возможностей трехмерной обработки поверхностей стратегиями, обеспечивающими постоянную высоту гребешка (*scallop toolpath*), а также функционала высокоскоростной обработки (ВСО), обеспечили снижение силы резания до уровней, позволяющих избежать поломки тонких инструментов.

Стоимость режущих инструментов вначале была высокой. Их проектирование г-н *Cotton* выполнил сам, а поставку армированных (а не покрытых!) алмазом инструментов (*diamond-impregnated*) осуществила специализирующаяся на оснастке компания *DiamonBurrs.net* по цене приблизительно \$40 за штуку. Однако как только опытные образцы были отработаны, компания смогла предложить уже оптовую цену, которая уменьшилась до \$1.

Г-н *Cotton* пояснил, что он мог бы даже не надеяться достигнуть необходимой точности без устройства лазерного измерения и настройки инструментов, поставляемого *Renishaw*. Что касается возможности применения других приспособлений для определения величины

коррекции инструмента (*setting tool offset*), имеющихся у компании *MPPM*, то прикосновение кромки 0.005-дюймовой (0.127 мм) фрезы к стальной пластине традиционного устройства настройки инструмента или ослабление пружины привело бы к поломке инструмента. Важно отметить, что чем меньше инструмент, тем меньше величина предельного значения ошибки, вызванной его износом или отклонением. Для крошечных инструментов, необходимых компании *MPPM*, ошибка всего в одну сотую миллиметра на диаметре, по высоте *Z* или ширине может привести к браку при изготовлении детали. Именно поэтому компания практикует лазерную настройку инструмента после его каждой замены для обеспечения последовательности обработки. Несмотря на то, что эта процедура удлиняет процесс, она гарантирует точность обработки сверхмаленьких деталей.

Планы на 2010 год

Возможность создания высокоточных траекторий обработки не была единственным фактором, позволившим компании *MPPM* достаточно

быстро изготовить опытные образцы клипсы в соответствии с требованиями заказчика. Однако именно она оказала существенное влияние на перспективы компании в целом. Ответственное решение г-на *Cotton* взяться за выполнение работы, от которой отказались другие производители и которая требует достижения предельных характеристик, заставили компанию и его самого превзойти самих себя. Теперь *MPPM* подготовлена к увеличению доли сверхсложных работ, выполняемых на пределе возможностей.

Более того, 2010 год для компании *MPPM* обещает быть очень значимым. Это в большой степени связано с планами выпуска клипсы аневризмы, невидимой при проведении МРИ или КТ. Сейчас зажимное устройство находится на начальной стадии тестирования [\[в разрезающей институции\]](#), и *MPPM* рассчитывает начать серийное производство. Несмотря на то, что компания уже достаточно серьезно продвинулась с момента изготовления опытных образцов, г-н *Cotton*, тем не менее, планирует еще больше усовершенствовать и ускорить производственный процесс. 