

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 полустовую 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*.

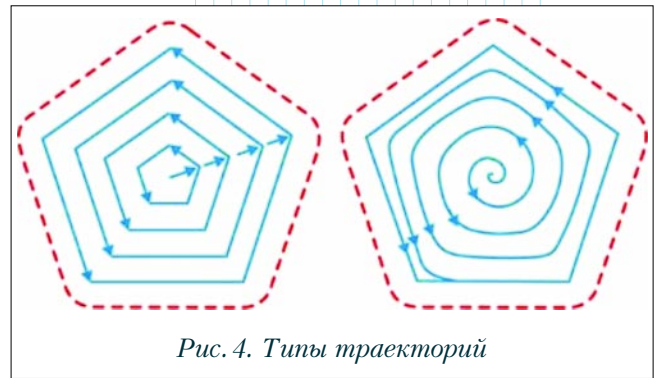


Рис. 4. Типы траекторий

✓ **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 монокристаллические 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 монокристаллических 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.) 