

Внедрение HSM фрезерования в современном производстве

Внедрение современных высокопроизводительных станков с ЧПУ в производство невозможно без знания принципов высокоскоростной механической обработки (**HSM** — *High Speed Machining*) и сопутствующих ее освоению проблем.

Высокоскоростное резание за последние пять лет совершило революционный переворот в методах механообработки. Решающий фактор в оценке процесса HSM обработки — производительность станков, которые определяют стоимость производства и, таким образом, амортизацию инвестиций.

В мировом станкостроении сегодня наблюдается устойчивая тенденция создания станков, предназначенных для HSM обработки. Достижения в области технологии создания режущего инструмента позволили эффективно применять HSM обработку в различных отраслях. Технология CAM сегодня бурно развивается, чтобы удовлетворить специфические потребности в создании новых стратегий движения инструмента для HSM.

В процессе конструкторско-технологической подготовки производства, генерации данных и во время механообработки может быть обнаружено множество факторов, которые влияют на качество детали. Иногда скрытые, иногда очевидные; они воздействуют на точность и шероховатость поверхностей, а также на время обработки. Все эти критерии постоянно находятся во взаимосвязи, и с ними обычно сталкиваешься по мере их возникновения. Механообработка является заключительным звеном единой комплексной задачи, решение которой последовательно проходит через системы CAD, CAM и ЧПУ.

Технология HSM относится к числу наиболее прогрессивных и быстро развивающихся. Вместе с тем, этот вид обработки резанием является относительно новым технологическим процессом, и опыт его исследования в России весьма ограничен.

Явление HSM

HSM обработка — одна из современных технологий, которая, по сравнению с обычным резанием, позволяет увеличить эффективность, точность и качество механообработки. Ее отличительная особенность — высокая скорость резания, при которой значительно увеличивается температура в зоне образования стружки, материал обрабатываемой детали становится мягче, и силы резания уменьшаются, что позволяет инструменту двигаться с большой рабочей подачей.

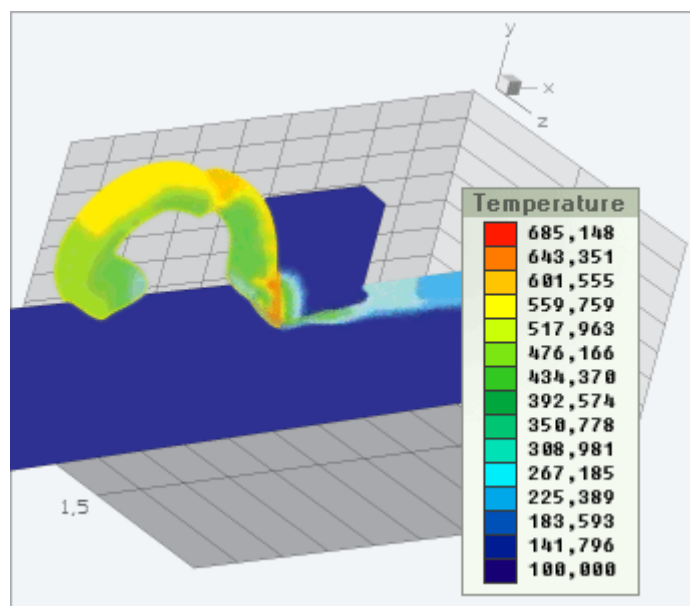
Первое официальное объяснение явления HSM было предложено Карлом Саломоном в 1931 году. Он предположил, что при некоторой скорости резания, которая является в несколько раз выше, чем при обычной механообработке, теплопередача от стружки к инструменту начинает уменьшаться. Невозможно (даже сегодня) в полной степени проверить теорию, предложенную Карлом Соломоном, и мы можем опираться только на результаты недавно осуществленных экспериментов и материалы конференций по HSM, регулярно проводимых за рубежом.

Эффект HSM обуславливается структурными изменениями материала (из-за пластических деформаций, осуществляемых с большой скоростью) в месте отрыва стружки. При повышении скорости деформаций силы резания первоначально растут, а потом, с достижением определенной температуры в зоне образования стружки, вдруг начинают существенно снижаться. Самое замечательное, что время контакта режущей кромки с заготовкой и стружкой так мало, а скорость отрыва стружки столь высока, что большая часть тепла, образующегося в зоне резания, удаляется вместе со стружкой, а заготовка и инструмент просто не успевают нагреваться. Данный эффект известен

давно. Поэтому в прошлом станочники иногда предварительно нагревали трудно обрабатываемые заготовки (например, из титанового сплава).

Формирование стружки — наиболее важный аспект HSM. Как известно, во время формирования стружки, 80% тепла образуется в зоне механической деформации материала, 18% — в зоне контакта стружка-инструмент, и 2% — в зоне трения режущей кромки инструмента о материал.

Как же происходит процесс теплообмена в зоне резания? Исследования, проведенные во время HSM обработки с правильно подобранными параметрами, показали, что 75% произведенного тепла отводится со стружкой, 20% — через инструмент, и 5% — через обрабатываемую деталь (см. рисунок).



Распределение температуры в зоне резания при HSM

Отсюда следует один из наиболее важных принципов теории HSM обработки: **наибольшее количество произведенного тепла отводится вместе со стружкой.**

HSM — это не просто механообработка с высокой скоростью резания. Это процесс, когда операции обработки (от черновой до финишной, и далее — до суперфинишной) выполняются **очень специфическими методами на специальном оборудовании.**

Наиболее полно принципы и возможности HSM реализуются при 5-ти осевом фрезеровании. Поэтому, в недалеком будущем HSM будет рассматриваться как 5-ти осевая механическая обработка, так как позволяет обрабатывать труднодоступные поверхности более эффективно, используя инструмент с меньшим вылетом. Единственная причина, почему 5-ти осевое фрезерование широко не применялась до настоящего времени — это то, что электродвигатели роторного типа часто не могут обеспечить крутящий момент, необходимый для тяжелого фрезерования. Но это не служит ограничением для процесса HSM, осуществляемого с небольшими силами резания.

Области применения HSM

HSM обработка используется, главным образом, в трех секторах промышленности.

Первая отрасль — промышленность, которая имеет дело с механообработкой алюминиевых сплавов для производства компонентов автомобилей, корпусов для приборов или медицинских устройств. Эта промышленность нуждается в высокопроизводительном процессе удаления металла, потому что технологический процесс состоит из многих операций механообработки.

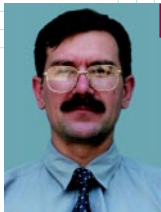
Вторая отрасль — авиационно-космическая промышленность, в которой производится механообработка крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов, часто с тонкими стенками. Экономически выгодно выполнить все операции обработки за одну установку.

Третья отрасль — инструментальная промышленность, в которой требуется производить чистовую обработку твердых материалов. В этой отрасли важно обработать детали с высокой скоростью и сохранить при этом высокую точность. Используя HSM, можно перепланировать процесс производства за счет сокращения стадий фрезерования электродов (ЕСМ) и электроэрозионной обработки (EDM).

Более подробно явление HSM описано в ряде статей журнала ["CAD/CAM/CAE Observer"](#) Часть 1,

Высокоскоростное фрезерование в современном производстве

(Продолжение. Начало в #3/2002)



Александр Степанов ("Инженерный консалтинг", Москва)

mail@e-consul.ru

Траектории режущего инструмента для HSM

✓ Проблемы развития САМ-систем для обеспечения HSM

Есть много факторов, от которых зависит эффективность процесса HSM. Хорошо известно, как влияют на него характеристики станка, шпиндель, инструментальные патроны, режущий инструмент и система ЧПУ. Однако далеко не всегда учитывается зависимость качества выполнения HSM от методов программирования траектории инструмента.

Возможности программного обеспечения CAD/САМ являются ключевыми в обеспечении эффективной HSM-обработки. Технология HSM начинается с создания соответствующих управляющих программ (УП), поэтому с появлением HSM возникли новые требования к САМ-системам и навыкам технологов-программистов. Качество УП в большой мере влияет на износ дорогостоящего станка, инструмента и на качество работы.

Ведущие мировые производители оборудования и режущего инструмента первыми предложили решения для использования новой технологии. Разработчики САМ поначалу не спешили признать необходимость новых стратегий в процессах резания, однако рынок заставил их развивать возможности САМ в направлении соответствия принципам HSM. При этом появились следующие вопросы:

- Каковы потенциальные проблемы развития САМ для HSM?
- Какова рыночная востребованность новых САМ-разработок?
- Какие новые стратегии, отличные от стандартных методов обработки, должны быть созданы для HSM, чтобы удовлетворить производителей оборудования и инструмента?
- Может ли САМ-система оптимизировать траекторию инструмента для сохранения постоянных усилий резания и большой рабочей подачи при постоянной скорости резания?

Существующие САМ-системы пока еще не учитывают многообразие форм обрабатываемых деталей и влияние инерции, возникающей в процессе механообработки, а также не решают проблемы, связанные непосредственно с особенностями конструкции станков. На сегодняшний день разработчики САМ предложили лишь общие решения специфических проблем, появляющихся при обработке каждой конкретной детали.

Например, чтобы получить УП, пригодные для HSM, часто приходится "реконструировать" геометрию детали. Под этим понимается создание некоторой новой геометрии с целью получения оптимальной траектории инструмента. Иногда разработчикам УП приходится вручную дорабатывать данные, полученные с помощью САМ. Однако, несмотря на все ограничения, современный рынок активно осваивает самое важное достижение в теории резания.

Надо отметить, что САМ-системы сегодня бурно совершенствуются, чтобы удовлетворить специфические потребности в создании новых стратегий движения инструмента. Современная САМ-система должна обеспечивать следующие основные критерии разработки УП для HSM:

- постоянство условий резания с сохранением постоянной толщины стружки;
- сопряжение по радиусу острых углов траектории для поддержания наилучших условий резания с минимальными потерями рабочей подачи;
- плавное соединение концов траектории при позиционировании;
- максимальная скорость отработки УП системой ЧПУ.

В связи с этим САМ-система должна уметь создавать проходы с маленьким шагом, которые будут выполняться на очень больших рабочих подачах. Для этого должны быть исключены резкие повороты, так как функция предварительного просмотра (*look-ahead*) системы ЧПУ автоматически уменьшает рабочую подачу в тех случаях, когда обнаруживает приближение точки смены направления движения. Целью является геометрически точное фрезерование изделий (например, деталей пресс-форм) с достижением такой шероховатости поверхности, чтобы финишная полировка была минимальной или даже полностью устранялась.

Кроме того, чтобы преодолеть известную проблему "голодания данных" (недостаточное быстроедействие системы ЧПУ при обработке сигналов ведет к уменьшению рабочей подачи), система САМ должна создавать специальные траектории инструмента, соответствующие возможностям систем управления HSM-оборудования (к примеру, использовать возможность отработки G-кодов на базе технологии NURBS).

Для получения оптимальной траектории инструмента в функциональные возможности САМ-системы должны входить следующие опции:

- исследование расстояния между слоями по оси Z;
- плавное соединение концов траектории;

- контроль наклона стенок детали и идентификация специфики геометрии.

Например, САМ-система должна изменять расстояния между слоями по оси Z таким образом, чтобы после предварительной обработки достигнуть почти окончательной формы с заданным значением припуска. Для этого САМ-система должна “воспринимать” изменения в рельефе поверхности между слоями и по значению остающегося припуска определять дополнительные проходы. Такие функциональные возможности помогут исключить полустивую обработку, уменьшить время обработки и износ режущего инструмента. Кроме того, САМ-система должна обеспечивать плавное врезание инструмента в материал заготовки (например, по спирали).

Отметим, что в последнее время все ведущие САМ-системы постоянно дополняются новыми функциональными возможностями, предназначенными для создания траектории инструмента для HSM-обработки. Кроме того, эти возможности служат для существенного улучшения условий резания и при обычном (не высокоскоростном) фрезеровании.

✓ **Принципы генерации траектории режущего инструмента**

Существуют следующие четыре принципа, которым должны быть подчинены все подходы к созданию УП для HSM:

1 Предпочтительны длинные траектории инструмента для резания с небольшой глубиной в осевом и радиальном направлениях.

2 Резание образующей вместо торцового фрезерования.

Окружная скорость прямо пропорциональна радиусу инструмента, и даже при высокой скорости вращения шпинделя она равна нулю в центре инструмента (на оси). Силы резания при HSM существенно уменьшаются в направлении осей X и Y, а вот в направлении оси Z – практически не изменяются. К тому же при торцовом фрезеровании эвакуация стружки затруднена, что очень негативно сказывается на процессе резания.

3 Плавное изменение условий резания: условия отвода стружки, усилия резания в осевом и радиальном направлениях и т.д.

Для современного инструмента из твердого сплава более благоприятна постоянная (пусть даже и высокая) температура в зоне резания, чем её колебания. Резкое изменение условий резания при врезании инструмента в материал приводит к увеличению количества выделяемого тепла и механических напряжений, что отрицательно сказывается на стойкости инструмента. Если траектория инструмента рассчитана при условии плавного изменения условий резания, то это позволит значительно увеличить стойкость инструмента, получить лучшую точность и шероховатость обработанной поверхности.

4 Плавные траектории инструмента.

Желательно применять функцию предварительного анализа траектории с соответствующим регулированием рабочей подачи (*look ahead and feed rate adjustment function*). Данная функция позволяет

предотвратить резкие врезания в материал, так как рабочая подача будет соответствовать запрограммированному значению только на плавных (особенно на прямолинейных) участках траектории, а перед резкой сменой направления движения инструмента рабочая подача будет постепенно уменьшаться до некоторого значения. К тому же при плавном изменении нагрузки на инструмент на механические узлы станка будут действовать наименьшие силы.

Очень часто деталь невозможно изготовить без использования траектории, предполагающей резкую смену направления движения инструмента, но такие случаи должны быть минимизированы. Разработчики САМ-систем работают над средствами, позволяющими достичь абсолютного отсутствия острых углов у траектории. Плавная траектория (на рис. 4 – справа) более подходит для HSM.

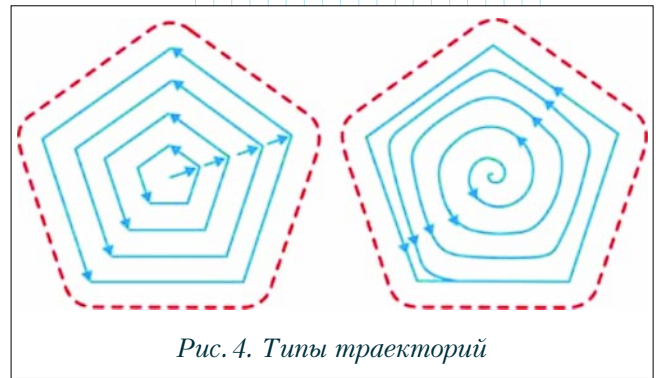


Рис. 4. Типы траекторий

✓ **Врезание инструмента**

Сила резания в направлении оси Z не уменьшается сколько-нибудь значительно при увеличении скорости вращения шпинделя. Врезание в твердый материал с большой рабочей подачей создаст большое напряжение в инструментальном патроне и шпинделе и, вероятней всего, приведет к повреждению инструмента. Необходимо всячески избегать вертикального врезания инструмента в материал (за исключением графита, алюминия и некоторых других мягких материалов).

Опускание режущего инструмента на величину прохода по оси Z рекомендуется производить в воздухе, а врезание в материал – в горизонтальном направлении по дугообразной траектории. Желательно и выход инструмента из материала осуществлять по дуге. При обработке кармана можно использовать такие функции САМ-системы, как HELIX и RAMP для выполнения врезания по спирали, причем угол наклона спирали рекомендуется задавать менее 2 градусов. Чем тверже материал, тем меньше должно быть значение угла врезания. Например, при обработке стали твердостью 62 ÷ 65 HRC рекомендуется задавать угол врезания не более 0.5 градуса.

✓ **Резание параллельными слоями**

Резание параллельными слоями (фреза движется последовательно слоями по горизонтальным плоскостям) – наиболее популярный сегодня метод

формирования траектории для предварительной обработки. К числу преимуществ этого подхода относится простота программирования при сохранении глубины фрезерования. Фактически эта техника механообработки связана со старыми типами фрезерных станков, для которых УП формировались в 2½-осевых САМ-системах.

Траектория инструмента при обработке параллельными слоями – это комбинация подъемов, опусканий и обычного двухосевого фрезерования (“зигзаг”). С одной стороны, такая техника механообработки не совсем подходит для *HSM*, так как при этом не контролируется, насколько большая часть фрезы будет в контакте с обрабатываемой деталью, и условия резания могут изменяться довольно резко. С другой стороны, эта техника наиболее предпочтительна для предварительной *HSM*-обработки. Глубина резания (это значение является одним из наиболее чувствительных параметров механообработки) хорошо контролируется, так как траектория инструмента остается двумерной на каждом слое. Необходимо контролировать только соединение траекторий инструмента при переходе от слоя к слою, что обеспечивается большинством современных САМ-систем.

При обработке параллельными слоями хорошо генерируются проходы для окончательной обработки боковых стенок карманов или островов. Однако для обработки плоских поверхностей (низ кармана или верх острова) такая техника не совсем подходит, и тут лучше применять другие методы. Хорошие САМ-системы обычно позволяют программировать траектории для обработки комбинированных поверхностей (*multi-surface*). Идеальные САМ-системы могут автоматически распознавать наклонные и горизонтальные поверхности и совмещать в одной программе разные методы обработки различных областей. Если же САМ-система не имеет подобных встроенных функций (что не является столь уж необычным явлением), то технолог-программист должен вручную комбинировать различные методы для обработки поверхностей разного типа.

На сегодняшний день наблюдается постоянный прогресс САМ-технологий, совершенствуется современный инструментарий создания различных стратегий обработки и множатся элементы сложных построений. Одновременно сохраняет свою актуальность **следующая задача**: разделить обрабатываемые поверхности на сегменты и с помощью различных методов программирования достигнуть оптимальной шероховатости поверхности при удовлетворительной стойкости инструмента. Сегменты могут быть разделены в соответствии с их естественными границами или же искусственно, с помощью функций САМ, доступных технолог-программисту.

Другая важная проблема обработки параллельными слоями – **изменение шага по оси Z**. Только некоторые САМ-системы автоматически определяют различные значения приращения по оси Z в зависимости от угла наклона стенок; большинство же – не может. Во втором

случае технолог-программист вынужден вручную разделять поверхность на области и указывать различные значения шага по оси Z, чтобы получить оптимальную шероховатость поверхности наклонных и вертикальных стенок.

✓ **Общие рекомендации для разработки УП для *HSM***

На основе практического опыта выработаны следующие рекомендации по программированию *HSM*-траекторий (порядок перечисления является произвольным и не зависит от значимости):

1 Обработка всегда должна вестись с образованием стружки. Тепло из зоны резания в основном отводится вместе со стружкой. При слишком низкой рабочей подаче стружка почти не производится. Вырабатываемое в процессе трения тепло будет отводиться только через инструмент и обрабатываемую деталь, что приведет к перегреву и преждевременному износу инструмента.

2 Если условия резания не могут быть постоянными в силу специфичной геометрии детали, то уменьшение значения шага по оси Z является наиболее эффективным способом улучшить резание. При уменьшении шага минимизируются случаи внезапного увеличения объема удаляемого материала при врезании фрезы в угол, которые приводят к повышению вибрации и ухудшению условий отвода стружки (тепла).

3 Попутное фрезерование рекомендуется и для предварительной, и для окончательной обработки. Во-первых, при этом получается поверхность с лучшей шероховатостью и происходит оптимальный отвод стружки. Во-вторых, существенно возрастает стойкость фрезы. Современные инструменты из твердого сплава лучше сопротивляются усилиям сжатия (что характерно для попутного фрезерования), нежели растяжения. При встречном фрезеровании толщина стружки увеличивается от нуля до максимума, что способствует выделению большого количества тепла, поскольку режущая кромка движется с большим трением.

4 Резание в одном направлении. При таком резании инструмент всегда будет находиться с одной стороны от материала, поэтому условия резания будут более однородными. Недостаток – большое время, затрачиваемое на холостые перебеги.

5 Минимум врезаний инструмента. При врезании количество стружки резко увеличивается, и в режущем инструменте возникает большое напряжение. Некоторые САМ-системы решают эту проблему автоматически.

6 Окончательная глубина фрезерования должна достигаться переменными шагами, чтобы для окончательной обработки оставался равномерный припуск. Излишний припуск может оказаться слишком большим для инструмента окончательной обработки, поэтому предосторожность в этом случае не помешает. Если используемая САМ-система не обеспечивает контроль величины припуска, необходимо добавить дополнительную траекторию между предварительной и окончательной обработкой.

7 Обработка “от центра – к периферии” и несколько чистовых проходов при обработке стенок.

Для предварительной обработки параллельными слоями, когда на каждом уровне инструмент движется по спирали, лучше генерировать траекторию “от центра – к периферии”. Это также позволяет добавить дополнительный проход при обработке боковых стенок кармана.

Но свои преимущества есть и у обработки “от периферии – к центру”, при которой уменьшаются случаи врезания инструмента по оси Z и в углах. Если в *CAM*-системе есть функция минимизации врезаний инструмента (*minimize tool burial*), то рекомендуется её использовать.

8 Желательно осуществлять предварительную обработку фрезами большого диаметра и оставлять припуск в углах для последующей доработки. Обработка углов с маленькими радиусами должна производиться инструментом малого диаметра, который не является в достаточной мере жестким для удаления большого количества материала, особенно когда инструмент имеет большой вылет (малое соотношение диаметра инструмента к его длине). *CAM*-системы позволяют удалять припуск, оставленный в углах, с помощью дополнительных фрез меньшего диаметра. Это особенно полезно, когда твердость материала высока.

9 Желательно использовать функцию *CAM*-системы “аппроксимация дугами”. Она служит для преобразования нескольких линейных сегментов траектории в одну дугу, что позволяет уменьшить размер УП и обеспечить постоянство рабочей подачи. Эта функция особенно полезна при интерполяции одновременно по трем осям. При этом значение точности интерполяции (*Tolerance*) должно быть на порядок выше, чем оставляемый припуск.

10 Предварительная обработка глубокого кармана с наклонными стенками более предпочтительна, так как её возможно выполнить с большой рабочей подачей, и при этом уменьшается износ инструмента. При обработке вертикальных стенок концевая фреза режет всей образующей, и резание осуществляется с большими усилиями. Желательно (пусть даже искусственным образом с помощью средств *CAD*) наклонить вертикальные поверхности. Этот метод создает дополнительные трудности при программировании обработки для 3-осевого станка.

При окончательной обработке сферической фрезой желательно обеспечить некоторый угол между осью фрезы и нормалью к обрабатываемой поверхности. Это достаточно легко выполняется при 4- и 5-осевой обработке.

11 Отход и подход к траектории должны производиться по дуге. Условия резания в таком случае изменятся плавно, и износ инструмента уменьшается.

12 Предварительную обработку наиболее предпочтительно осуществлять концевыми фрезами с небольшим радиусом (до 1 мм) на торце. Они могут сохранять свою целостность намного дольше, нежели фрезы без радиуса на торце или сферические фрезы.

13 Желательно, чтобы радиус инструмента для окончательной обработки был меньше радиуса угла – траектория инструмента будет плавной.

14 Необходимо контролировать процесс эвакуации стружки. Поскольку вместе со стружкой отводится тепло из зоны резания, очень важно контролировать процесс стружкообразования и распределение потока стружки, особенно при обработке глубокого кармана. Также важно избежать резания самой стружки при обработке закаленной стали, иначе режущие кромки инструмента будут повреждены.

15 Рекомендуется применять обильное охлаждение или работать вовсе без охлаждения. Целесообразность использования СОЖ повышается с уменьшением скорости резания. Процесс отвода тепла в большой степени зависит от своевременной эвакуации стружки, и для этого правильной будет использовать воздушную струю, поданную под большим давлением вместо охлаждающей эмульсии на водной основе. Поскольку в зоне резания создается высокая температура и большие центробежные силы, любая жидкость на водной основе вблизи от режущей кромки будет мгновенно превращена в пар, и какой-либо охлаждающий эффект будет отсутствовать. При этом жидкость будет на мгновение охлаждать режущую кромку, находящуюся в тот момент вне процесса резания. Эти тепловые удары приведут к преждевременному износу инструмента.

Необходимо заметить, что масляно-воздушная охлаждающая эмульсия в виде тумана служит в основном для смазки и уменьшения трения.

✓ Рекомендации для предварительной обработки

В процессе предварительной обработки сталей должны быть достигнуты две главные цели: высокая производительность (скорость удаления материала) и обеспечение высокой стойкости инструмента. При ближайшем рассмотрении процесса черного фрезерования можно заметить, что существуют различные концепции достижения этих, на первый взгляд противоположных, целей. На самом же деле, стойкость современного инструмента, как это ни парадоксально, гораздо выше при большой (соответствующей) рабочей подаче, нежели при заниженной. Иногда значение подачи на зуб является решающим фактором в обеспечении высокой стойкости фрезы. Поэтому при подборе оптимальных режимов резания значение скорости резания (v_c) варьируется довольно широко, в то время как значение подачи на зуб (f_z) почти не меняется.

“Классический” процесс черного фрезерования осуществляется фрезами, сделанными из быстрорежущей стали (*HSS*). Преимущество фрез *HSS* состоит в том, что они могут применяться даже тогда, когда жесткость станка невысока. Однако из-за низкой скорости резания значение рабочей подачи ограничено. К тому же стойкость такого инструмента существенно ниже по сравнению с твердосплавными фрезами, и обработка ими закаленных сталей практически невозможна.

Наиболее оптимально вести процесс чернового фрезерования сборными фрезами со вставками из твердого сплава или монолитными фрезами из твердого сплава (*HSC*). Геометрия режущих кромок должна способствовать снижению сил резания, чтобы фрезерование можно было осуществлять с высокой рабочей подачей. Жесткость, а следовательно, и стойкость такого инструмента достаточно высоки, что делает возможным обрабатывать закаленную сталь. Высокая скорость резания и большая температура в зоне резания способствуют уменьшению сил резания. Высокая скорость резания и большая рабочая подача обуславливают большую производительность (даже при обработке закаленной стали). Фактор, ограничивающий эффективность данного процесса, – малое сечение стружки. К тому же из-за возможности повторного резания инструментом стружки (являющейся фактически абразивом) **своевременная эвакуация стружки из зоны резания имеет важнейшее значение**. Поэтому геометрия современного режущего инструмента, предназначенного для предварительной обработки, рассчитана с условием достижения эффективного выброса стружки из зоны резания.

✓ Постпроцессоры

Можно много говорить о функциональности различных *CAM*-систем, но нельзя забывать, что итоговым (и самым важным) продуктом системы автоматизации процессов КТПП является *NC*-программа в *G*-кодах, управляющая станком с ЧПУ. Тем удивительней, что для многих пользователей получение соответственно форматированной УП остается одной из самых больших проблем. После более чем 30 лет компьютерного *NC*-программирования связь “*CAM*-система – станок с ЧПУ” до сих пор не везде обеспечена в полной мере.

Обеспечивает эту связь отдельная программа (обычно называемая постпроцессором, поскольку процесс генерации *G*-кодов имеет место после создания траектории инструмента), которая форматирует нейтральный *CL*-файл (***CL*** – *Cutter Location*) в конкретную *NC*-программу, наиболее подходящую для специфической комбинации “станок – система ЧПУ”. По существу, постпроцессор является необходимой составляющей процесса производства. Так почему же нельзя получить качественную *NC*-программу, имея корректные данные в формате *CL*-файла?

Как известно, система управления должна выполнять команды в соответствии со стандартами программирования системы ЧПУ (*EIA/ISO*) независимо от типа станка. Например, команда ***M08*** служит для включения подачи охлаждающей эмульсии. Большинство производителей оборудования соблюдает стандарты команд выполнения основных подготовительных (группа ***G***) и вспомогательных (группа ***M***) функций. Одновременно с этим каждый тип оборудования выполняет специализированные функции (например, циклы сверления, нарезания резьбы и др.), и соответствие этих функций стандарту обычно не соблюдается. Команды, служащие для выполнения специализированных функций, индивидуальны для определенного станка. Кроме того, чтобы

выделиться среди конкурентов, производители оборудования добавляют широкий спектр разнообразных специальных функций, которые привлекают внимание клиентов к их изделиям. **Всё это делает фактически невозможным использование одной *NC*-программы для разных комбинаций “станок – система ЧПУ”**.

Надо учесть еще и то обстоятельство, что комплектация станка и системы ЧПУ определяется опциями, выбранными при покупке оборудования. В результате для двух одинаковых комбинаций “станок – система ЧПУ” могут использоваться различные способы программирования одинаковых команд и функций.

Приняв во внимание указанные факторы, становится понятным, почему получение хорошей *NC*-программы напрямую зависит от качества постпроцессора.

Надо сказать, что проблематичным является даже получение соответствующих команд в желаемом порядке в критических местах УП – в начале, в местах смены инструмента и в конце УП (например, команды ввода и сброса коррекции и т.п.). Дополнительные трудности возникают из-за того, что зачастую даже разные компании одной корпорации имеют собственные требования к УП и используют различные методы для программирования одинаковых *NC*-команд.

Таким образом, постпроцессор, отлаженный для одной компании, отнюдь не всегда подойдет для другой. Даже если в комплекте с *CAM*-системой поставляется подготовленный постпроцессор для специфической комбинации “станок – система ЧПУ”, то маловероятно, что он сгенерирует *NC*-программу в точном соответствии с требованиями производителя и станка.

В силу вышеназванных причин пользователь *CAM*-системы вынужден выбирать одно из трех:

- использовать *NC*-программу как есть (что создает проблемы для оператора станка);
- редактировать каждую УП (что чревато ошибками);
- изменить конфигурацию постпроцессора (для этого потребуется персонал с соответствующей квалификацией или сторонняя помощь).

Очевидно, что последний вариант является наиболее предпочтительным, но не всегда возможным.

Не редки случаи, когда компания покупает сложный станок, который имеющаяся *CAM*-система поддерживать не может. К примеру, многие *CAM*-системы среднего класса не выполняют обработку для многоосевых станков и не способны контролировать работу нескольких ротационных осей, поворотных столов и голов. Даже если *CAM*-система может контролировать ротационные оси, её постпроцессор не может точно вычислить соответствующую запрограммированному значению рабочую подачу в тех случаях, когда ротационные оси перемещаются одновременно. К тому же постпроцессоры *CAM*-систем среднего класса не позволяют создавать модели сложных станков в целях проверки и анимационного моделирования обработки. Иногда функциональность имеющейся системы перестает удовлетворять пользователей, когда они начинают изучать новые, более

эффективные методы механообработки. Зачастую замена или модернизация *CAM*-системы является единственным способом решения таких проблем.

Другая общая проблема пользователей *CAM* – часто их постпроцессоры не поддерживают специальные функции системы управления станка: сложные циклы, операции с переменными, вызов подпрограмм и т.п. В большинстве случаев пользователи так никогда и не используют эти функции (или постепенно приспосабливаются редактировать *NC*-программы вручную).

Потребность замены устаревших постпроцессоров – еще одна проблема, с которой сталкиваются, главным образом, большие компании. Такие постпроцессоры, созданные для старых ЭВМ много лет назад, практически невозможно использовать на современных вычислительных платформах. Таким образом, должны быть разработаны или куплены новые постпроцессоры. Трудность же состоит в том, что новый постпроцессор, как правило, не способен обрабатывать существующие *CAM*-данные, созданные в старых операционных системах.

Разработчики *CAM* признают существование вышеперечисленных проблем и частично совершенствуют свои продукты, но никто не может сказать, сколько времени потребуется для решения всех вопросов.

Более эффективный путь – использование одного из нескольких **универсальных постпроцессоров**, существующих сегодня на рынке. Эти программы созданы компаниями, которые специализируются в данной области, и они совместимы с наиболее популярными *CAM*-системами. Универсальный постпроцессор – это инструмент получения *NC*-программ для разнообразных сложных станков, который позволяет использовать специальные функции систем ЧПУ.

Универсальный постпроцессор должен обрабатывать *CL*-файлы множества форматов, включая *CATIA*, *UGII*, *APT*, *NCL*, *VARIMETRIX* и др. Возможность макропрограммирования на специально созданном языке промышленного интерфейса (***FIL* – Factory Interface Language**) позволяет настроить универсальный постпроцессор для любой комбинации “станок – система ЧПУ”.

Возможным решением проблем использования постпроцессоров было бы принятие станкостроительной промышленностью современного и более жесткого **стандарта для *NC*-программирования**. Такой стандарт позволил бы использовать УП для любой комбинации “станок – система ЧПУ”. Это фактически устранило бы потребность в разработке постпроцессоров для новых станков, которые будут поддерживать этот стандарт.

Как ни странно, такой стандарт уже существует в США примерно с середины 70-х годов. Известный как ***BCL***, он был создан по инициативе военных ведомств, чтобы преодолеть проблему несовместимости *NC*-программ со станками при перемещении производства критических компонентов с одного завода на другой. Почему стандарт ***BCL*** не используется сегодня? Обеспечение соответствия станков такому стандарту потребовало бы дополнительных затрат, но основная причина – невозможность сотрудничества

лидеров станкостроительной промышленности в силу конкурентного характера данной отрасли. Тем не менее, несколько фирм-производителей станков предлагают в качестве опции соответствие своего оборудования стандарту ***BCL***. Впрочем, большая часть *CAM*-систем не способна генерировать ***BCL***-файлы.

Решением, позволяющим вообще отказаться от постпроцессоров, является концепция ***STEP NC***. Этот стандарт открывает возможность использовать базу данных модели изделия в качестве информации, передающейся на станок с ЧПУ. При этом становятся ненужными отдельные файлы траекторий, содержащие *G*- или *M*-команды, а следовательно, и постпроцессоры. Это радикально иной подход к *NC*-программированию, который имеет далеко идущие возможности “*e*-обработки”.

Компании, разрабатывающие программное обеспечение *CAM*, предлагают программы, которые позволяют их пользователям читать файлы ***STEP NC*** и генерировать траектории инструмента. Тем самым пользователи подготавливаются к введению общих стандартов обмена данными, которые дадут возможность регулировать поток цифровой информации с помощью интернета. На сегодняшний день наблюдается движение ***STEP NC*** от научной фантастики до уровня реализации.

Резюмируя, можно сказать, что технология автоматизации механообработки стала действительно зрелой. Она предлагает широкое разнообразие комбинаций “станок – система ЧПУ”, хотя и порождает сопутствующие их использованию проблемы. Решение этих проблем потребует огромной работы от разработчиков *CAM* и более тесного сотрудничества изготовителей оборудования.

Режимы резания при высокоскоростном фрезеровании

✓ Параметры резания

В механообработке существуют некоторые основные определения и формулы для вычисления рабочей подачи и скорости вращения шпинделя. Кроме того, фирмы-производители режущего инструмента для ***HSM*** в своих каталогах обязательно указывают рекомендованные режимы резания. Вычисленные значения, данные каталогов и результаты собственных экспериментов можно сортировать и заносить в таблицы, – но они должны использоваться только в качестве предварительных. Специалисты-производственники имеют богатый практический опыт и знание специфических свойств материалов, которые часто обрабатывают. Можно только поощрять их желание оптимизировать параметры резания так, как им подсказывает их накопленный опыт ***HSM***.

Существует мнение, что ***HSM***-обработка должна выполняться с небольшими глубинами резания. Это было справедливо до недавнего времени, когда в *CAM*-системах еще не были реализованы принципы ***HSM***. Даже обладая современными станками с высокоскоростными шпинделями, жестким и сбалансированным режущим инструментом, технологи-программисты были вынуждены

проецировать *HSM* на старые стратегии создания траекторий обработки, имеющиеся в их распоряжении.

Сегодня же параметры резания для *HSM* варьируются в зависимости от обрабатываемого материала и вида обработки довольно широко (см. табл. 3÷5). Небольшие глубины резания характерны только для труднообрабатываемых материалов. По данным опроса шести ведущих германских экспертов в области резания и специалистов авиационной промышленности относительно сравнения высокоскоростной (*HSM*) и высокопроизводительной (*HPM* – *High Performance Machining*) обработки, *HPM* (обработка с большими глубинами резания) имеет существенно больший потенциал для экономии времени обработки.

Для самых труднообрабатываемых материалов величину *подачи на зуб* можно вычислить по формуле $f_z = 0.01 \times D$. Данное значение превосходно подходит для всех видов обработки и может быть увеличено или уменьшено в зависимости от полученного на практике результата, но рекомендуется, чтобы оно оставалось в пределах следующего диапазона:

$$0.005 \times D \leq f_z \leq 0.02 \times D,$$

где *D* – номинальный диаметр фрезы в мм.

✓ Охлаждение

HSM-обработка часто осуществляется без охлаждающей эмульсии. Геометрия высокоскоростной фрезы рассчитана с условием далекого отброса стружки. Что касается остального, то для инструмента лучше постоянная высокая температура, чем её колебания, которые может вызвать охлаждающая эмульсия.

Хотя охлаждающий эффект эмульсии не востребован в процессе *HSM*, но её смазывающие свойства достаточно часто бывают просто необходимы.

При обработке вязких материалов (алюминиевые сплавы или мягкая сталь) охлаждающая эмульсия помогает скольжению стружки по режущей кромке без теплообмена. Также полезно применять СОЖ при обработке сферическим инструментом, когда происходит резание вершиной фрезы, а скорость резания на оси инструмента равна нулю. При малой глубине резания горячий материал может привариться к инструменту, что скажется на качестве обработанной поверхности. Охлаждающая эмульсия (или масляный туман) минимизирует этот эффект. Целесо-

Таблица 3. Скорость резания различных материалов в зависимости от вида обработки

| Материал (в соответствии с классификацией СМС) | Скорость резания (м/мин) | | | |
|---|--------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| | Твердость | Обычная обработка | <i>HSM</i> – черновая | <i>HSM</i> – финишная |
| Сталь 01.2 | 150 <i>HB</i> | < 300 | >400 | < 900 |
| Сталь 02.1/2 | 330 <i>HB</i> | < 200 | >250 | < 600 |
| Сталь 03.11 | 300 <i>HB</i> | < 100 | >200 | < 400 |
| Сталь 03.11 | 39÷48 <i>HRc</i> | < 80 | >150 | < 350 |
| Сталь 04 | 48÷58 <i>HRc</i> | < 40 | >100 | < 250 |
| GCI 08.1 | 180 <i>HB</i> | < 300 | >500 | < 3000 |
| Алюминий | 60÷75 <i>HB</i> | < 1000 | >2000 | < 5000 |
| Цветные сплавы | 100 <i>HB</i> | < 300 | >1000 | < 2000 |

Таблица 4. Типичные параметры резания закаленной стали

| Вид обработки | Скорость резания v_c (м/мин) | Глубина резания a_p (%)* | Ширина резания a_e (%)* | Подача на зуб f_z (мм/зуб) |
|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Черновая | 50÷100 | 30÷150 | 10÷40 | 0.01÷0.1 |
| Получистовая | 150÷200 | 5÷20 | 5÷30 | 0.015÷0.15 |
| Финишная и суперфинишная | 200÷250 | 1÷3 | 1÷2 | 0.01÷0.2 |

* В процентах от диаметра фрезы.

Для обработки закаленной стали (54÷58 *HRc* – сталь 04 в табл. 3) были использованы монолитные твердосплавные концевые фрезы с покрытием TiAlN.

Таблица 5. Скорость резания при обработке различных материалов

| Материал | Скорость резания, (м/мин) | Охлаждение |
|------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Алюминий | 1000÷5000 | СОЖ или масляный туман |
| Латунь | 1000÷2500 | СОЖ или масляный туман |
| Медь | 600÷1500 | СОЖ или масляный туман |
| Титановый сплав | 50÷150 | СОЖ или масляный туман |
| Графит | 1000÷4000 | Сжатый воздух |
| Углеродистые волокна | 250÷500 | Сжатый воздух |
| Пластмассы | 300÷1000 | Сжатый воздух |
| Стали | 300÷700 | СОЖ или масляный туман |
| Чугун | 500÷750 | СОЖ или масляный туман |
| Жаропрочная сталь (инконель) | 75÷100 | СОЖ или масляный туман |

При использовании монолитных твердосплавных концевых фрез удлиненной серии (2L) значения должны быть уменьшены на 30÷50%.

При обработке графита, довольно распространенного материала для электроэрозионной обработки, наиболее эффективны фрезы с алмазным напылением.

образность использования охлаждающей эмульсии на водной основе при *HSM*-обработке увеличивается с уменьшением скорости резания.

Наиболее эффективным при *HSM* оказалось применение масляного тумана с обдувом воздушной струей под большим давлением. При этом масло должно иметь растительное происхождение и быть безвредным для здоровья.

Ниже будут приведены некоторые практические примеры *HSM*-обработки.

(Продолжение следует.) 

Высокоскоростное фрезерование в современном производстве

(Продолжение. Начало в ## 3,4/2003)

Александр Степанов ("Инженерный консалтинг", Москва, www.e-consul.ru) mail@e-consul.ru

Сравнительные испытания режущего инструмента

1 Исходные данные

Используя *HSM*-обработку, например, в инструментальной отрасли, можно перепланировать и ускорить процесс производства за счет сокращения стадий фрезерования электродов (*ECM*) и электроэрозионной обработки (*EDM*). *HSM* обеспечивает получение точности размеров порядка 0.02 мм, к тому же после механообработки заранее закаленной заготовки значительно увеличивается долговечность матриц и пуансонов. Процесс выглядит так: закалка заготовки до окончательного значения твердости, затем черновое, получистовое и финишное фрезерование с использованием *HSM* во всех операциях механообработки. Сокращение двух стадий процесса дает существенную экономию времени по сравнению с традиционным способом – приблизительно на 30÷50 %.

С целью лучшего понимания процесса *HSM*-обработки закаленных инструментальных сталей были выполнены экспериментальные работы, в соответствии с планом которых было необходимо:

- провести сравнительные испытания режущего инструмента фирм *HANITA*, *FRAISA* и *SECO* с рекомендованными режимами и параметрами резания;
- разработать рекомендации по выбору оптимальных режимов и параметров резания для *HSM*-обработки;
- определить методы разработки УП для *HSM*-обработки с целью оптимизации машинного времени, обеспечения высокой стойкости инструмента и постоянства исполняемых размеров.

Для отработки технологии *HSM* был использован специальный станок с системой управления *FANUC* и максимальной скоростью вращения шпинделя 42 000 об/мин (минимальная скорость вращения шпинделя – 5000 об/мин). Охлаждение зоны резания – масляный туман в сочетании с воздушным обдувом.

Модуль *Pro/MFG* системы *Pro/ENGINEER v. 2001*, предназначенный для программирования механообработки, позволяет реализовать принципы *HSM*-обработки. Моделирование обработки детали осуществлялось в среде программного комплекса *Pro/E NC Machining Option* (модули

Pro/NC-Check, *Pro/NC-GPOST* и *VERICUT*), который позволяет:

- выбрать необходимый инструмент;
- рассчитать время обработки и объем удаляемого материала в зависимости от параметров резания;
- оптимизировать траектории инструмента;
- устранить ошибки и несанкционированные врезания инструмента в материал;
- выбрать оптимальную последовательность обработки;
- проверить программу обработки и соответствие выбранного инструмента.

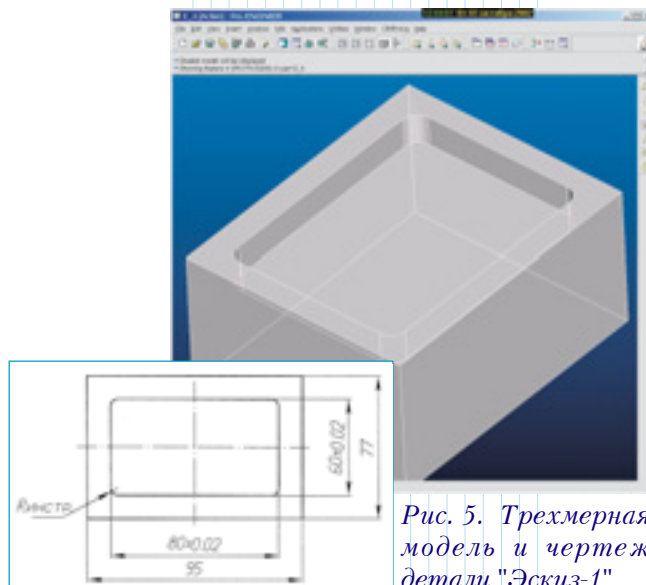


Рис. 5. Трехмерная модель и чертеж детали "Эскиз-1"

Для получения управляющих программ с помощью *Pro/E* были построены компьютерные модели. Заготовки для проведения исследований (с указанием марки стали и твердости) предоставило предприятие ОАО "АПЗ" (г. Арзамас).

2 Обработка детали "Эскиз-1"

Модель и чертеж детали "Эскиз-1" приведены на рис. 5. Материал: сталь У8, твердость 56 HRC.

✓ Цель эксперимента

Целью обработки детали "Эскиз-1" было сопоставление работы двух фрез при черновом фрезеровании кармана 80×60 мм до глубины $h=7$ мм. Конструкции фрез показаны на иллюстрациях (рис. 6, 7).



Рис. 6. Сферическая фреза *FRAISA HSC 5286* ($\varnothing 6.0$) с покрытием TiC

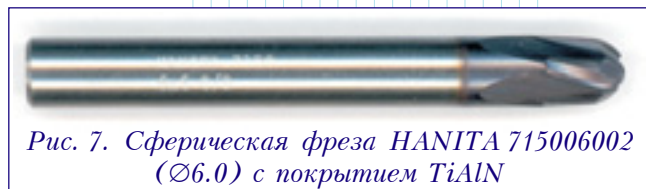


Рис. 7. Сферическая фреза *HANITA 715006002* ($\varnothing 6.0$) с покрытием TiAlN

Режимы резания фрезой FRAISA

Режимы резания для HSM-обработки назначаются по каталогу, а затем уточняются при отладке операции на станке. В каталоге фирмы FRAISA рекомендованы следующие режимы резания (для закаленной стали твердостью $52\pm 56 HRC$ и сферической двузубой фрезы FRAISA HSC 5286 диаметром 6.0 мм с покрытием TiC):

- скорость резания (v_c) – 150 м/мин, достигаемая при скорости вращения шпинделя 21 700 об/мин, где под значением скорости резания в каталоге подразумевается значение окружной скорости на так называемом эффективном диаметре (в данном случае – 2.2 мм);
- рабочая подача (f_z) – 0.08 мм/зуб, достигаемая при подаче 3470 мм/мин (при врезании – 1500 мм/мин);
- глубина резания (a_p) – 0.2 мм;
- ширина резания (a_e) – 0.35 мм.

Данные параметры использованы при разработке управляющей программы в Pro/E. Расчетное время обработки – 126.36 мин. Фактическое время обработки на станке (машинный цикл) составило 136.5 мин. Время обработки обычно превышает расчетное примерно на 10%, что обусловлено особенностями системы управления (в данном случае FANUC): функция предварительного просмотра (*look-ahead*) автоматически уменьшает рабочую подачу при приближении к точке изменения направления движения инструмента. Производительность (скорость удаления материала) составила примерно 0.3 см³/мин.

Режимы резания фрезой HANITA

Рекомендуемые режимы резания (для закаленной стали твердостью $50\pm 60 HRC$ и сферической 4-зубой фрезы HANITA 715006002 диаметром 6.0 мм с по-

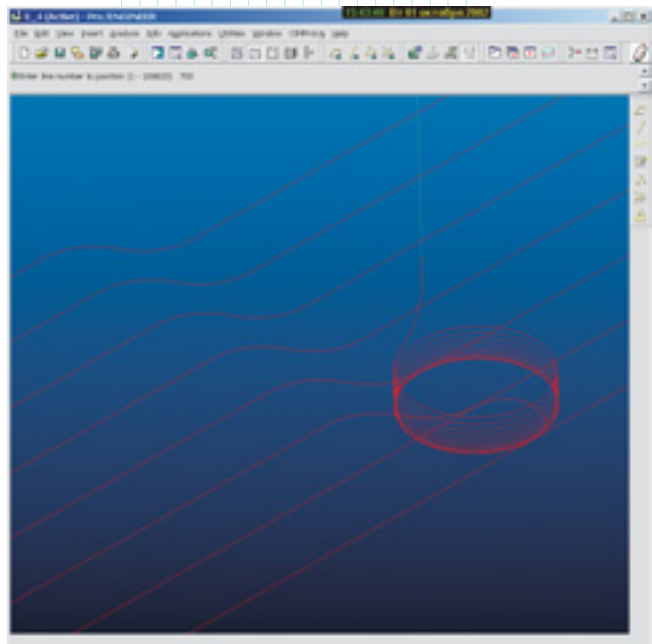


Рис. 8. Плавная траектория для обработки детали "Эскиз-1"

крытием TiAlN) согласно каталогу фирмы HANITA:

- скорость резания (v_c) – 400 м/мин, достигаемая при скорости вращения шпинделя 21 231 об/мин (принимается 21 200 об/мин), где под значением скорости резания в каталоге подразумевается значение окружной скорости на радиусе 3.0 мм;
- рабочая подача (f_z) – 0.06 мм/зуб, достигаемая при подаче 5130 мм/мин. Принимаем 4200 мм/мин (при врезании – 50%);
- глубина резания – $a_p = 0.05 \times D$, или 0.30 мм (принимается 0.2 мм);
- ширина резания – $a_e = 0.05 \times D$, или 0.30 мм (принимается 0.35 мм).

Данные параметры были использованы при разработке управляющей программы в Pro/E. Расчетное время обработки: 104.21 мин. Фактическое время обработки (машинный цикл): 112.5 мин. Производительность (скорость удаления материала) составила примерно 0.4 см³/мин.

✓ Подготовка управляющей программы

Методы программирования, примененные для создания УП, удовлетворяют изложенным ранее принципам HSM.

Последовательность обработки была определена как "фрезерование объема" (*Volume Milling*, согласно терминологии Pro/E) с видом обработки ROUGH_&_PROF, что предполагает черновую обработку параллельными слоями с дополнительным контрольным проходом по контуру. Для обеспечения плавного движения инструмента при обработке были использованы значения параметров, приведенные в табл. 6. В результате была получена траектория, показанная на рис. 8. Как видим, она представляет собой набор плавных кривых, причем соединение концов соседних проходов происходит по тангенциальным дугам (параметры CORNER_FINISH_TYPE, CORNER_ROUND_RADIUS). Подъем до плоскости безопасности (RETRACT) и перебег также осуществляются плавно, с помощью дуг сопряжения (параметры ARC_TRANSITION, RETRACT_RADIUS). Врезание инструмента в металл важно производить постепенно – это обеспечивается врезанием по спирали (SPIRAL_MAINTAIN_CUT_TYPE) с заданным углом врезания (RAMP_ANGLE) методом попутного фрезерования (параметр CUT_TYPE).

Таблица 6. Значения параметров в Pro/E для создания плавной траектории

| | |
|---------------------|--------------------------|
| SCAN_TYPE | SPIRAL_MAINTAIN_CUT_TYPE |
| CUT_TYPE | CLIMB |
| RETRACT_OPTION | SMART |
| RETRACT_TRANSITION | ARC_TRANSITION |
| CORNER_FINISH_TYPE | FILLET |
| CIRC_INTERPOLATION | ARC_ONLY |
| CORNER_ROUND_RADIUS | 0.35 |
| RAMP_ANGLE | 1 |
| CLEAR_DIST | 0.2 |
| RETRACT_RADIUS | 1 |
| CUT_DIRECTION | STANDARD |

Из каталога фирмы *FRAISA* следует, что допуск на фактический диаметр фрезы $\varnothing 6.0$ мм следующий: $5.994_{-0.02}$ мм. Следовательно, номинальный диаметр, принятый для расчета (с учетом отжима фрезы при обработке закаленной стали), должен быть задан интуитивно, – например 5.96 мм. Используя эту маленькую хитрость, мы можем надеяться, что в этом случае исполняемый размер будет получен примерно в середине поля допуска. Вообще говоря, значение отжима фрезы можно определить только экспериментальным путем. Необходимо также учесть, что размеры математической модели должны быть заданы в середине поля допуска.

После анализа результатов замеров детали, обработанной фрезой *HANITA*, стало ясно, что наша хитрость удалась, так как отклонение размеров в верхнем сечении кармана соответствовало разнице значений номинального диаметра и диаметра, заданного при моделировании обработки в *Pro/E*.

✓ Результаты обработки

Результат обработки детали “Эскиз-1” фрезой *FRAISA HSC 5286* диаметром 6.0 мм с покрытием *TiC* показан на **рис. 9**. Результат обработки фрезой *HANITA 715006002* диаметром 6.0 мм с покрытием *TiAlN* показан на **рис. 10**, а её путь хорошо виден на **рис. 11**.

Как выяснилось, фреза *HANITA* обеспечивает более высокое качество обработки и сохраняет свою геометрию достаточно долго (при большей производительности). Это обусловлено покрытием фрезы (*TiAlN*), обеспечивающим лучшее скольжение режущей кромки о заготовку. К тому же конструкция фрезы *HANITA* более подходит (по сравнению с *FRAISA*) для выполнения черновой обработки: четыре режущие кромки с наличием торцевого зуба.

У фрезы *FRAISA*, вследствие чрезмерного износа, была нарушена геометрия режущих кромок (**рис. 12**). Из-за этого стружка попадала между режущими кромками и заготовкой, “привариваясь” при этом к заготовке. Геометрия и покрытие фрез, аналогичных фрезам *FRAISA* серии *HSC 5286*, не



Рис. 12. Высокий износ фрезы FRAISA после 136 минут обработки

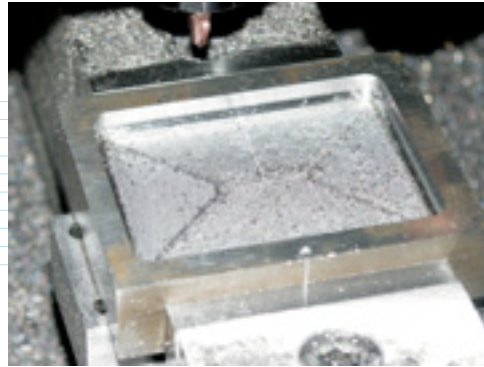


Рис. 9. Деталь после обработки фрезой FRAISA

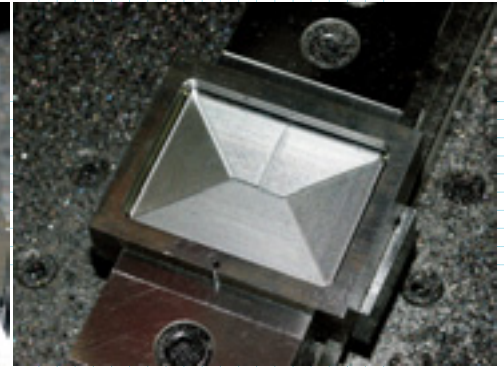


Рис. 10. Деталь после обработки фрезой HANITA

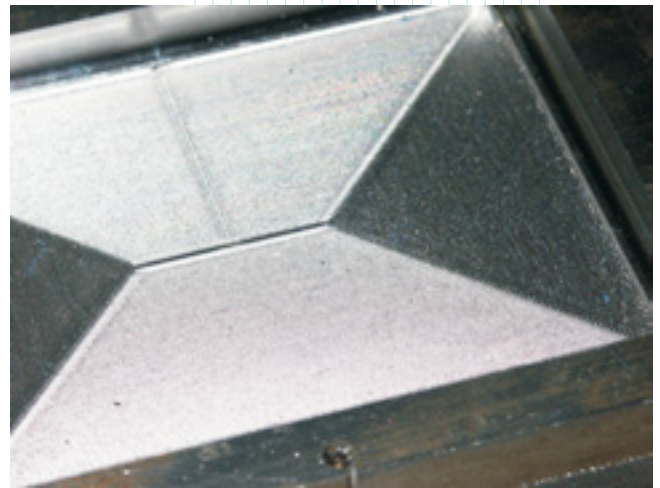


Рис. 11. Траектория инструмента

соответствуют условиям *HSM* для черновой обработки закаленных сталей ($> 40 HRC$). Малое время стойкости инструмента (стружка начала “искрить” после 30 минут обработки) при черновой обработке является неприемлемым.

По результатам эксперимента можно сделать следующий вывод. Черновая обработка сферическими фрезами, которая многими специалистами преподносится в качестве самого эффективного способа обработки закаленных сталей, на самом деле занимает очень много времени и вследствие этого отрицательно сказывается на стойкости инструмента. Конечно, метод обработки и выбор режущего инструмента во многом зависят от геометрии обрабатываемой детали, но всё же, как мы убедимся ниже, **самую первую черновую обработку выполнять сферическими фрезами нецелесообразно!**

Далее мы сравним два процесса черновой обработки: сферической фрезой и торцевой фрезой, имеющей радиус скругления режущей кромки 0.75 мм.

✓ Анализ размеров обработанной детали

Контроль размеров детали осуществлялся на координатно-измерительной машине (**КИМ**). В результате измерений было выявлено, что с увеличением времени обработки наблюдается увеличение износа инструмента и, как следствие, уменьшение размеров

кармана с увеличением глубины по оси Z. Износ диаметра фрезы составил примерно 0.02 мм в час.

3. Обработка детали “Эскиз-2”

Модель и чертеж детали приведены на рис. 13. Материал: сталь У8А, твердость 52 HRC.

✓ Цель эксперимента

Целью обработки детали “Эскиз-2” было выяснить, от чего зависит износ сферических фрез при черновом фрезеровании и выгодно ли выполнять такими фрезами черновую обработку с экономической точки зрения. Для этого дважды выполнялась обработка кармана 60×60 мм (до полного износа фрезы). При этом первая УП была составлена с учетом требований, предъявляемых к HSM, а вторая – без учета. Режущий инструмент – две одинаковые сферические фрезы SECO SM06-06007.0-B90A30-2 диаметром 6.0 мм (рис. 14).

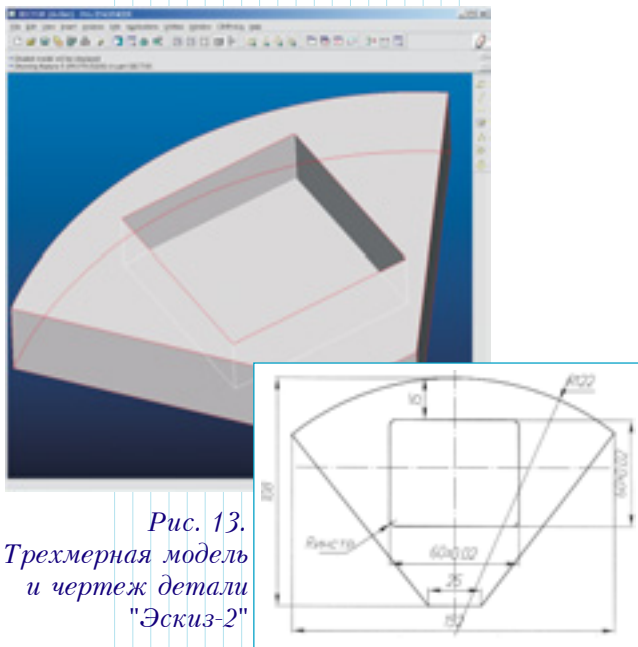


Рис. 13. Трехмерная модель и чертеж детали “Эскиз-2”

Режимы резания фрезой SECO

Для выбора параметров резания фрезами SECO используется программа SECOCUT. При этом учитываются верхние ограничения, накладываемые техническими характеристиками оборудования:

- не должно быть превышено значение максимального числа оборотов шпинделя станка;
- расчетная мощность резания не должна превышать значение номинальной мощности станка.

Выбранные параметры резания обычно используются для разработки УП в качестве исходных данных. Впоследствии параметры редактируются



Рис. 14. Сферическая фреза SECO SM06-06007.0-B90A30-2 (Ø6.0)

во время отладки операции на станке с учетом всех условий, влияющих на процесс.

Рекомендуемые значения для закаленной стали твердостью 52 HRC (6-я группа материалов по классификации SECO) и фрезы SECO SM06-06007.0-B90A30-2 диаметром 6.0 мм:

- скорость резания (*Cutt. Speed*) – 147 м/мин, достигаемая при скорости вращения шпинделя 21 712 об/мин (под скоростью резания подразумевается значение окружной скорости на радиусе резания, равном 1.1 мм);
- рабочая подача (*Feed Speed*) – 0.168 мм/зуб (7288 мм/мин), но мы принимаем 3470 мм/мин (при врезании – 1500 мм/мин), так как заведомо ясно, что рекомендуемое значение слишком велико для длительной обработки закаленной стали двузубой фрезой;
- глубина резания (*Depth of cut*) – 0.20 мм;
- ширина резания (*Width of cut*) – 0.35 мм.

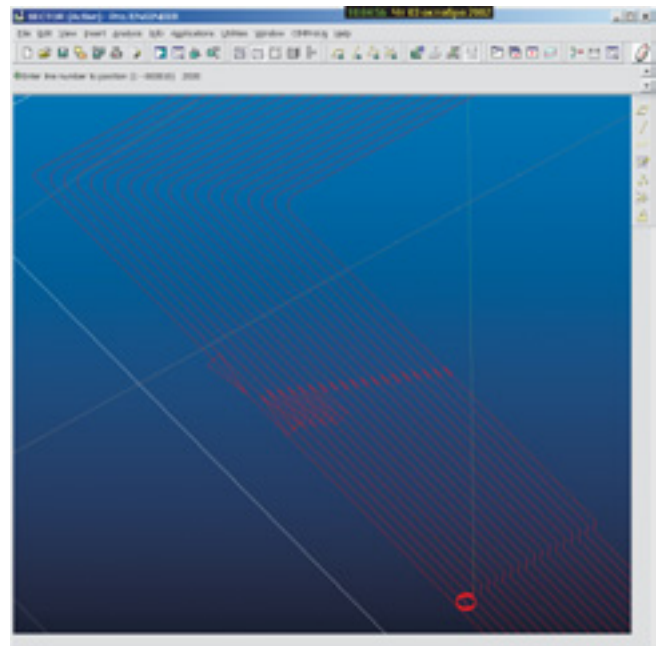


Рис. 15. Плавная траектория для обработки детали “Эскиз-2”

Данные значения были использованы в Pro/E при разработке УП. При этом значение скорости резания было уменьшено на 17.5% (ориентируясь на режимы резания, предлагаемые каталогом FRAISA). Фактическое время и первой, и второй обработок (до остановки без слома фрезы) составило 142 минуты. Обработка была остановлена на глубине $h=9.4$ мм. Производительность составила примерно 0.3 см³/мин.

✓ Подготовка управляющих программ

Первая последовательность обработки создавалась с такими же значениями параметров, как и для детали “Эскиз-1” (см. выше). В результате была получена плавная траектория, показанная на рис. 15.

Вторая УП намеренно создавалась без цели обеспечить плавные движения инструмента (параметры

Таблица 7. Значения параметров в Pro/E для создания неплавкой траектории

| | |
|---------------------|-------------------|
| SCAN_TYPE | TYPE_SPIRAL |
| CUT_TYPE | CLIMB |
| RETRACT_TRANSITION | CORNER_TRANSITION |
| CIRC_INTERPOLATION | POINTS_ONLY |
| CORNER_ROUND_RADIUS | 0 |
| RAMP_ANGLE | 1 |
| CLEAR_DIST | 0.2 |
| RETRACT_RADIUS | 0 |

приведены в табл. 7). Полученная траектория показана на рис. 16.

Обработка была остановлена (без слома фрезы) на глубине $h=9.4$ мм. На рис. 17 видно, что при увеличении износа фрезы температура в зоне резания становится очень высокой.

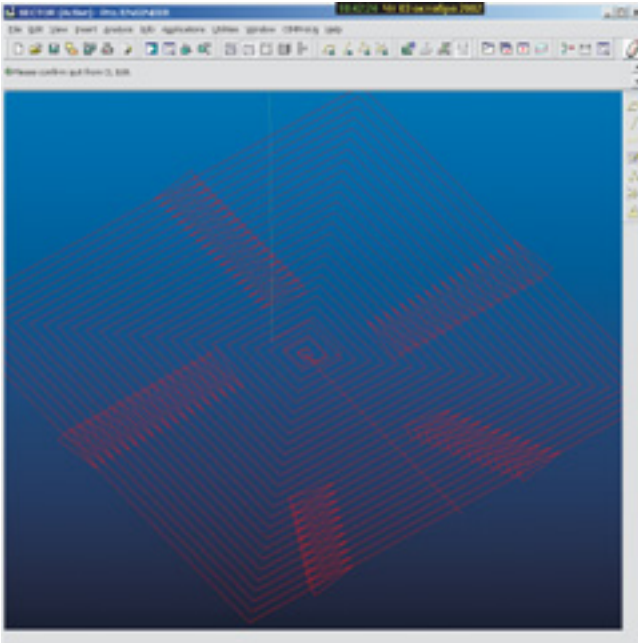


Рис. 16. Траектория, намеренно созданная без учета требований HSM

✓ **Результаты обработки**

После первой и после второй (с другой стороны) обработки заготовка выглядела абсолютно одинаково (рис. 18). В результате визуального осмотра изношенных фрез и проведения измерений на установке *Lindex* выяснилось, что **в обоих случаях износ инструмента оказался практически одинаковым** (рис. 19).

Проанализировав результаты эксперимента по черновой обработке сферическими фрезами, можно утверждать следующее:



Рис. 19. Высокий износ фрезы SECO

✓ Износ фрезы в большей степени зависит от времени обработки, чем от метода программирования траектории, поскольку глубина и ширина резания небольшие.

✓ Стойкость фрезы *SECO* при черновой обработке примерно на 20% больше стойкости фрезы *FRAISA*, но существенно ниже, чем у фрезы *HANITA*. Фрезы *SECO* и *FRAISA* рекомендуется применять только при чистовой обработке сталей твердостью менее 40 HRC.

✓ Время обработки практически не зависит от метода программирования траектории, поскольку количество проходов очень большое, а глубина резания маленькая. Затраты времени на оптимизацию траектории не оправданы, так как система управления *FANUC*, в соответствии с функцией *look-ahead*, автоматически уменьшает рабочую подачу при приближении к точке смены направления движения инструмента.

✓ Большой износ инструмента и малая производительность ($0.3 \div 0.4$ см³/мин) при обработке сферическими фрезами говорят о следующем: **с экономической точки зрения черновая обработка закаленных сталей сферическими фрезами является невыгодной.**



Рис. 17. В обоих случаях обработка велась до полного износа фрезы



Рис. 18. Деталь "Эскиз-2" после обработки

✓ **Анализ размеров обработанной детали**

Из данных измерений на КИМ следует, что по мере увеличения глубины кармана по оси Z (времени обработки) наблюдается уменьшение исполнительных размеров (длина и ширина кармана) за счет увеличения износа инструмента. В данном случае износ диаметра фрезы составил примерно 0.02 мм в час.

4 **Обработка детали “Эскиз-3”**

Модель и чертеж детали приведены на рис. 20. Материал: сталь 4X5МФС, твердость 48 HRC.

✓ **Цель эксперимента**

Целью обработки детали “Эскиз-3” было сопоставление производительности двух методов чернового фрезерования торцевой фрезой с небольшим радиусом скругления режущих кромок:

- многослойная обработка с небольшой глубиной фрезерования;
- обработка с большой глубиной фрезерования.

Кроме того, было интересно сравнить эти методы в контексте обеспечения стойкости фрезы.

Обработка выполнялась дважды – с обеих сторон заготовки до глубины $h=10$ мм. Обе УП были разработаны с учетом требований, предъявляемых к HSM. Инструмент – 4-зубая фреза HANITA 494008003 диаметром 8.0 мм с радиусом скругления режущих кромок 0.75 мм и покрытием TiAlN (рис. 21).

Первый метод – многослойная обработка

Режимы резания, рекомендуемые каталогом для многослойной обработки (для закаленной стали твердостью 48...52 HRC и торцевой фрезы $\varnothing 8.0$ мм с радиусом скругления режущих кромок 0.75 мм):

- скорость резания – 150 м/мин, достигаемая при скорости вращения шпинделя 5970 об/мин;
- рабочая подача – 0.09 мм/зуб, достигаемая при подаче 2200 мм/мин (при врезании – 50%) для 4-зубой фрезы;
- глубина резания – 0.35 мм;
- ширина резания – 0.90 мм.

Данные значения были использованы при разработке первой УП. Расчетное время обработки – 42.56 мин.; фактическое (машинный цикл) – 47.5 мин.; производительность – примерно 0.8 см³/мин.

✓ **Подготовка управляющей программы**

Последовательность обработки – “фрезерование объема” (*Volume Milling*) с видом обработки ROUGH_ONLY, что предполагает выполнение черновой обработки параллельными слоями. Для создания плавной траектории инструмента были использованы значения параметров, приведенные в табл. 8. В результате была получена траектория, показанная на рис. 22.



Рис. 21. Фреза HANITA 494008003 ($\varnothing 8.0$) с покрытием TiAlN

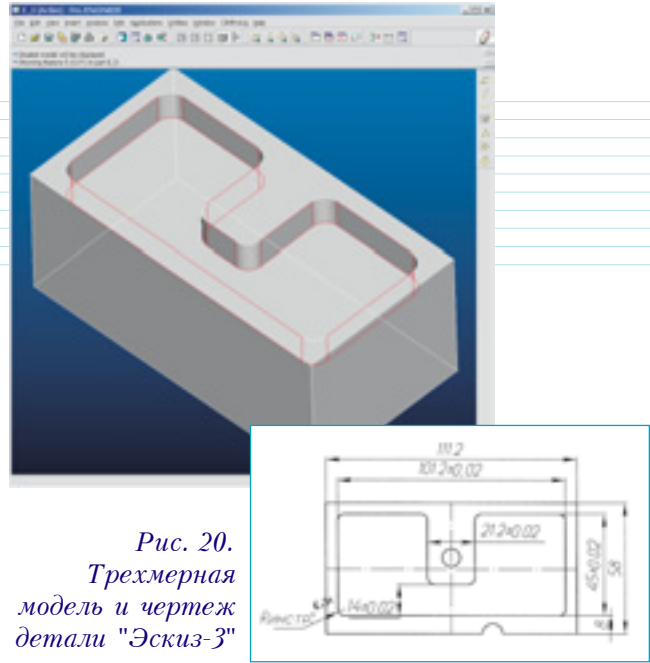


Рис. 20. Трехмерная модель и чертеж детали “Эскиз-3”

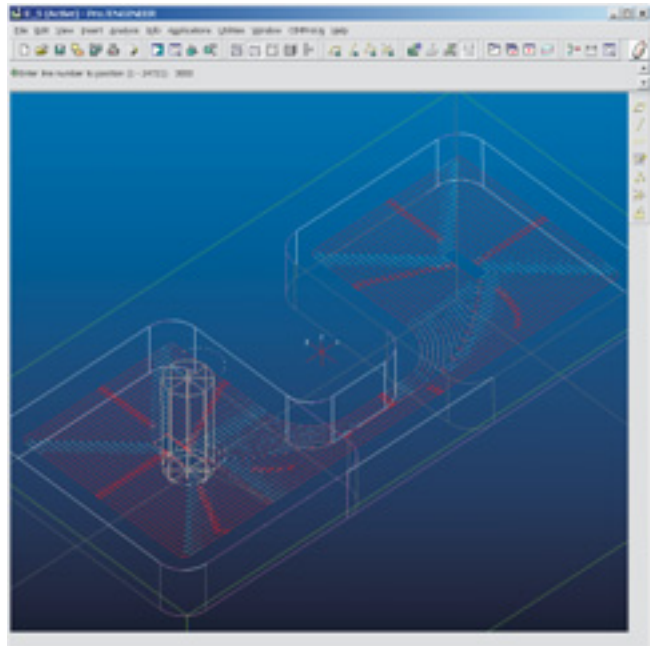


Рис. 22. Траектория инструмента при обработке детали “Эскиз-3”

Таблица 8. Значения параметров для создания плавной траектории при многослойной обработке

| | |
|---------------------|------------------|
| SCAN_TYPE | FOLLOW_HARDWALLS |
| CUT_TYPE | CLIMB |
| RETRACT_OPTION | SMART |
| RETRACT_TRANSITION | ARC_TRANSITION |
| CORNER_FINISH_TYPE | FILLET |
| CIRC_INTERPOLATION | ARC_ONLY |
| CORNER_ROUND_RADIUS | 0.5 |
| RAMP_ANGLE | 2 |
| CLEAR_DIST | 0.2 |
| RETRACT_RADIUS | 1 |
| CUT_DIRECTION | STANDARD |

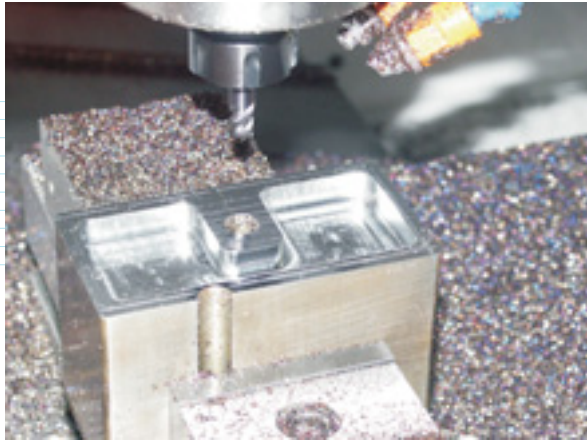


Рис. 23. Деталь "Эскиз-3" после обработки

Врезание инструмента в металл важно производить постепенно, что обеспечивается при врезании с соответствующим углом ($RAMP_ANGLE$) методом попутного фрезерования (параметр CUT_TYPE).

✓ **Результаты обработки**

На рис. 23 показана деталь после отработки первой УП. На рис. 24 видно, что фреза HANITA 494008003 хорошо работает в условиях HSM-обработки и сохранила свою геометрию. Однако, хотя достигнутая производительность ($0.8 \text{ см}^3/\text{мин}$) вдвое больше, чем при черновой обработке сферической фрезой, она всё же является недостаточной.

Второй метод – обработка с большой глубиной резания

Рекомендуемые режимы резания для закаленной стали твердостью 40...45 HRC и 4-зубой фрезы HANITA 494008003 диаметром 8.0 мм с радиусом скругления режущих кромок 0.75 мм при черновой обработке таковы:

- скорость резания – 110 м/мин, достигаемая при скорости вращения шпинделя 4400 об/мин (принимается 5000 об/мин – минимальную скорость вращения шпинделя используемого станка);
- рабочая подача – 0.02 мм/зуб, достигаемая при подаче 343 мм/мин. Но в соответствии с рекомендациями для фрезы 4940 используем коэффициент 1.2 и за счет уменьшения ширины резания принимаем значение 800 мм/мин;
- глубина резания $a_p = 0.5 \times D$, или 4.0 мм (принимается 5.0 мм);
- ширина резания $a_e = 0.3 \times D$, или 2.4 мм (принимается 0.4 мм). Уменьшение ширины резания диктуется геометрией обрабатываемой детали.



Рис. 24. Фреза HANITA 494008003 ($\varnothing 8.0$) после обработки

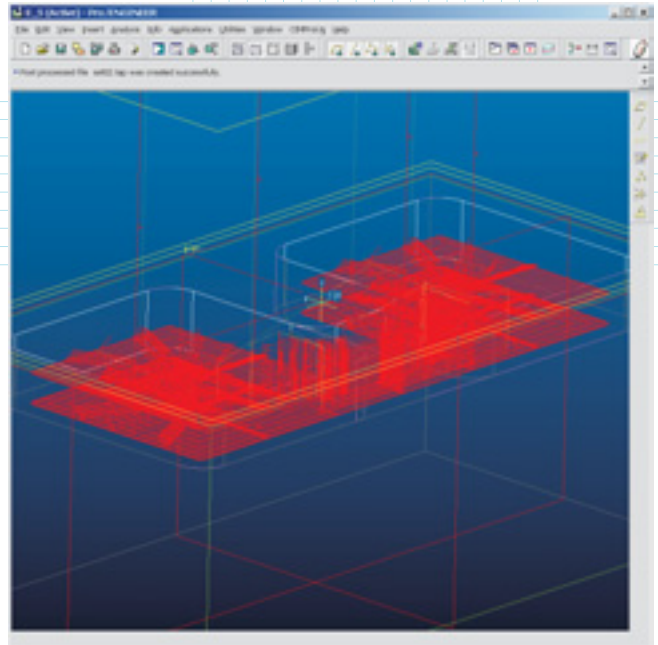


Рис. 25. Траектория для обработки с большой глубиной резания

Данные значения были использованы при разработке в Pro/E второй УП. Расчетное время обработки – 24.85 мин.; фактическое (машинный цикл) – 28.5 мин.; производительность – примерно $1.36 \text{ см}^3/\text{мин}$.

✓ **Подготовка управляющей программы**

Значения параметров, использованные при разработке в Pro/E второй УП, идентичны значениям в табл. 8. Исключение составляет угол врезания инструмента ($RAMP_ANGLE$), который был уменьшен на 1 градус из-за большой глубины врезания. В результате была получена траектория, показанная на рис. 25.

✓ **Результаты обработки**

На рис. 26 показана деталь после отработки второй УП. Практика показала, что фреза HANITA 494008003 хорошо работает в условиях HSM и сохраняет свою геометрию. Надо сказать, что вторая



Рис. 26. Деталь "Эскиз-3" после обработки

обработка выполнялась той же фрезой, что и первая. Производительность ($1.36 \text{ см}^3/\text{мин}$) более чем в три раза превышает производительность черновой обработки сферической фрезой и является удовлетворительной по соотношению “производительность – стойкость фрезы”. Относительно производительности можно также добавить, что она была достигнута при шадающих режимах резания.

Конструкция фрезы *HANITA 494008003* рассчитана для выполнения черновой обработки: четыре режущие кромки с наличием торцового зуба; покрытие фрезы (*TiAlN*) обеспечивает эффект скольжения режущих кромок о заготовку. При визуальном осмотре и при измерении геометрии фрезы *HANITA* на установке *Lindex* определено, что в обоих случаях износ фрезы практически отсутствует, и наблюдается лишь осветление режущих кромок.

По результатам черновой обработки закаленных сталей торцовой фрезой с небольшим радиусом скругления режущих кромок были сделаны **следующие выводы**:

✓ Черновая обработка с большой глубиной фрезерования и небольшой шириной резания является наиболее производительной.

✓ Время такой обработки зависит от метода программирования траектории, так как количество проходов небольшое (во втором случае – два слоя фрезерования). Следовательно, время, затраченное на оптимизацию траектории при разработке УП, окупается в дальнейшем за счет сокращения времени машинного цикла.

✓ Так как частота вращения шпинделя (скорость резания) является небольшой, в сравнении с черновой обработкой сферическими фрезами, то данная обработка является скорее высокопроизводительной, чем высокоскоростной.

✓ Метод черновой обработки закаленных сталей торцовыми фрезами с небольшим радиусом скругления режущих кромок наиболее предпочтителен для обеспечения стойкости режущего инструмента. С экономической точки зрения такая обработка является наиболее выгодной.

✓ Высокое качество фрез *HANITA* позволяет выполнять черновую обработку закаленных сталей.

5 Выводы по результатам испытаний

В результате выполнения экспериментальных работ по черновой *HSM*-обработке закаленных инструментальных сталей были сделаны следующие выводы:

1 Производительность черновой обработки закаленных сталей сферическими фрезами невысока, а время обработки очень большое. Малая производительность не оправдывает большой износ инструмента. Поэтому самую первую черновую обработку выполнять сферическими фрезами не рекомендуется.


2 Машинное время многослойной обработки практически не зависит от метода программирования траектории, поскольку большое количество проходов выполняется с малой глубиной резания. Производительность многослойной черновой обработки торцовыми фрезами с небольшим радиусом скругления режущих кромок вдвое выше, чем в случае применения сферических фрез, – но всё же недостаточна.

3 Метод черновой обработки торцовыми фрезами с небольшим радиусом скругления режущих кромок, по сравнению с обработкой сферическими фрезами, является более предпочтительным для обеспечения стойкости инструмента.

4 Наиболее производительной является черновая *HSM*-обработка с большой глубиной фрезерования и небольшой шириной резания, выполняемая торцовыми фрезами с небольшим радиусом скругления режущих кромок. Данный метод наиболее предпочтителен для обеспечения высокой стойкости инструмента.

5 При обработке закаленных сталей стойкость фрез зависит от их геометрии и покрытия. Выбирая производителя режущего инструмента для *HSM*-обработки, необходимо обратить внимание на те фирмы, которые инвестируют в инновационные направления, связанные с созданием инструментов для высокопроизводительной обработки. Наиболее предпочтительными являются многозубые торцовые фрезы с небольшим радиусом скругления режущих кромок (оптимально – $0.5 \div 0.75 \text{ мм}$), покрытые *TiAlN*. При черновой обработке закаленной стали ($> 40 \text{ HRC}$) максимальный диаметр торцовой фрезы ограничен минимальным числом оборотов шпинделя *HSM*-станка. Например, при работе на станке, имеющем минимальную скорость вращения шпинделя 5000 об/мин (как в нашем случае), черновую обработку рекомендуется производить фрезами не более $\varnothing 10.0 \text{ мм}$.

6 Высокая скорость резания и большая температура в зоне резания способствуют уменьшению сил резания. Высокая производительность процесса обусловлена большой рабочей подачей. Маленькое сечение стружки является фактором ограничения эффективности процесса. Из-за возможности повторного резания инструментом стружки (являющейся фактически абразивом) проблема своевременной эвакуации стружки из зоны резания имеет важнейшее значение. Это подтверждается на практике, так как по характеру износа фрез видно, что он в большей мере вызван перерезанием стружки. Решение данной проблемы – подача в зону резания обильной СОЖ, а лучше – масляного тумана в сочетании с воздушным обдувом под большим давлением.

(Продолжение следует.) 

Высокоскоростное фрезерование в современном производстве

(Окончание. Начало в ## 12÷14)

Александр Степанов ("Инженерный консалтинг", Москва, www.e-consul.ru)

mail@e-consul.ru



Проверка теории на практике

В техническом задании от ОАО "Арзамасский приборостроительный завод" была поставлена задача оптимизации обработки детали "Вставка" на основе проведенных исследований режимов высокоскоростной механообработки (*HSM*).

Цель работы – определение стратегии окончательной обработки формообразующей детали пресс-формы на станке, предназначенном для *HSM*, и получение оптимальной УП при условии обеспечения высокой стойкости инструмента и постоянства исполняемых размеров.

3D-моделирование детали "Вставка"

Для получения управляющей программы вначале по чертежу была построена трехмерная CAD-модель в системе *Pro/ENGINEER* (рис. 27).



Рис. 27. Чертеж и трехмерная модель детали "Вставка"

Исходные данные для механической обработки

✓ Технологическое оборудование

Для изготовления детали в техническом центре ИКФ "Солвер" был использован станок *Vibra-Free* с системой управления *FANUC*, имеющей специальную функцию *HPCC (High Precision Contour Control)*, которая позволяет системе ЧПУ обрабатывать кадры УП очень быстро и точно за счет того, что для обработки сигналов обратной связи используется дополнительный процессор.

✓ Инструмент

Режущий инструмент был определен заказчиком: сферическая фреза *SECO SM06-02003.0-B90A30-2* диаметром 2.0 мм с покрытием *TiN*, имеющая два зуба.

✓ Заготовка

Материал заготовки: сталь 45, твердость 35...40 *HRc*.

✓ Технологическое приспособление

В качестве приспособления был использован прецизионный трехкулачковый токарный патрон (рис. 28).



Рис. 28. Приспособление для обработки

Анализ данных и режущего инструмента

Согласно чертежу (рис. 27), допуски на диаметр $\varnothing 2.54 \pm 0.02$ и глубину $1.32^{+0.02}$ являются достаточно жесткими. Очевидно, что обработка должна быть выполнена двумя инструментами – черновой и чистой фрезой одного диаметра. Малая глубина резания позволяет, с некоторыми ограничениями, применить для обработки двузубые фрезы.

Фактический диаметр фрезы (2 мм) выполняется с известным из каталога фирмы *SECO* допуском, то есть $\varnothing 1.994_{-0.02}$ мм.

Следовательно, номинальный диаметр фрезы, принятый для расчета (с учетом отжима фрезы при обработке закаленной стали), должен быть равен 1.98 мм. Идя на эту небольшую хитрость, мы считываем, что исполняемый размер должен получиться примерно в середине поля допуска, а точнее – ближе к верхней границе поля допуска. Вообще говоря, значение отжима фрезы можно определить только экспериментальным путем. Отметим, что размеры CAD-модели должны быть заданы в **середине поля допуска**.

Итак, при разработке управляющей программы и назначении режимов резания в *Pro/ENGINEER* мы назначили следующие параметры инструментов для предварительной и окончательной обработки: диаметр = 1.98 мм, число зубьев = 2.

Отметим, что на практике наилучшим вариантом было бы создание нескольких управляющих программ, рассчитанных для фрез различного диаметра: Ø1.98 (УП №0001), Ø1.975 (УП №0002), Ø1.97 (УП №0003). Чтобы использовать инструмент по возможности дольше, по мере износа фрез следует выполнять эти УП последовательно. К примеру, 30 деталей – по программе №0001, 20 деталей – по программе №0002, 15 деталей – по программе №0003. Какой диаметр фрезы считать номинальным, какие УП следует подготовить, сколько деталей и какими программами обработать, – всё это уточняется в процессе серийного изготовления деталей.

Моделирование механической обработки в системе Pro/E

Для изготовления детали “Вставка” был разработан технологический процесс обработки с учетом используемого оборудования. При этом были определены последовательности обработки, оставляемые припуски, режимы резания и параметры создания траекторий.

Моделирование обработки и подготовка УП осуществлялись в среде программного комплекса Pro/ENGINEER NC Machining Option (модули VERICUT и Pro/NC-GPOST), который позволяет:

- выбрать необходимый инструмент;
- выбрать оптимальную последовательность обработки;
- оптимизировать траектории движения инструмента;
- устранить ошибки и несанкционированные врезания инструмента в материал;
- рассчитать время обработки и объем удаляемого материала в зависимости от параметров резания;
- проверить программу обработки, соответствие выбранного инструмента и оснастки при моделировании движений механических частей станка.

1 Переход №1 – предварительная обработка первой фрезой

✓ Первая последовательность

В первой последовательности (NC Sequence) было использовано “фрезерование объема” (Volume

Таблица 9. Значения параметров Pro/E для создания плавной траектории предварительной обработки

| SCAN_TYPE | SPIRAL_MAINTAIN_CUT_TYPE |
|---------------------|--------------------------|
| CUT_TYPE | CLIMB |
| RETRACT_OPTION | SMART |
| RETRACT_TRANSITION | ARC_TRANSITION |
| CORNER_FINISH_TYPE | FILLET |
| CIRC_INTERPOLATION | ARC_ONLY |
| CORNER_ROUND_RADIUS | 0.1 |
| RAMP_ANGLE | 1 |
| CLEAR_DIST | 0.1 |
| RETRACT_RADIUS | 0 |
| CUT_DIRECTION | STANDARD |

Milling) с видом обработки ROUGH_ONLY, что предполагает предварительную обработку параллельными слоями. Параметры и их значения, выбранные для получения плавной траектории инструмента, приведены в табл. 9. В результате была получена траектория, показанная на рис. 29.

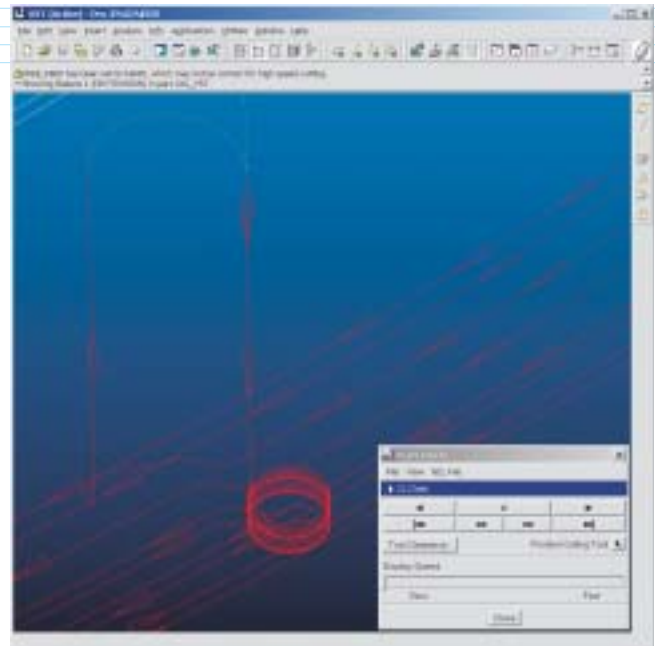


Рис. 29. Плавная траектория предварительной обработки

В соответствии с выбранными значениями параметров обработки, сформированная траектория представляет собой набор плавных кривых, причем соединение концов соседних проходов происходит по тангенциальным дугам (параметры CORNER_FINISH_TYPE, CORNER_ROUND_RADIUS). Подъем до плоскости безопасности и перебег также осуществляются плавно, с помощью дуг сопряжения (RETRACT_TRANSITION; RETRACT_RADIUS). Врезание инструмента в металл важно производить постепенно – по спирали (SCAN_TYPE = SPIRAL_MAINTAIN_CUT_TYPE) с соответствующим углом врезания (RAMP_ANGLE) методом попутного фрезерования (CUT_TYPE = CLIMB).

Режимы резания при HSM-обработке назначаются по каталогу, а затем уточняются при отладке операции на станке.

Режимы резания для предварительной обработки первым инструментом во время выполнения последовательности обработки №1 соответствуют рекомендуемым:

- скорость вращения шпинделя – 40 000 об/мин;
- рабочая подача – 4000 мм/мин;
- глубина резания – 0.05 мм;
- ширина резания – 0.1 мм;
- припуск – 0.05 мм;
- расчетное время первого перехода ($T_{\text{маш}_1}$) – 3.5248 мин.

2 Переход №2 – окончательная обработка второй фрезой

При генерации траектории инструмента для окончательной обработки были использованы три последовательности.

✓ Вторая последовательность

Использовалось “фрезерование объема” (*Volume Milling*) с видом обработки *POCKETING*, что предполагает обработку стенок с врезанием по дуге. Параметры и их значения, выбранные для формирования плавной траектории, приведены в табл. 10. В результате была получена траектория, показанная на рис. 30.

Таблица 10. Значения параметров Pro/E для создания плавной траектории (вторая последовательность)

| | |
|---------------------|----------------|
| SCAN_TYPE | TYPE_SPIRAL |
| CUT_TYPE | CLIMB |
| RETRACT_OPTION | SMART |
| RETRACT_TRANSITION | ARC_TRANSITION |
| CORNER_FINISH_TYPE | FILLET |
| CIRC_INTERPOLATION | ARC_ONLY |
| CORNER_ROUND_RADIUS | 0.2 |
| RAMP_ANGLE | 1 |
| CLEAR_DIST | 0.4 |
| RETRACT_RADIUS | 0.5 |
| CUT_DIRECTION | STANDARD |
| HELICAL_DIAMETER | 0.4 |
| LEAD_IN | YES |
| LEAD_OUT | YES |
| LEAD_RADIUS | 0.25 |

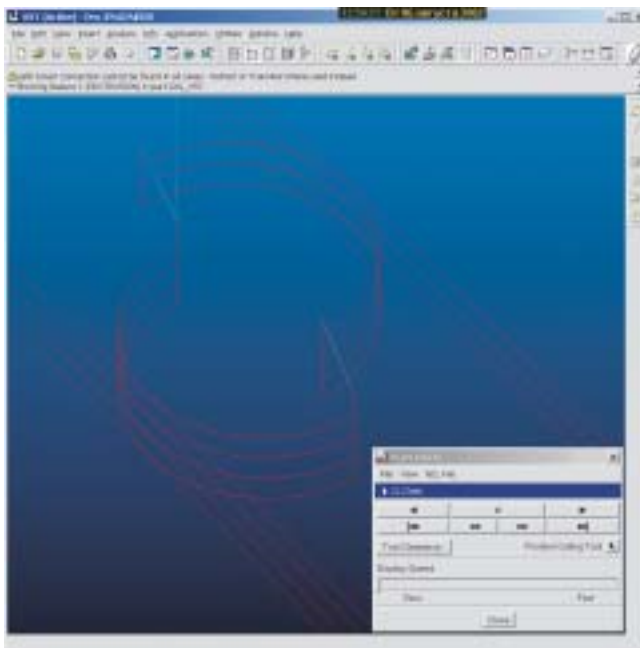


Рис. 30. Траектория последовательности №2

Отметим, что подход (*LEAD_IN*) и отход (*LEAD_OUT*) инструмента производятся по дуге с радиусом 0.25 мм (*LEAD_RADIUS*). Причем направление движения инструмента при обработке противоположных стенок остается неизменным – попутное фрезерование (*CUT_TYPE = CLIMB*).

Режимы резания для окончательной обработки

Таблица 11. Значения параметров Pro/E для создания плавной траектории (третья последовательность)

| | |
|------------------|---------------|
| SCAN_TYPE | TYPE_HELICAL |
| LACE_OPTION | CURVE_CONNECT |
| AUTO_SYNCHRONIZE | YES |
| CUTLINE_TYPE | FLOWLINES |

вторым инструментом во время выполнения последовательности №2:

- скорость вращения шпинделя – 40 000 об/мин;
- рабочая подача – 4000 мм/мин;
- глубина резания – 0.05 мм;
- ширина резания – 0.1 мм;
- припуск – 0.0 мм;
- расчетное время – 1.25673 мин.

✓ Третья последовательность

Использовалось “фрезерование поверхности” (*Surface Milling*) для обработки донной части; вид обработки – *TYPE_HELICAL*, что предполагает движение инструмента по спирали. Значения параметров для получения плавной траектории (рис. 31) приведены в табл. 11.

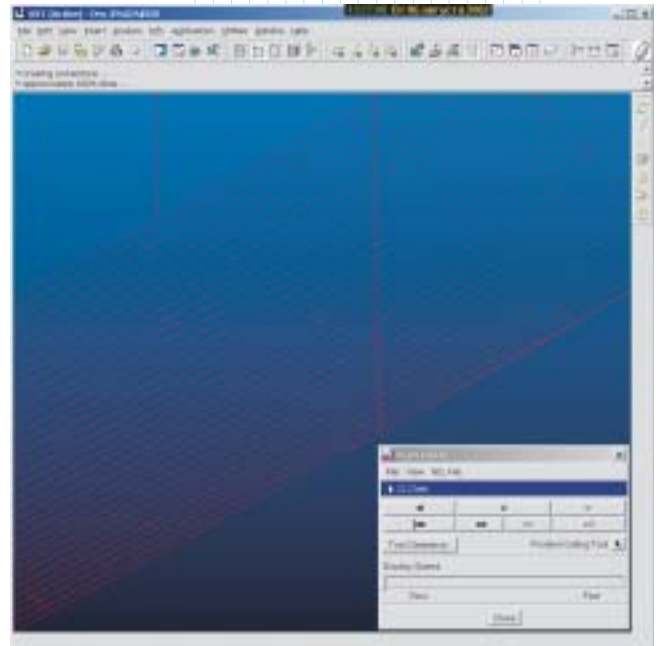


Рис. 31. Траектория последовательности №3

Обработка осуществляется по спирали (*TYPE_HELICAL*), без переходов между проходами.

Режимы резания для окончательной обработки вторым инструментом во время выполнения последовательности №3:

- скорость вращения шпинделя – 40 000 об/мин;
- рабочая подача – 4000 мм/мин;
- ширина резания – 0.02 мм;
- расчетное время – 0.771638 мин.

✓ Четвертая последовательность

Использовалось “фрезерование поверхности” (*Surface Milling*) для калибровки (шероховатость *SCALLOP_HGT = 0.001* мм) дна и стенок с видом обработки *TYPE_HELICAL*, что предполагает

Таблица 12. Значения параметров Pro/E для создания плавной траектории (четвертая последовательность)

| | |
|------------------|--------------|
| SCAN_TYPE | TYPE_HELICAL |
| LACE_OPTION | ARC_CONNECT |
| AUTO_SYNCHRONIZE | YES |
| CUTLINE_TYPE | FLOWLINES |

движение инструмента по спирали. Значения параметров для получения плавной траектории инструмента приведены в табл. 12, а сама траектория показана на рис. 32.

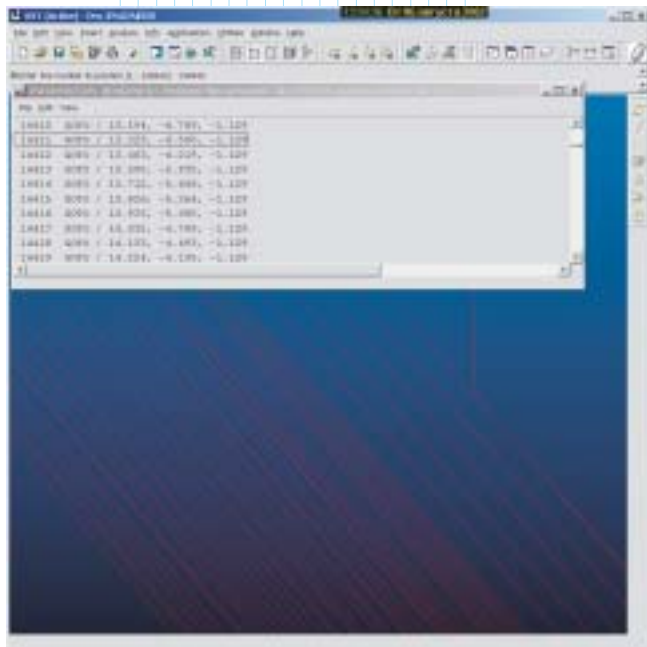


Рис. 32. Траектория последовательности №4

Обработка осуществляется по спирали (*TYPE_HELICAL*), без переходов между проходами, но с переменным расстоянием между ними, что обусловлено изменением наклона стенки. Система *Pro/ENGINEER* автоматически определяет расстояние между проходами для получения заданной шероховатости поверхности.

Режимы резания для окончательной обработки вторым инструментом во время выполнения последовательности №4:

- скорость вращения шпинделя – 40 000 об/мин;
- рабочая подача – 4000 мм/мин;
- ширина резания – 0.01 мм;
- расчетное время – 0.808763 мин.

✓ **Расчетное время**

Расчетное время второго перехода ($T_{\text{маш}_2}$) получаем путем сложения времени выполнения последовательностей обработки №2, №3 и №4:

$$T_{\text{маш}_2} = 1.25673 + 0.771638 + 0.808763 = 2.837131 \text{ мин.}$$

Расчетное время всей операции обработки получаем путем сложения времени выполнения переходов №1 и №2:

$$T_{\text{маш}} = T_{\text{маш}_1} + T_{\text{маш}_2} = 3.5248 + 2.837131 = 6.361931 \text{ мин.}$$

Обработка деталей на станке

На станке была проведена обработка 12 деталей “Вставка”. Фактическое время обработки (машинный цикл) одной детали составило 8.5 мин.

На иллюстрациях (рис. 33, 34) показано моделирование переходов операции. На рис. 35 показана деталь, обработанная окончательно.

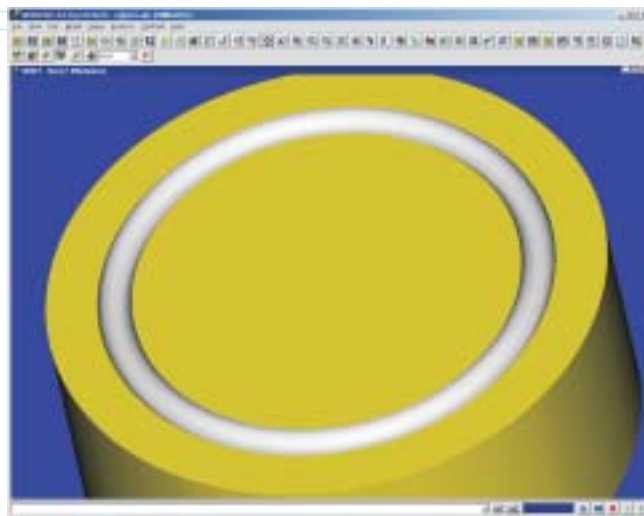


Рис. 33. Моделирование перехода №1

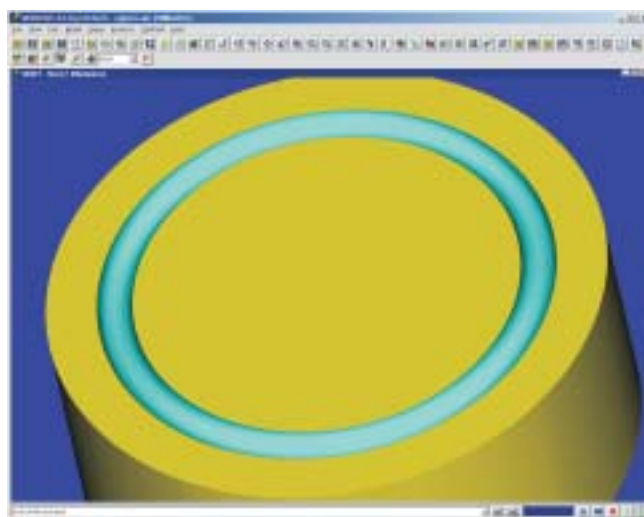


Рис. 34. Моделирование перехода №2



Рис. 35. Обработанная деталь

Контроль точности размеров изготовленных деталей на КИМ

Из данных измерения параметров обработанных деталей следует, что стратегия обработки и управляющая программа были разработаны правильно, так как отклонений размеров обработанной детали от размеров чертежа не выявлено, а шероховатость обработанной поверхности ($8 \div 9$ класс) соответствует требованиям чертежа.

Визуальным осмотром фрез и путем измерения режущих кромок на установке *Lindex* было определено, что износ инструмента после обработки 12 деталей практически отсутствует. Это подтверждается и постоянством размеров обработанных деталей.

Выводы по результатам обработки деталей “Вставка”

Окончательное время обработки детали “Вставка”, после отладки непосредственно на станке и оптимизации УП, составило 8.5 минут. Увеличение времени изготовления детали, по сравнению с расчетным, составляет около 20%, что обусловлено потерями времени на смену инструмента и особенностями системы управления *FANUC*.

В процессе реального производства на ОАО “АПЗ” была установлена стойкость инструмента – примерно 100 деталей. Ранее стойкость ограничивалась десятью деталями (при длительности машинного цикла 12 минут). Увеличение стойкости было достигнуто лишь изменением технологии изготовления и оптимизацией стратегии механообработки.

Справедливости ради стоит отметить, что для подобного случая *HSM*-обработки предпочтительнее использовать сферические фрезы с покрытием *TiAlN*, имеющие 4 зуба и торцовый зуб для врезания в металл (например, производства фирмы *HANITA*). Тогда стойкость инструмента была бы намного выше (а время обработки – меньше) при применении более высоких режимов резания. Но как видим, даже неоптимальным инструментом можно выполнять эффективную механообработку, если знать принципы *HSM*-обработки и возможности *CAM*-системы, позволяющие применить эти принципы на практике.

Заключение

Быстрое развитие технологии изготовления современного инструмента и оборудования предлагает новые решения технологии механообработки. Высокоскоростная механическая обработка – ярко выраженный пример такого решения. Технология *HSM* обеспечивает высокую скорость удаления металла (производительность) и хорошую чистоту поверхности, одновременно устраняя потребность в охлаждающей эмульсии. Несмотря на высокие требования к режущему инструменту и оборудованию, *HSM*-обработка обладает многочисленными преимуществами: она позволяет сократить время

цикла производства и делает лишними некоторые из видов обработки (например, финишную доводку) при одновременном обеспечении требуемой точности. Эти преимущества являются решающими доводами в пользу использования *HSM*.

С увеличением прикладного значения *HSM*, имеющей широкий диапазон возможностей, в том числе для инструментальной промышленности, изменение планирования технологического процесса изготовления формообразующей оснастки становится очень важным вопросом. Применять электроэрозионную обработку или нет? На этот вопрос нет однозначного ответа. Главный руководящий принцип: для сложной детали с глубокими полостями, в которых имеются острые внутренние углы, *EDM* – самый лучший способ обработки, и это – несомненно. Рекомендуемый порог выбора между *EDM* и *HSM* – это значение коэффициента “соотношение диаметра инструмента и его длины (вылета)”, которое находится в диапазоне $1/6 \div 1/8$. Чем тверже обрабатываемый материал, тем большим должно быть значение этого коэффициента для обоснованного применения *HSM*.

Процесс *HSM* известен уже долгое время, но серьезные исследования еще только начинаются. Поэтому следует ожидать дальнейшего совершенствования процесса металлообработки резанием и выработки научных рекомендаций по минимизации затрат на его осуществление.

Для успешного использования *HSM* специалисты должны учитывать все аспекты этого явления. Теория резания, современный режущий инструмент, инструментальная оснастка, возможности систем *CAD/CAM*, особенности оборудования и прочие факторы, от которых зависит процесс *HSM*, – всё это очень важно знать. Те специалисты, которые понимают методологию *HSM* и применяют свои знания правильно, будут вознаграждены огромным прыжком в производительности механообработки.

От редакции

Итак, завершена публикация большого эксклюзивного материала, посвященного высокоскоростной обработке. Надо отметить, что статья вызвала живой читательский отклик, что свидетельствует о большом интересе к этой теме в сапровском сообществе. Кроме того, с нашей точки зрения, внедрение ВСО имеет и большое общественное значение. Конкурентоспособность производства сегодня напрямую зависит от успешного освоения новейших технологий, и ВСО открывает здесь большие перспективы.

В этой связи наш журнал будет и впредь стремиться освещать различные аспекты этой темы. Приглашаем всех, кто имеет опыт внедрения ВСО, отозваться и рассказать о своих успехах и проблемах. Мы уверены, что такой разговор будет полезен всем нашим читателям. Со своей стороны, редакция обещает содействие в публикации. 