

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.

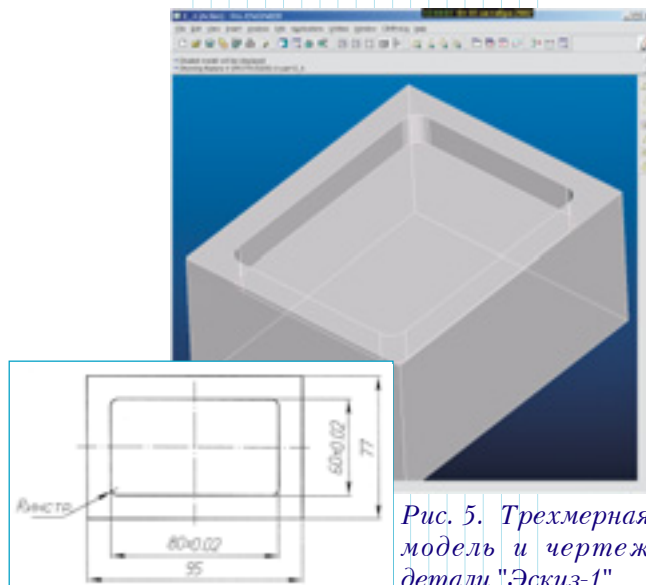


Рис. 5. Трехмерная модель и чертеж детали "Эскиз-1"

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

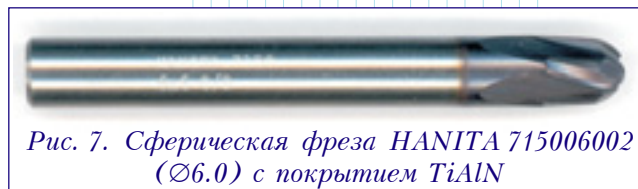


Рис. 7. Сферическая фреза *HANITA 715006002* ($\varnothing 6.0$) с покрытием TiAlN

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÷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÷60 HRC и сферической 4-зубой фрезы HANITA 715006002 диаметром 6.0 мм с по-

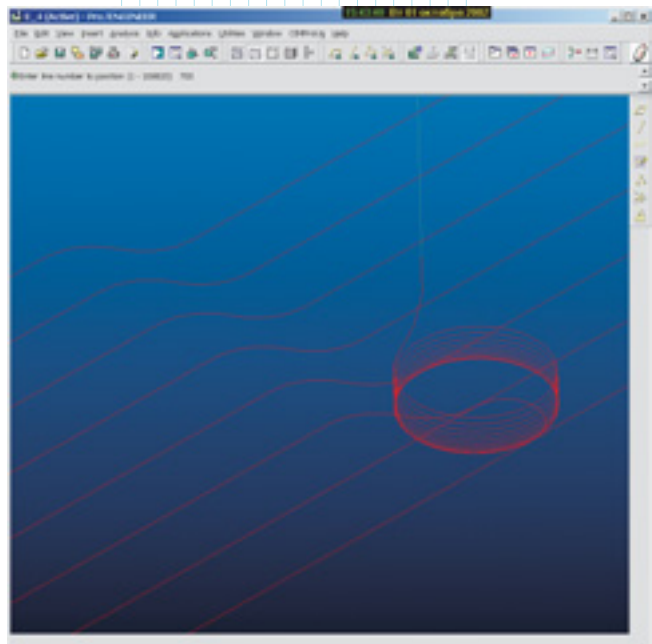


Рис. 8. Плавная траектория для обработки детали "Эскиз-1"

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

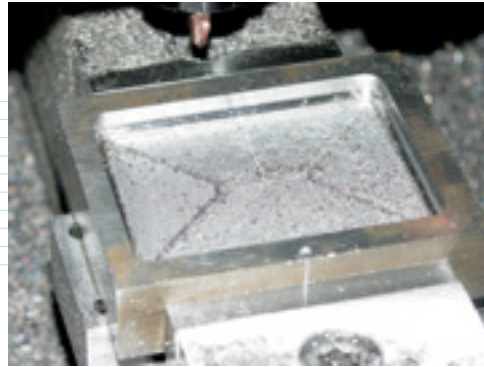


Рис. 9. Деталь после обработки фрезой FRAISA

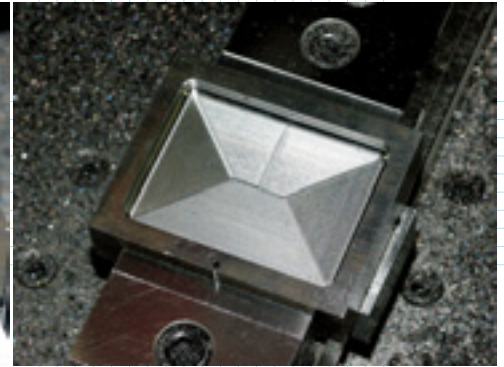


Рис. 10. Деталь после обработки фрезой HANITA

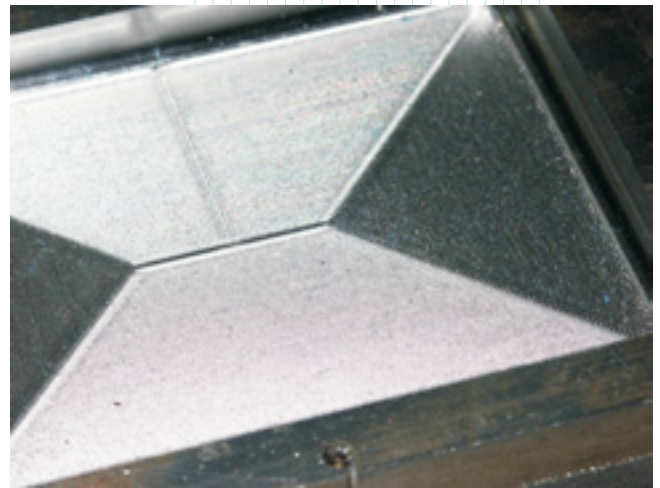


Рис. 11. Траектория инструмента

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



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

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).

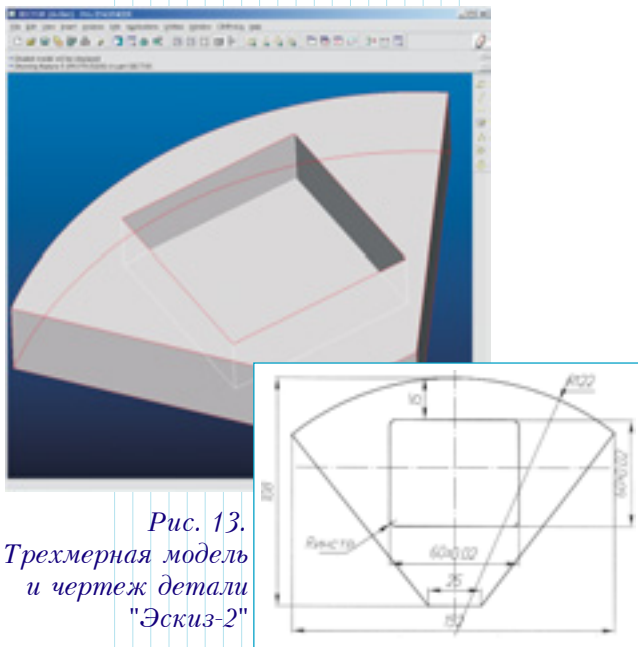


Рис. 13. Трехмерная модель и чертеж детали “Эскиз-2”

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.

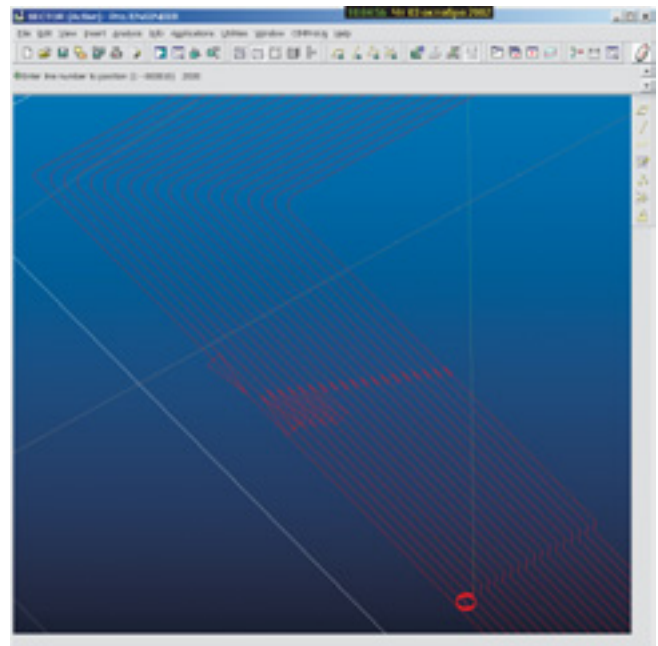


Рис. 15. Плавная траектория для обработки детали “Эскиз-2”

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 неплавной 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.

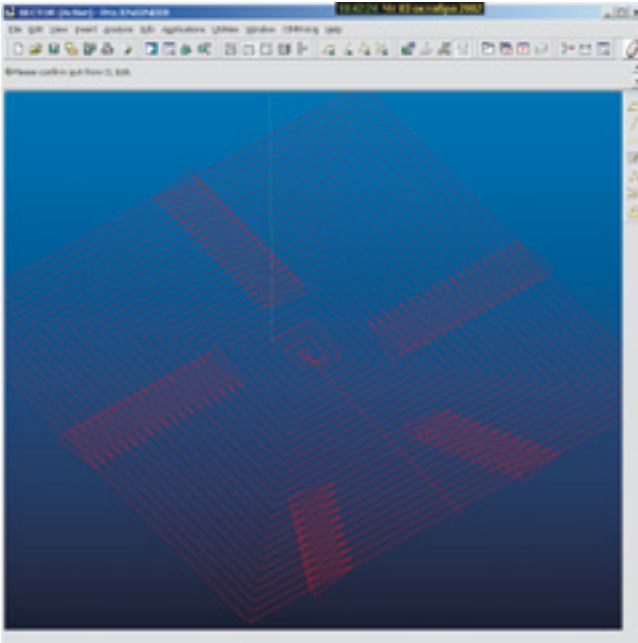


Рис. 16. Траектория, намеренно созданная без учета требований HSM

✓ **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

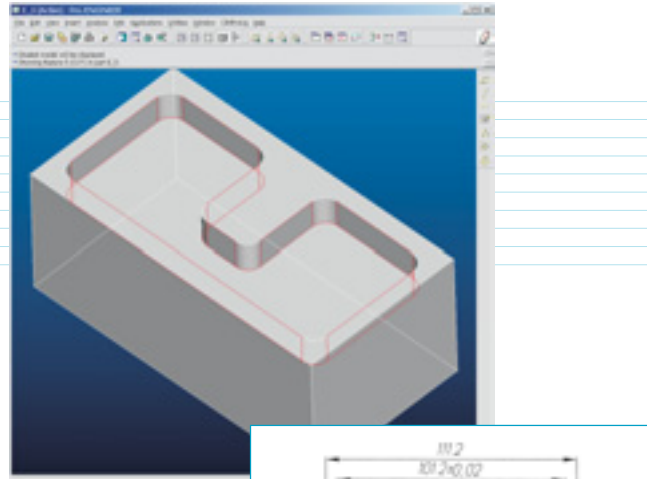


Рис. 20. Трехмерная модель и чертеж детали “Эскиз-3”

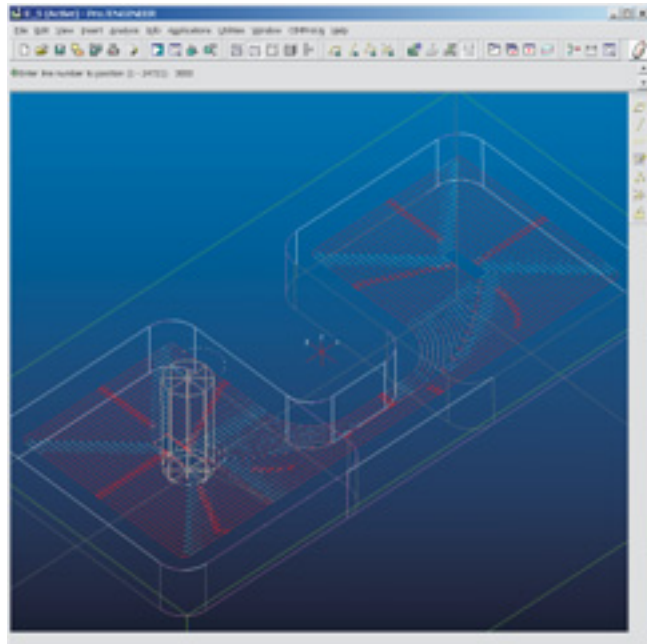


Рис. 22. Траектория инструмента при обработке детали “Эскиз-3”

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

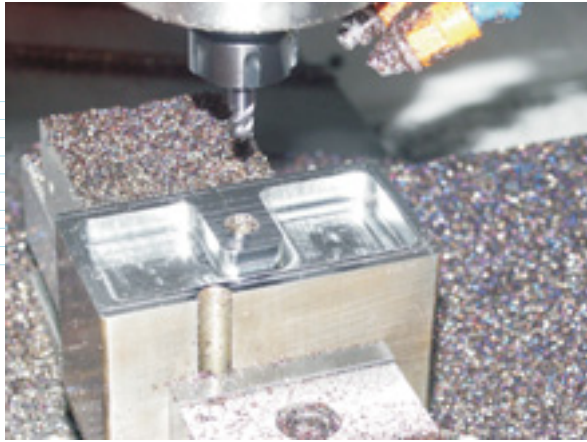


Рис. 23. Деталь "Эскиз-3" после обработки

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

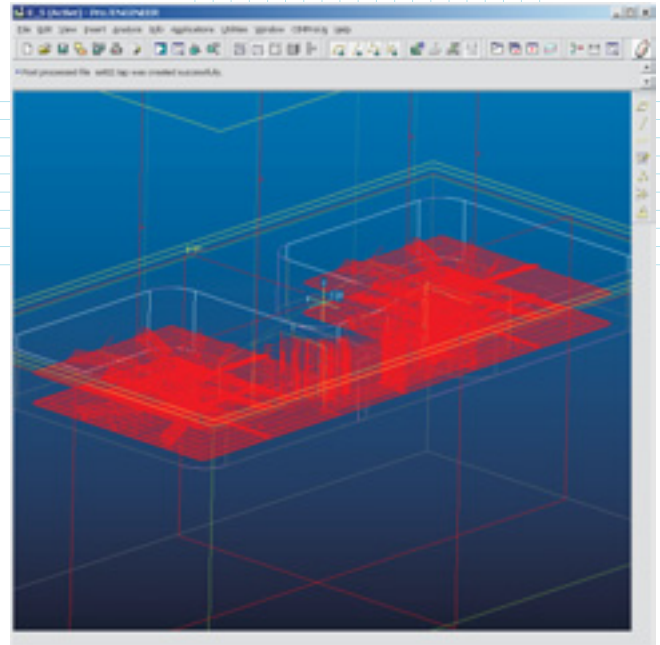


Рис. 25. Траектория для обработки с большой глубиной резания

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 шадящих 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.) 