

От массового производства — к производству на заказ

Заказное производство требует гибко настраиваемых решений на основе станков с ЧПУ. На ежегодной пресс-конференции компании Delcam plc, где побывал и наш корреспондент, были представлены возможности программных продуктов для моделирования, изготовления и контроля изделий и технологической оснастки сложной формы. Особое внимание было уделено взаимодействию программных решений со станками с ЧПУ

Елена ПОЛОНСКАЯ

Времена гигантских конвейеров уходят в прошлое. Вздумай сегодняшний предприниматель объявить, подобно Форду: «Вы можете выбрать автомобиль любого цвета, если этот цвет — черный», — его бизнес быстро прогорел бы, но еще раньше такого бизнесмена, скорее всего, подняли бы на смех.

Потребители все чаще стремятся покупать товары «не как у всех». Такую необходимость диктует и природа: обувь, сшитая по ноге, гораздо удобнее, чем сделанная по стандартной колодке, а индивидуально спроектированный мотолшлем не только отлично

выглядит, но и лучше защищает голову.

Современное производство вполне готово к таким запросам. Станки с ЧПУ и системы для реинжиниринга способны быстро и качественно выполнять индивидуальные заказы любой степени сложности. Технологии быстрого прототипирования¹ позволяют быстро создавать физические прототипы изделий по компьютерным 3D-моделям, оборудование для высокоскоростной механообработки ускоряет производство деталей и оснастки, а пятикоординатное фрезерование повышает качество и точность обработки и по-

зволяет создавать детали сложной формы за один технологический установ.

Delcam plc — английская компания, уже более четверти века выпускающая программное обеспечение для моделирования, изготовления и контроля изделий сложной формы и технологической оснастки. Потребность в таких программах возникает все чаще по мере того как возрастает сложность изделий, обусловленная требованиями эргономики или необычным дизайном. Кроме того, предприятия переходят от крупносерийного производства к заказному, когда каждое изделие выполняется индивидуально для конкретного клиента и в соответствии с его требованиями.

Одной из главных особенностей программного обеспечения Delcam plc является стремление оптимально использовать возможности станков с ЧПУ, чтобы операции выполнялись как можно более быстро и качественно, а износ оборудования и инструмента был бы минимален. Для проектирования изделий Delcam plc предлагает комплекс программных



Индивидуально спроектированный мотоциклетный шлем не только отлично выглядит, но и лучше защищает голову

¹ См. также КПД № 1/2007

продуктов, включающий в себя гибридную САД-систему PowerSHAPE, систему для реинжиниринга CoreCAD, а также систему ArtCAM для создания сложных пространственных рельефов, в том числе декоративных элементов и текстур. Для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ компания Delcam plc предлагает САМ-систему PowerMILL, особенно эффективную при подготовке управляющих программ для фрезерных станков с использованием возможностей непрерывного пятиосевого и высокоскоростного фрезерования. Для подготовки УП для производства изделий относительно простой формы предлагается простая в освоении и использовании САМ-система FeatureCAM, основанная на автоматическом распознавании типовых элементов. Обработку на многозадачных токарно-фрезерных центрах и автоматах продольного точения можно эффективно разработать с помощью САМ-системы PartMaker. Для контроля точности изготовления продукции при помощи координатно-измерительных машин (в том числе и измерительных манипуляторов типа «рука») используется пакет PowerINSPECT.

Для досконального тестирования разрабатываемого ПО на реальном оборудовании головной офис компании Delcam plc в Бирмингеме имеет собственное опытное производство, оснащенное самыми современными станками с ЧПУ. Перед тем, как новые версии программного обеспечения попадут к пользователям, программные решения «обкатываются» на сложных тестовых изделиях, предложенных самими за-



Все программное обеспечение Delcam plc проходит «обкатку» и доводку на собственном опытном производстве — на реальных заказах



казчиками. Также программные средства Delcam plc проходят тестирование в проектах AMRC (Advanced Manufacturing Research Centre, Исследовательский центр передового производства), организованном Шеффилдским университетом совместно с авиационной корпорацией Boeing².

В этой статье мы продемонстрируем ряд подходов Delcam plc к программированию станков с ЧПУ. Более подробно о продуктах компании и их использовании в производстве читайте в следующих выпусках журнала.

Трибридное моделирование

Ранее концепция глобального моделирования, представляющая собой комбинацию поверхностного, твердотельного и каркасного (триангуляционного) 3D-моделирования, могла быть реализована только при совместном использо-

вании нескольких продуктов семейства Power Solution компании Delcam plc, например, PowerSHAPE Pro и CoreCAD или ArtCAM. Комбинация поверхностного и твердотельного моделирования уже давно применяется в гибридных САД-системах, к которым относится и PowerSHAPE. Однако возможность сочетания гибридного и каркасного 3D-моделирования в едином пространстве САД-модели во многом остается уникальной возможностью продуктов компании Delcam plc. В новой версии PowerSHAPE разработчики объединили в одном продукте возможности гибридного и триангуляционного моделирования, — такая комбинация получила название «трибридного моделирования» (Tribrid Modelling). Предлагаемые ею функциональные возможности идеально подходят для решения задач обратного инжиниринга.

²См. также «Завод будущего», с. 68.



После пресс-конференции Управляющий директор компании Delcam plc Хью Хэмфрис (Hugh Humphreys, слева) провел для журналистов экскурсию по головному офису компании в Бирмингеме. Наибольший интерес у экскурсантов вызвал музей компании, в котором собраны самые разнообразные образцы продукции ее заказчиков

Компании Delcam plc удалось разработать технологию гибридного моделирования благодаря интеграции программы для реинжиниринга и каркасного моделирования SolidWorks с более ранней версией гибридного 3D-моделировщика PowerSHAPE Pro. Теперь дизайнеры могут легко добавлять и редактировать в САД-системе 3D-данные, полученные методом реинжиниринга.

Трибридное моделирование представляет собой нечто большее, чем просто реализованные в одном продукте функции поверхностного, твердотельного и каркасного. Например, большие изменения коснулись инструментов построения и исправления 3D-модели, ранее доступных только в SolidWorks для редактирования триангулированных файлов (облака точек). Эти инструменты позволяют создавать высококачественные 3D-модели из триангулированных данных плохого качества, полученных методом обратного инжиниринга из поврежденного физического объекта. С помощью этих инструментов могут быть сглажены шероховатые поверхности, заполнены разрывы, а также добавлены точки в «разреженные» области.

Объединение функциональных возможностей PowerSHAPE и SolidWorks упростило, ускорило и сделало более точным создание САД-поверхностей из триангулированных данных. Теперь пользователь контролирует процесс разделения 3D-данных на поверхностные и триангулированные элементы. Каждый триангулированный участок может быть конвертирован в поверхностную САД-модель путем генерирования сетки кривых с последующим ее проецированием на сетку треугольников. Поверхности генерируются внутри полученной сетки кривых с помощью функции PowerSHAPE Smart Surfacing — она автоматически анализирует кривые и определяет наиболее подходящий способ построения поверхностей. Также доступны функции анализа геометрии, позволяющие, например, отобразить разницу между сеткой треугольников и результирующей поверхностью. Такой анализ может показать, например, что расстояние между кривыми в определенных местах должно быть меньше, чтобы был соблюден допуск между генерируемыми поверхностями.

Еще одно преимущество, полученное в результате ин-

теграции каркасного моделирования в PowerSHAPE Pro, заключается в возможности создавать «идеальную» геометрию в тех областях, где обычная система реинжиниринга дает аппроксимированный результат. Например, если в топологии модели присутствует заведомо плоская поверхность, система реинжиниринга всегда создаст поверхность с «рябью» или другими отклонениями. В PowerSHAPE Pro 8 можно удалить такую область и заменить ее идеальной плоской поверхностью. Также скругления, получаемые методом реинжиниринга, не имеют постоянного радиуса по длине, — в PowerSHAPE Pro 8 их можно заменить скруглениями с постоянным радиусом.

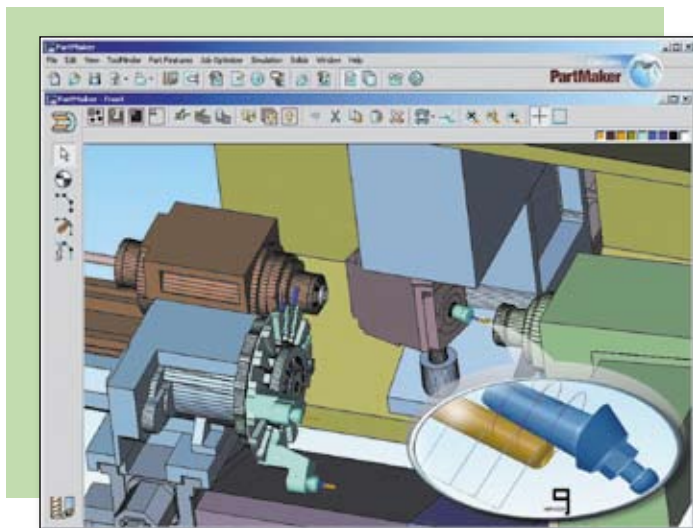
Данный подход может использоваться и при разработке новых изделий, если они, как это обычно бывает, создаются на основе существующих физических прототипов, изготовленных в свое время без использования САД-системы. Часто оказывается, что гораздо быстрее оцифровать физический образец и затем доработать оцифрованную модель, чем создавать цифровую модель в САД-системе «с нуля».

В новой версии PowerSHAPE разработчики объединили в одном продукте возможности гибридного и триангуляционного моделирования, — такая комбинация получила название «трибридного моделирования»

Обработка на многозадачных станках

С помощью САМ-системы PartMaker можно разрабатывать управляющие про-





Delcam PartMaker позволяет создавать управляющие программы для одновременной обработки деталей в шпинделе и протившпинделе по нескольким осям несколькими инструментами

учению и более легкому использованию системы. Суть визуального программирования обработки заключается в активном использовании схематичных изображений и пиктограмм, что помогает технологу быстро и правильно описать обрабатываемый элемент детали и инструмент, а также задать параметры обработки.

Автоматы продольного точения (Swiss type) для экономии времени способны одновременно вести обработку передней части детали в шпинделе, а задней — в протившпинделе. Переустановка детали из шпинделя в протившпиндель происходит автоматически. До появления PartMaker синхронизация обработки деталей в шпинделе и протившпинделе производилась вручную. Теперь же САМ-система PartMaker позволяет всего за несколько манипуляций мышью правильно синхронизировать работу инструмента на многошпиндельном станке. Для этого вся обработка в PartMaker условно делится на относительно простой набор последовательных операций, выполняемых в шпинделе и протившпинделе, которые выстраиваются на единой «шкале времени». Как уже отмечалось, время для каждой элементарной операции вычисляется, исходя из заданных режимов обработки. Каждая элементарная операция выполняется в строго заданный интервал времени, и обозначается графически полоской, длина которой соответствует времени выполнения данной операции. Таким образом, пользователь составляет «расписание» для всех этапов. Перемещая элементарные операции обработки для шпинделя и протившпинделя по шкале вре-

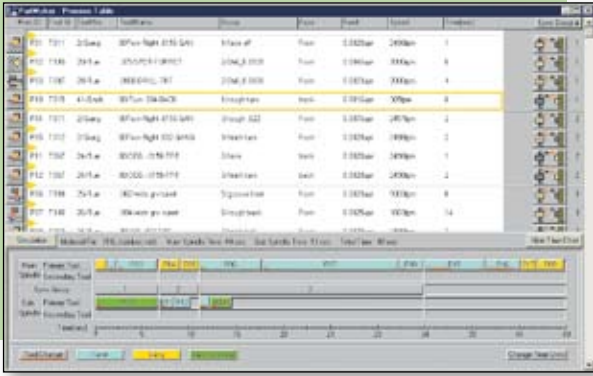
граммы для одновременной обработки деталей в шпинделе и протившпинделе по нескольким осям несколькими инструментами. Для программирования автоматов продольного точения используется модуль SwissCAM, для многозадачных токарно-фрезерных станков — TurnMILL, а для электроэрозионного оборудования — Wire EDM. Модульная структура PartMaker позволяет заказчику без лишних затрат приобрести программное обеспечение, полностью соответствующее возможностям используемого в данный момент на предприятии станочного оборудования.

Конструкция и архитектура многозадачных станков с ЧПУ становятся все сложнее. В ответ на эту тенденцию в последней версии, PartMaker 9, улучшены возможности по программированию обработки изделия непосредственно на основе твердотельной 3D-модели, а также усовершенствована симуляция обработки на станке.

PartMaker имеет специализированную базу знаний, где хранятся данные о геометрии применяемых в конкретном цеху инструментов, что позволяет контролировать их расположение в револьверных головках и ма-

газинах. В зависимости от того, где будет выполняться обработка — в шпинделе или протившпинделе, — PartMaker автоматически вносит необходимую коррекцию на инструмент, выбирает оптимальные для данного материала скорость резания и подачи — отдельно для обработки каждого вида элементов детали. На основе скорости подачи и геометрии детали PartMaker автоматически вычисляет время выполнения каждой операции с учетом подвода и отвода инструмента — результат этого расчета используется при синхронизации работы станка. В базе знаний также есть информация о станочном оборудовании и используемых материалах. Применение базы знаний освобождает технолога от необходимости повторного ввода данных при обработке аналогичных элементов детали, что позволяет уделить больше внимания функциям управления инструментом.

PartMaker является пионером ЧПУ-программирования многозадачных многоосевых токарных станков с вращающимся инструментом. В PartMaker используется запатентованная технология визуального программирования обработки. Эта уникальная технология способствует более быстрому из-



мени, пользователь может минимизировать время обработки детали имеющимся в его распоряжении инструментом на данном станке. Функция визуализации обработки, использующая точные размеры детали, инструмента и станка, позволяет избежать их возможных столкновений во время работы.

Для качественной 3D-визуализации процесса обработки в PartMaker имеется твердотельный моделировщик. Эта функция автоматически, по заданным пользователем размерам, создает 3D-геометрию детали (для всех этапов обработки) и инструмента. Изображение 3D-модели детали и инструмента можно масштабировать и вращать, тем самым полностью контролируя результат.

Управляющий G-код генерируется автоматически на основе используемого для конкретного станка постпроцессора. В SwissCAM есть готовые постпроцессоры для большинства автоматов продольного точения; при необходимости для редкого станка может быть написан собственный постпроцессор. Постпроцессор SwissCAM создает G-код в формате, рекомендованном производителем станка. Однако с помощью утилиты ConfigPost можно преобразовать G-код в привычный оператору вид. Созданный G-код можно проинспекти-

PartMaker позволяет всего за несколько манипуляций мышью синхронизировать работу инструмента на многошпиндельном станке. Для этого вся обработка условно делится на относительно простой набор последовательных операций, выполняемых в шпинделе и протившпинделе, которые выстраиваются на единой «шкале времени»

ровать и при необходимости отредактировать. Коды ожидания, определяющие очередность выполнения операций и ответственные за синхронизацию работы станка, также вставляются в G-код автоматически.

Таким образом, в SwissCAM полностью автоматизированы все процедуры, которые можно возложить на компьютер. Разрешить коллизии инструмента, станка и детали можно путем графического выбора вариантов, ничего не вычисляя. Кроме того, при программировании обработки в SwissCAM пользователю нет необходимости помнить о текущем положении инструмента, магазина и головок — все это также «помнит» программа.

Адаптивная обработка

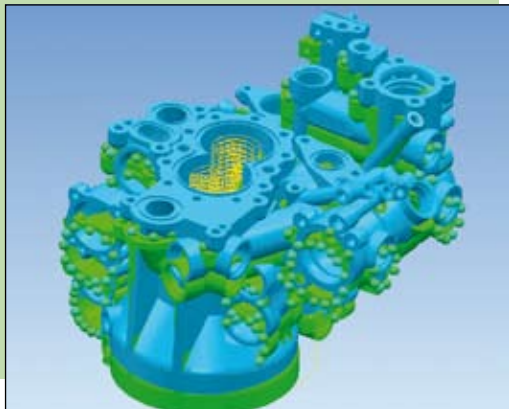
Традиционная взаимосвязь между механообработкой и контролем точности изготовления изделия заключается в том, что сначала выполняется механическая обработка, а затем изделие передается на специализированное инспекционное оборудование, где обработанная деталь либо проходит контроль точности, либо забраковывается. Поскольку методы механообработки становятся все разнообразнее, а изделия все сложнее и больше по размеру, растет число случаев, когда более тесная интеграция между обработкой и контролем может повысить производительность и уменьшить убытки производства. Вместо простого последовательного перехода по цепочке от CAD и CAM-систем к механической обработке и контролю точности компания Delcam plc предлагает использовать более сложные процессы, позволяющие получить промежуточные дан-

ные на различных стадиях механообработки. Эти процессы получили общее название «адаптивная механическая обработка».

Программирование большинства операций механической обработки основано на знании трех фактов: положения заготовки в станке (технологического установа), начальной формы заготовки и конечной формы детали. Адаптивные методы позволяют проводить успешную механообработку даже в тех случаях, когда по крайней мере один из трех названных факторов неизвестен. Это достигается за счет дополнительных измерений в процессе обработки.

У компании Delcam plc накоплен большой опыт в области внедрения новых методов механообработки. Delcam plc уже много лет успешно развивает CAM-систему PowerMILL, лидирующую в сегменте Hi-End систем для механообработки, а также универсальную, не «привязанную» к аппаратным средствам измерения какого-либо производителя систему для контроля точности изготовления PowerINSPECT. Интеграция PowerMILL и PowerINSPECT позволила создать технологию с принципиально новыми возможностями.

Виртуальное базирование. Большинство ситуаций, когда применяются методы адаптивной механообработки, связаны с незнанием точного положения заготовки на станке. Такие проблемы базирования часто возникают с относительно большими изделиями, такими как элементы ракетносителей, пресс-формы для приборных панелей автомобилей, оснастка для панелей автомобильных кузовов и т. п. Для таких изделий достижение правильного положения припуска на станке — глав-



ная проблема, занимающая много часов на проверки и регулировки. Часто бывает проще приспособить траекторию инструмента под конкретный технологический установ, нежели правильно сориентировать положение заготовки, чтобы обеспечить необходимый технологический припуск. Вначале компания Delcam применила этот подход в механообработке отдельных геометрических элементов; теперь эквивалентное решение доступно и для изготовления сложных форм и поверхностей, позволяя получить те же преимущества: снизить затраты немашинного времени на установку изделия в станке, повысить точность и уменьшить количество брака.

Первая стадия заключается в определении пространственной ориентации детали в станке при помощи инспекционного программного обеспечения. Измерения делаются до начала обработки и непосредственно на время резания не влияют. На этом этапе производятся лишь замеры положений характерных точек заготовки, на основе которых затем вычисляется оптимальное расположение детали в заготовке при равномерном распределении припуска на обработку. Любые погрешности между фактическим положением детали в технологическом

Виртуальное базирование позволяет вычислить различие между теоретическим положением компонента и его фактическим положением на станке

Адаптивная механическая обработка позволяет расположить деталь в пределах припуска на обработку, чтобы равномерно распределить материал вокруг окончательной формы

приспособлении и номинальным (теоретическим) положением, используемым в САМ-системе для генерации траектории инструмента, могут быть математически скомпенсированы. Для компенсации погрешностей установки в управляющую программу станка вводятся поправки, учитывающие сдвиг и поворот детали в приспособлении.

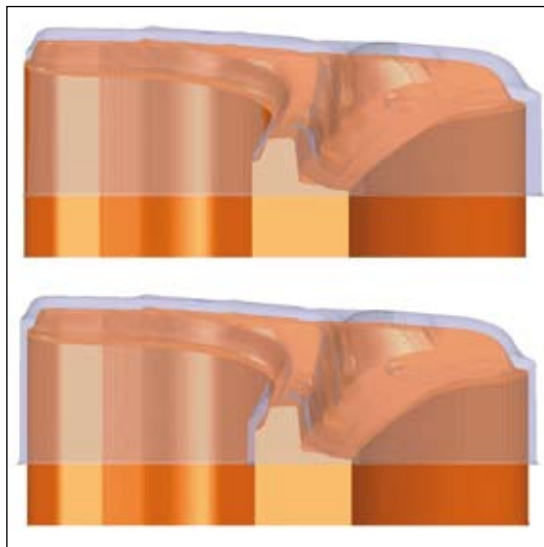
Контроль на станке. В концепции OMV (On-Machine Verification, контроль на станке) проверяется точность изготовления детали на станке при помощи аппаратных средств самого станка. Это позволяет выполнять промежуточные контрольные измерения, не снимая деталь с зажимного технологического приспособления. Главное преимущество метода OMV заключается в том, что он позволяет обнаружить ошибки прямо на станке, где они могут быть сразу же исправлены, без повторной установки детали и контроля точности базирования заготовки, что позволяет сэкономить много времени.

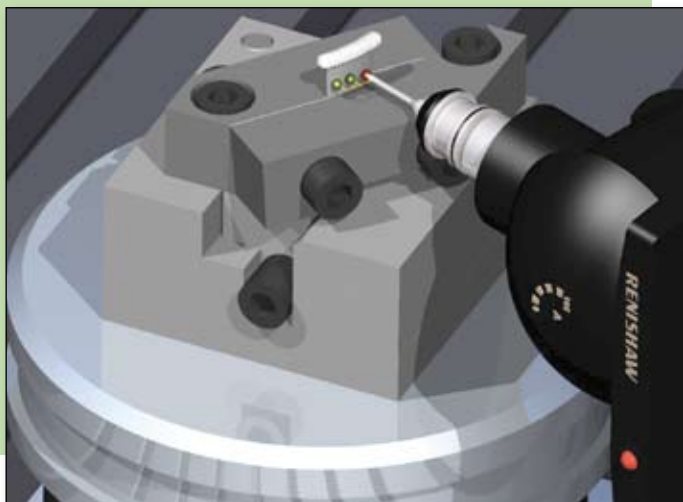
Наиболее явно преимущества метода контроля на станке видны для тех компаний, у которых нет возможности приобрести контрольно-измерительное

оборудование нужных размеров. Но даже если у компании уже имеется оборудование для заключительного контроля точности, OMV-технология также может дать огромную экономию времени, позволяя проверить правильность промежуточной обработки на всех стадиях производственного процесса. Это позволяет раньше обнаруживать ошибки, тем самым снизив стоимость и время их исправления. Например, можно легко проверить, оставлено ли на детали после черновой обработки достаточное количество припуска; не надо ждать завершения чистовой обработки, чтобы увидеть, что на каком-то этапе ранее была допущена ошибка. Точно так же может быть оценена степень любого повреждения детали, вызванного, например, внезапной поломкой инструмента, что позволяет быстро принять решение относительно целесообразности дальнейшей обработки детали.

Конечно, есть множество «ручных» методов для выполнения подобных проверок на промежуточных этапах механообработки. Однако, как и все ручные операции, они занимают много времени и сильно зависят от «человеческого фактора». Кроме того, такие методы контроля должны быть явно обозначены конструктором на чертеже, в то время как многие заказчики уже сегодня предпочитают предоставлять файл с трехмерной САД-моделью. Таким образом, OMV-технология, основанная на трехмерной геометрии САД-модели, является более автоматизированной и прогрессивной, чем ручные измерения.

Технология OMV также принесет пользу тем компаниям, клиенты которых настаивают на независимом





Результаты измерений в PowerINSPECT представляются очень наглядно — в виде зеленых, красных или синих точек, в зависимости от того, находится ли конкретная точка в пределах, выше или ниже допуска

обработать результаты измерений. Чтобы интерпретировать полученные данные, не потребуются услуги метролога — для контроля на станке можно использовать программное обеспечение PowerINSPECT. Его легко освоит обычный оператор; кроме того, в нем есть набор инструментов и типовых процедур для быстрого сравнения набора полученных данных с геометрией изделия, заданной в САД-системе. Результаты OMV-измерений представляются в виде отчетов в предельно ясной и полной форме, что делает их понятными всем специалистам, вовлеченным в производственный процесс, а не только метрологам. Интерфейс PowerINSPECT, построенный по принципу пошагового «мастера» (wizard), позволяет легко провести инспекционные замеры в нужной последовательности. Моделирование процессов измерения на компьютере позволяет исключить любые столкновения элементов станка, оснастки и детали. Система PowerINSPECT также гибко настраивается и позволяет выполнять дополнительные измерения в любых вызывающих сомнения зонах.

Результаты измерений в PowerINSPECT представляются очень наглядно — изначально они отображаются в виде зеленых, красных или синих точек, в зависимости от того, находится ли конкретная точка в пределах, выше или ниже допуска. В настраиваемом отчете сразу видно, какие элементы обработаны точно, а на какие следует обратить особое внимание.

Обработка поверхностей, близких по форме к заданным. Большинство случаев, когда точная начальная форма изделия неизвестна, явля-

контроле. Если выполнять начальную проверку прямо на станке, то ошибки могут быть обнаружены и исправлены сразу же — не придется ждать, пока деталь проверит независимый инспектор и укажет на недоработки.

Некоторые компании, уже имеющие подходящее контрольно-измерительное оборудование, ошибочно полагают, что контроль на станке — ненужная операция, лишь занимающая время, которое можно было бы использовать для механической обработки детали. Тем не менее, если рассмотреть процесс в целом, OMV имеет значительный потенциал, позволяющий сократить сроки поставки. Если после передачи на специализированное контрольно-измерительное оборудование обнаружатся ошибки, то изделие придется возвращать на станок и повторно устанавливать в зажим для повторной обработки. Это отнимает много времени в любом случае, а для больших и тяжелых деталей, таких как пресс-формы для панели автомобильного кузова, может занять несколько часов. Кроме того, при повторной установке детали на станке возможны новые ошибки.

OMV-технология позволяет проверить любой элемент на каждой стадии обработ-

ки. Контрольный осмотр на специализированном измерительном оборудовании выполняется только один раз в конце производственного процесса. Такая проверка, в отличие от контроля на станке, даст полную гарантию того, что обработка выполнена с соблюдением заданных допусков погрешностей. Конечно же, нельзя полностью полагаться на точность измерения станком, чтобы проверить его собственную работу. Следует признать, что измерения, выполненные станком, в большинстве случаев уступают по точности специализированным контрольно-измерительным комплексам, работающим в помещениях с контролем температуры и влажности. Однако при обычных технологических операциях такой высокий уровень точности измерений нужен редко. Кроме того, точность измерения станком может быть легко проверена точно так же, как подтверждается инспекционная точность специализированных контрольно-измерительных комплексов.

Перемещение контрольных измерений из специализированных помещений на производственный участок означает возможность быстро и легко получить и

ются результатом обработки по принципу «приблизительно такой же» — литье,ковка, а также неточные методы восстановления, такие как сварка. Главное требование в этих случаях — равномерное распределение припуска материала вокруг желаемой формы, чтобы избежать как чрезмерной, так и недостаточной обработки. Другие преимущества заключаются в возможности получения гладкого перехода между обработанными и необработанными поверхностями, а также улучшенного контроля над подачей инструмента в момент врезания и выхода из материала.

В зависимости от степени неопределенности в форме поверхности может быть использовано как прямое, так и реверсивное проектирование. Как правило, при механической обработке аналогичных форм используется прямое проектирование, чтобы определить форму припуска. Такая обработка производится, по сути, методами виртуального базирования, описанными выше. Для того чтобы все обрабатываемые поверхности

имели достаточный припуск, заключительная форма, которая будет достигнута обработкой, должна быть сориентирована в пределах оболочки, представляющей собой стартовую форму.

Когда начальная форма изделия точно не задана, например, после восстановления изделия сваркой, для воссоздания геометрической модели изделия и обрабатываемых поверхностей может использоваться программный продукт Delcam CоруCAD. Тогда геометрия реального объекта сможет использоваться непосредственно САМ-системой для генерации траектории инструмента. Многие САМ-системы способны генерировать управляющие программы по каркасной (триангулированной) трехмерной модели. Таким образом, пользователь избавляется от необходимости создавать 3D САD-модель с привычным описанием поверхностей.

Обработка поверхностей произвольной формы. Самые впечатляющие операции адаптивной механической обработки относятся к

тем случаям, когда требуемая форма компонента точно не известна. Обычно это необходимо при восстановлении деталей, которые были изменены относительно их номинальной САD-формы в процессе эксплуатации, — например, лопатки турбореактивных двигателей, которые деформируются из-за резких перепадов температур и высоких нагрузок. Подобные проблемы возникают и при восстановлении оснастки, которая была изменена после изготовления, — например, штамповая оснастка может быть доработана для компенсации пружинения, поэтому ее фактическая геометрия поверхности может не соответствовать САD-модели.

В таком случае сначала надо промерить фактические поверхности изделия, чтобы определить степень их отклонения от САD-данных. Чтобы облегчить воссоздание фактической геометрии изделия, за основу может быть взята исходная теоретическая САD-модель. Средствами морфинга моделировщика PowerSHAPE теоретические обводы могут быть подогнаны к фактическим, после чего в PowerMILL могут быть сгенерированы управляющие программы для обработки необходимых элементов.

Резюме

Это лишь некоторые принципы, которыми руководствуется компания Delcam при производстве своей продукции. Как видим, кратко их можно сформулировать так: максимально эффективное использование имеющихся аппаратных средств и максимально надежное программное обеспечение, позволяющее свести к минимуму сбои в работе дорогостоящего оборудования. ¶

При восстановлении турбинной лопатки сначала должна быть определена ее реальная форма. Затем, чтобы гарантировать точную механическую обработку при ремонте лопатки, используется адаптированная САD-модель

