

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.

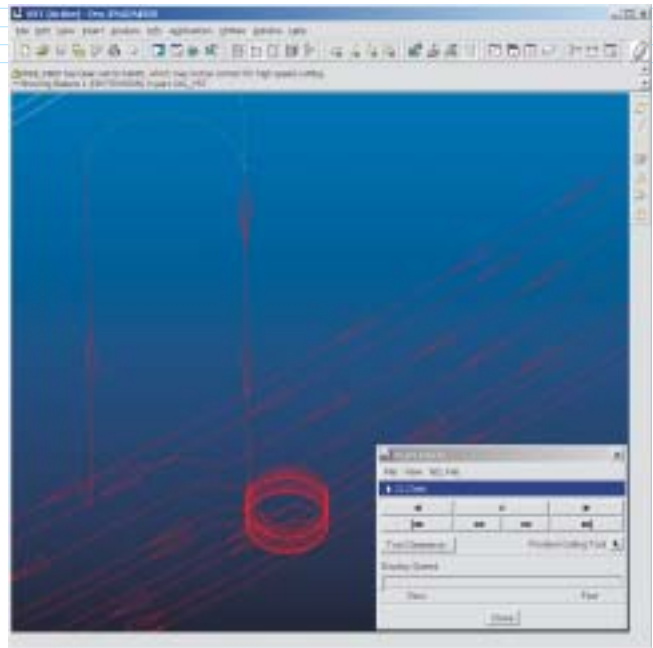


Рис. 29. Плавная траектория предварительной обработки

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

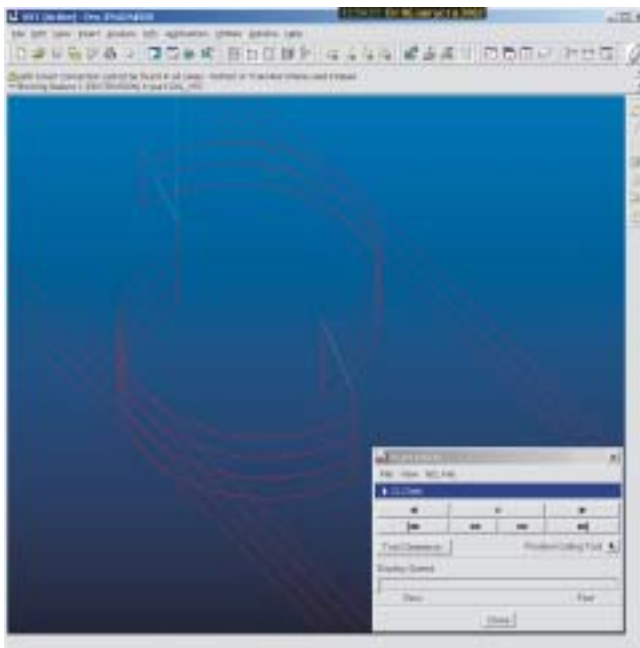


Рис. 30. Траектория последовательности №2

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.

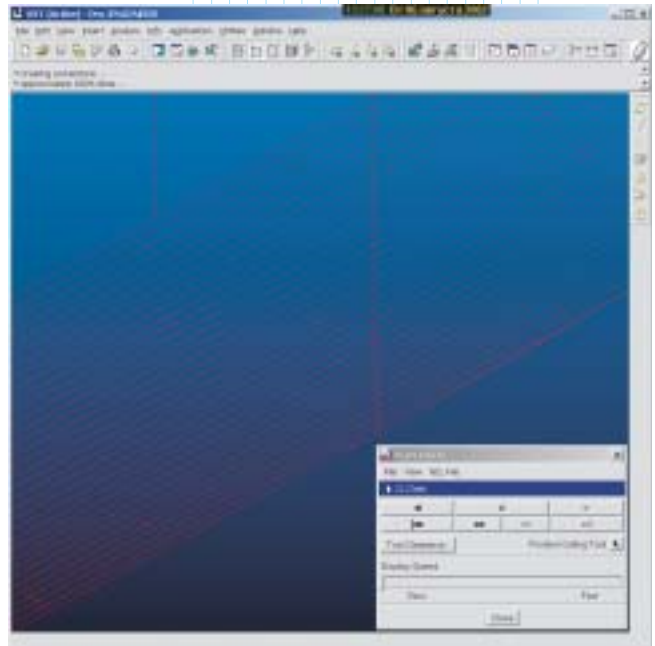


Рис. 31. Траектория последовательности №3

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.

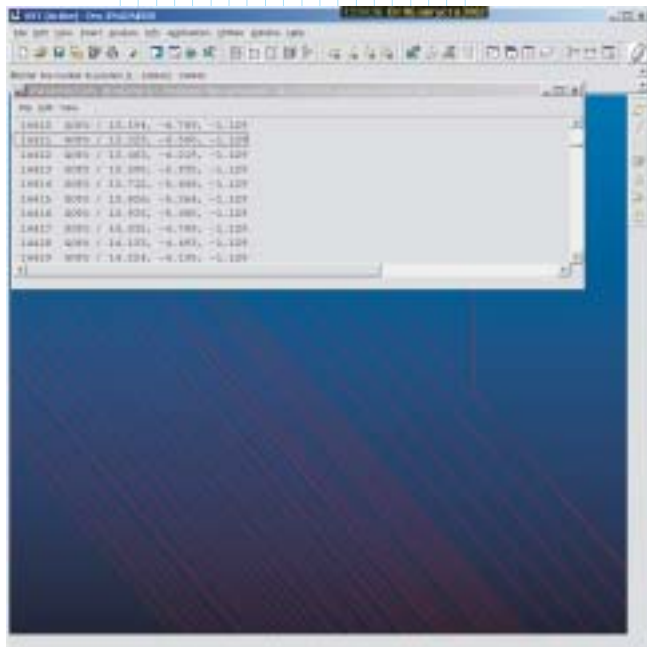


Рис. 32. Траектория последовательности №4

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.

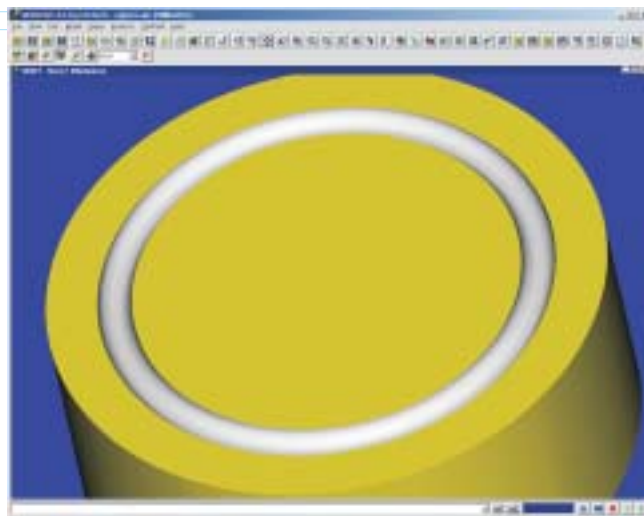


Рис. 33. Моделирование перехода №1

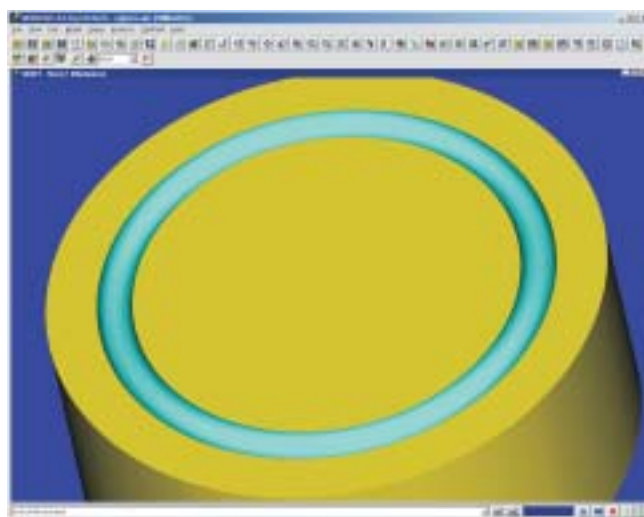


Рис. 34. Моделирование перехода №2



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. 