

Высокоскоростная обработка

О высокоскоростной обработке много говорят, но мало кто объясняет, что это такое и еще меньше людей реально представляют, как к ней подступиться. Типичная ситуация — купили новый станок со шпинделем на 12-25 тыс. оборотов минуту, приобрели дорогой инструмент от Sandvik Coromant или Mitsubishi Carbide, установили режимы резания, которые рекомендует фирма в своих каталогах, и начали этот инструмент ломать. А то, наслышавшись о высоком качестве поверхности при высокоскоростной обработке, безуспешно пытаются достичь подобного качества и, не добившись сколько-нибудь приемлемого результата, подвергают сомнению целесообразность денежных затрат на станок и инструмент. Где то что-то упущено, но где именно и что конкретно, кто подскажет?

Данная лекция (статья) базируется на опыте, полученном специалистами фирмы Delcam plc в области высокоскоростной обработки. Фирма стояла у истоков развития высокоскоростной обработки (ВСО), участвуя совместно с рядом станкостроительных фирм и университетов в европейском проекте по исследованию ВСО, а также одной из первых использовала эту технологию в своем собственном цехе при изготовлении пресс-форм и штампов. Результатом этой работы стало появление новых стратегий и модулей в известной системе PowerMILL, давно и успешно используемой в инструментальном производстве.

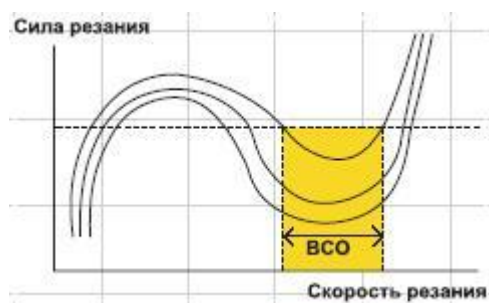


Рис. 1. Кривые Соломона. Зависимость сил резания от скорости резания

Итак — ВСО. Теоретическим обоснованием высокоскоростной обработки являются так называемые кривые Соломона (рис. 1), которые показывают снижение сил резания в некотором диапазоне скоростей. Но наиболее важным фактором здесь является перераспределение тепла в зоне резания. При небольших сечениях среза в данном диапазоне скоростей основная масса тепла концентрируется в стружке, не успевая переходить в заготовку. Именно это позволяет производить обработку закаленных сталей, не опасаясь отпуска поверхностного слоя. Отсюда следует основной принцип ВСО: малое сечение среза, снимаемое с высокой скоростью резания, и соответственно высокие обороты шпинделя и высокая минутная подача (рис. 2). Есть даже рекомендация, что глубина резания не должна превышать 10% диаметра фрезы. Но с разработкой новых многозубых фрез для черновой обработки закаленных сталей изготовители инструмента рекомендуют традиционные глубины резания при сохранении малых шагов (рис. 3). В этом случае можно говорить о тонких сечениях среза. Имея возможность вести лезвийную обработку закаленных сталей, можно обеспечить качество поверхности, соизмеримое с электроэрозионной обработкой. Это позволяет пересмотреть структуру производственного процесса изготовления формообразующих элементов пресс-форм и штампов (рис. 4).



Рис. 2. Режимы резания для традиционной и высокоскоростной обработки

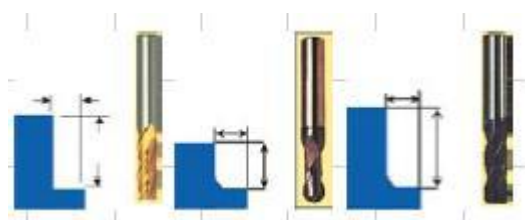


Рис. 3. Высокоскоростная обработка

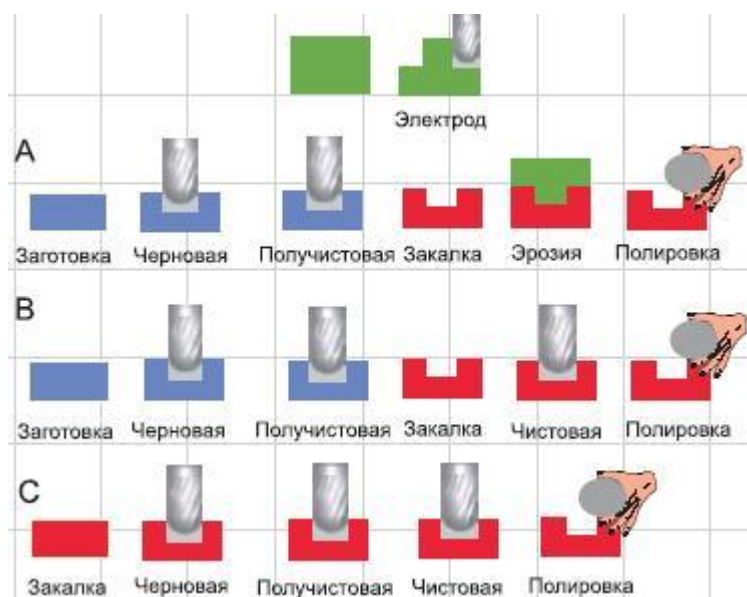


Рис. 4. Упрощение производственного процесса изготовления формообразующих элементов оснастки (пресс-формы, штампы) при использовании ВСО

Главный эффект ВСО заключается не в сокращении машинного времени за счет интенсификации режимов резания, а в общем упрощении производственного процесса и в повышении качества обработки. Условием успеха в высокоскоростной обработке может стать правильный выбор всех составляющих факторов, участвующих в этом процессе: станок, система ЧПУ, режущий инструмент, вспомогательный инструмент с системой закрепления инструмента, система программирования, квалификация технолога программиста и оператора станка с ЧПУ. Пренебрежение хотя бы одним из этих составляющих способно свести на нет все предыдущие усилия.

Станок

Современный станок для ВСО имеет скорость вращения шпинделя 12_25 тыс. оборотов в минуту и оснащен средствами температурной стабилизации шпинделя. Некоторые фирмы предлагают станки со скоростью вращения до 40 тыс. оборотов в минуту. Скорости подачи 40_60 м/мин, скорость быстрых перемещений — до 90 м/мин. Станки обрабатывают малые перемещения (от 5 до 20 мкм) и имеют повышенную жесткость и

температурную компенсацию. Именно прогресс в области станкостроения позволил осуществить ВСО. Ограничителем ВСО может стать система ЧПУ, если она не имеет высокой скорости обработки кадров. Для достижения высокого качества поверхности программа для ВСО содержит очень малые перемещения. Так, например, во время отработки технологии высокоскоростной обработки на фирме Delcam был отмечен дефект в виде периодических следов остановки фрезы (рис. 5) на станке Matsuura MC_800VF (выпуска 90_х годов) с системой ЧПУ Yasnac i80M. Анализ программ (рис. 6) показал, что система ЧПУ не успевает обрабатывать кадры программы при заданной подаче. Максимальную подачу, которую способна обеспечить система ЧПУ, можно определить по формуле:

$$F_{\max} = (\text{Длина перемещения в кадре}) / (\text{Время обработки кадра}) * 60$$

Из приведенного отношения следует, что при перемещениях 0,01 мм и времени обработки кадра 2 мс максимальная подача ограничена значением 0,3 м/мин. Перевод обработки на более современный станок Bridgeport снял эту проблему. Современная система ЧПУ должна «смотреть вперед» со скоростью от 100 до 200 кадров в секунду, чтобы успеть сделать расчеты для торможения на подходе к углу и разгона после поворота.



Рис. 5. Следы фрезы в местах остановки

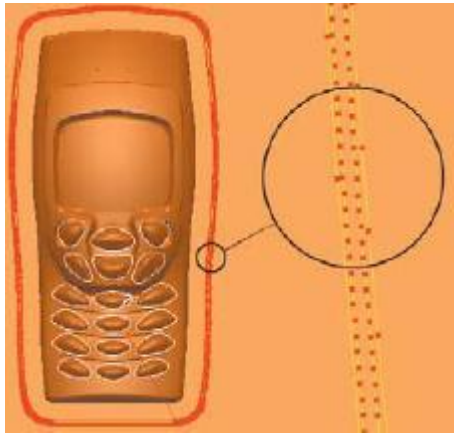


Рис. 6. Траектория инструмента при зачистке

Режущий и вспомогательный инструмент

Следующий фактор — режущий и вспомогательный инструмент. Ведущие инструментальные фирмы предлагают сегодня широкую гамму фрез для ВСО с подробными рекомендациями по областям их применения и режимам резания. Разрабатываются новые мелкодисперсные сплавы, способные надежно работать на высоких скоростях. Более важно обратить внимание на системы вспомогательного инструмента, которые обеспечивают крепление фрез. В связи со снижением сил резания в процессе ВСО на первый план выходят другие факторы, такие как величина биения фрезы, вибрации. Например, удвоение скорости резания увеличивает центробежные силы вследствие дисбаланса инструмента более чем в 4 раза, и эти силы становятся соизмеримыми с силами резания. Биение инструмента сильно влияет на износ. Это подтверждают данные экспериментов (рис. 7), где на графике видна практически линейная зависимость износа от биения при высоких скоростях резания. Таким образом, ВСО требует особого внимания к балансировке инструмента. Для этого могут использоваться специальные патроны с возможностью балансировки или сбалансированные оправки для термозажима (рис. 8).

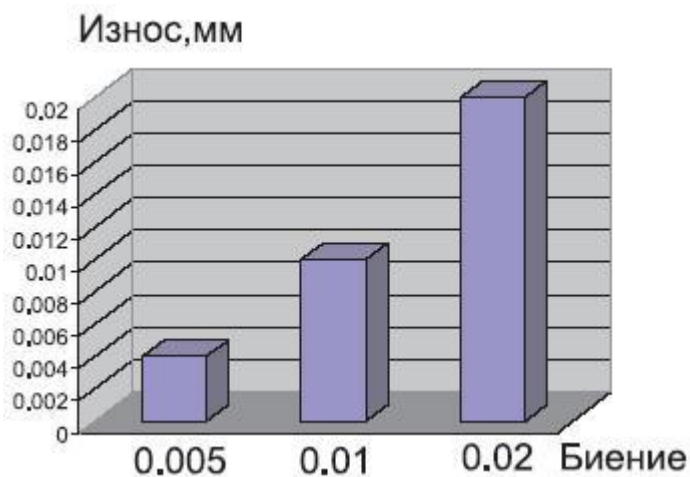


Рис. 7. Влияние биения на износ инструмента



Рис. 8. Оправки для термозажима инструмента

Условия обработки

С учетом того, что ВСО ставит задачу обеспечения высокого качества обрабатываемой поверхности, дополнительное внимание следует уделить подбору режимов резания с точки зрения нахождения зон, где отсутствуют вибрации. Например, на рис. 9 показаны зоны вибрации с различным числом волн N между зубьями фрезы в зависимости от глубины и скорости. Практически для каждой комбинации СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь) придется находить стабильные зоны, и в связи с отсутствием отработанных рекомендаций их придется экспериментальным путем искать непосредственно на станке. Наиболее склонны к вибрации коневые фрезы с нулевым радиусом скругления. Для уменьшения вибраций следует выбирать фрезы с закругленной режущей кромкой. Интересный эффект увеличения стойкости инструмента при ВСО наблюдается при сравнении способов охлаждения (рис. 10). Как показывает график, наибольшая стойкость наблюдается при использовании обдува.

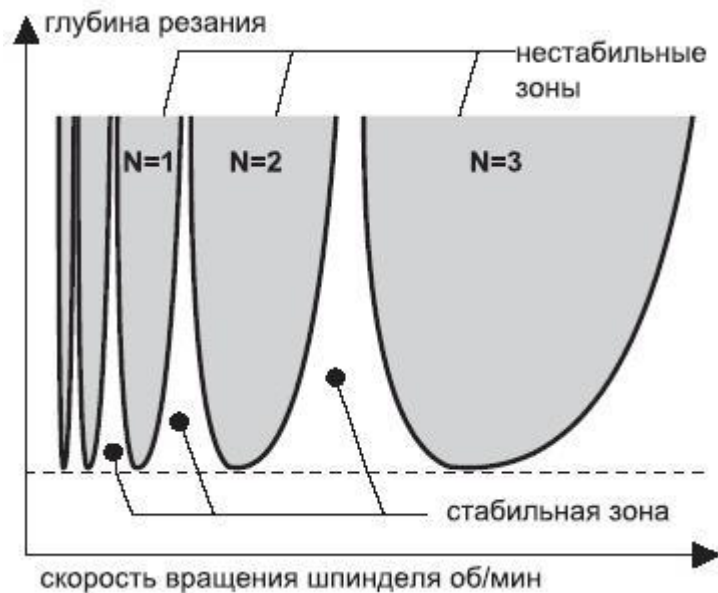


Рис. 9. Зоны вибраций при фрезеровании в зависимости от глубины резания и скорости резания

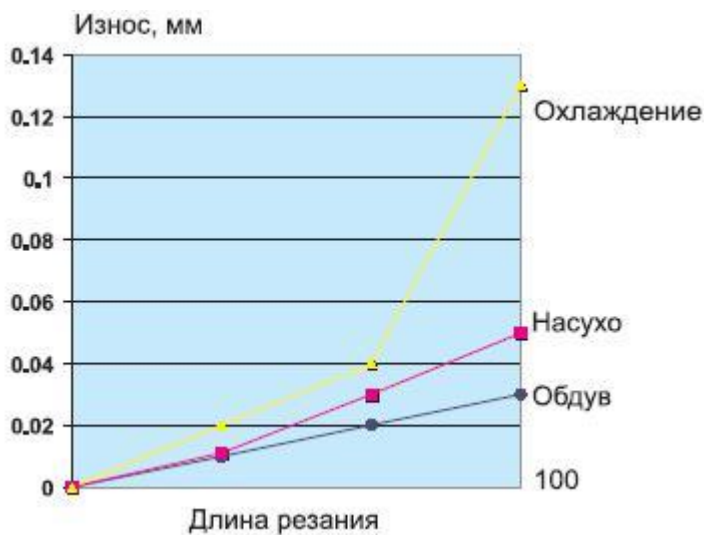


Рис. 10. Влияние методов охлаждения на износ инструмента

Поскольку тепло концентрируется в стружке, ее надо просто быстро удалить из зоны резания. Низкая стойкость инструмента при охлаждении объясняется главным образом выкрашиванием, что обусловлено циклическими термическими нагрузками на режущую кромку инструмента. Постоянная тепловая нагрузка, даже на относительно высоких температурах, лучше, чем меняющаяся циклическая нагрузка. Все вышперечисленное относится к технической стороне ВСО.

САМ-система

Приобретение станка, инструмента и организация контроля качества наладки инструмента и станка — первые шаги по направлению к ВСО. Следующий шаг связан с know-how ВСО и с возможностями САМ-системы. И здесь технологу придется изменить свой подход к программированию обработки. По сути речь идет о достаточно простых правилах, которые технолог должен выполнять при составлении программ обработки, и главное здесь — наличие САМ-системы, которая бы эти правила поддерживала.

Резать тонко, но быстро

Правило № 1 — малые сечения среза, снимаемые с большой скоростью. Мы уже упоминали, что это основа высокоскоростной обработки и реализуется она простым заданием малых шагов между проходами, за исключением случаев врезания, когда идет проход полной шириной фрезы. Такие случаи надо исключать, что достигается путем использования трохоидальной обработки, когда в процессе врезания фреза движется по окружности (рис. 11). Идеально, когда САМ-система сама строит трохоиду в местах, где необходимо осуществить врезание (рис. 12). Такая стратегия используется и при формировании пазов, которые ранее обрабатывались одним ходом фрезы того же диаметра, что и ширина паза (рис. 13).

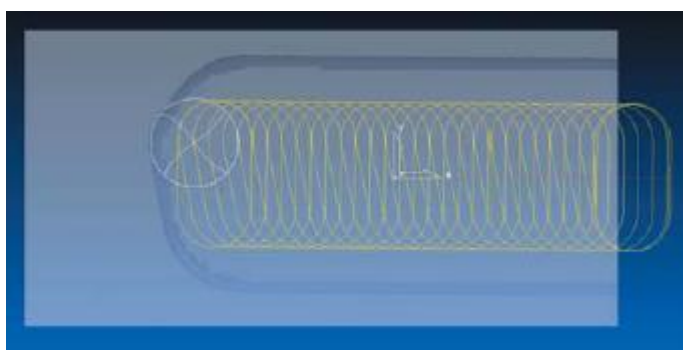


Рис. 11. Трохоидальная обработка

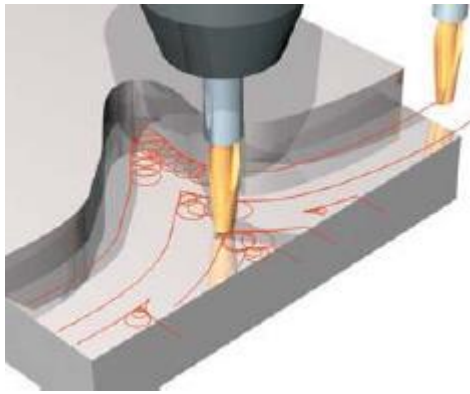


Рис. 12. Трохоидальная обработка в местах врезания инструмента на полную ширину

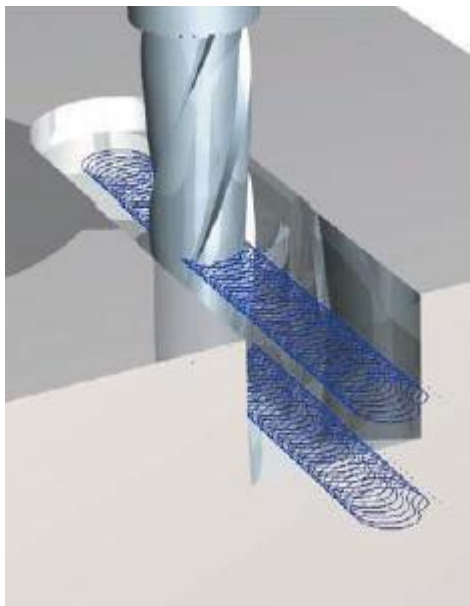


Рис. 13. Обработка пазов с использованием трохойдальной стратегии

Когда ВСО используется для обработки сразу из закаленной заготовки деталей, которые имеют отверстия, их обработка сверлением представляет собой определенную проблему — вследствие низкой стойкости сверл. В этом случае эффективным способом может стать спиральная расфрезеровка отверстий. Причем, как показывает практика, этот метод как по производительности, так и по стойкости инструмента превосходит сверление. На рис. 14-16 приведены примеры выполнения расфрезеровки в PowerMILL и данные по расфрезеровке отверстий в закаленной заготовке.

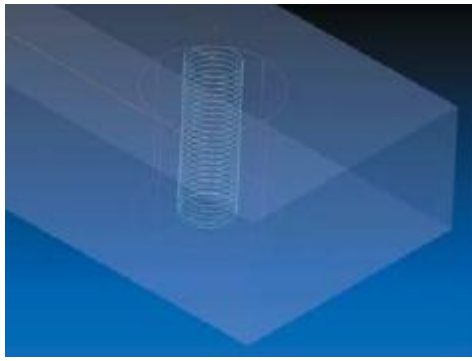


Рис. 14. Спиральная траектория при высокоскоростной расфрезеровки отверстия

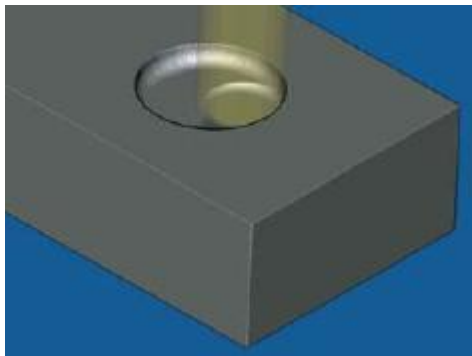


Рис. 15. Визуализация траектории расфрезеровки во ViewMILL

Условия резания	
Шаровая фреза Miracle $\varnothing 10$	
Обрабатываемый материал - HRC 52	
Обороты шпинделя 10 000 об/мин	
Подача 1700 мм/мин	
Глубина резания 0.3 мм	
Стойкость	
При фрезеровании 60 отверстий	
При сверлении - 20 отверстий	
Точность H8	

Рис. 16. Сравнение расфрезеровки и сверления отверстий в закаленной детали

В результате выполнения Правила № 1 нужно быть готовым к тому, что объем программ для ВСО значительно превосходит объемы традиционных программ силового резания и, как было отмечено выше, системы ЧПУ должны иметь возможность быстро обрабатывать программы

объемов в десятки мегабайт. Большие объемы программ требуют соответственно больших затрат времени на расчет траектории. И здесь на первый план выходит скорость расчета, которую обеспечит САМ_система. При разработке системы PowerMILL фирма Delcam plc уделяла этому особое внимание, и на сегодняшний день эта система является явным лидером по времени расчета и пересчета программ.



Рис. 17. След инструмента в углах траектории в момент изменения направления обработки

Борьба с углами

Правило № 2 — гладкая траектория движения инструмента. Это обусловлено необходимостью снижения динамических нагрузок во время резкой смены направления движения инструмента. Необходимо максимально возможное исключение углов на траектории. В углах, где инструмент меняет направление, он должен остановиться, и снижение нагрузки в этот момент вызывает врезание фрезы в тело детали (рис. 17). На рис. 18 показан результат исследования шероховатости в местах смены направления движения. След, оставшийся на детали, достигает глубины 25 микрон при общей шероховатости 3 микрона! На рис. 19 показаны примеры традиционной траектории, построенной эквидистантным смещением исходного контура, которую следует признать неэффективной для высокоскоростной обработки и уступающей в данном случае сглаженной

траектории. Такая траектория, например, создается системой PowerMILL и реализует тот же алгоритм сглаживания, который выполняет гонщик при прохождении крутых виражей (рис. 20).

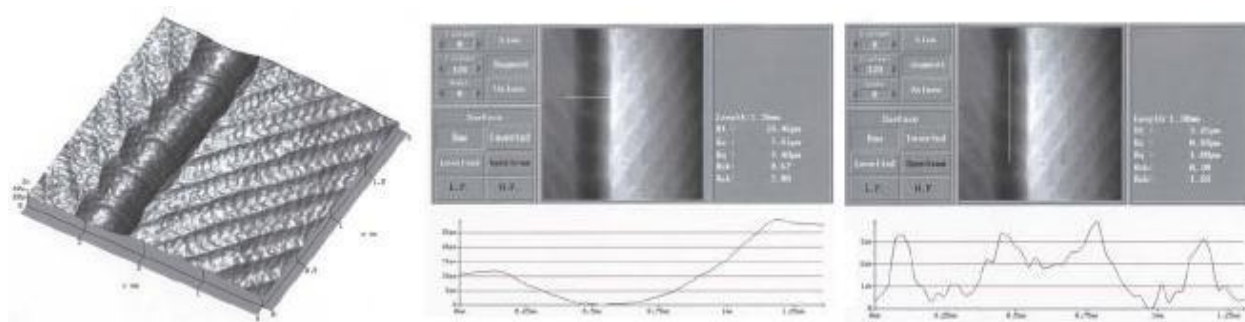


Рис. 18. Шероховатость поверхности вдоль и поперек следа

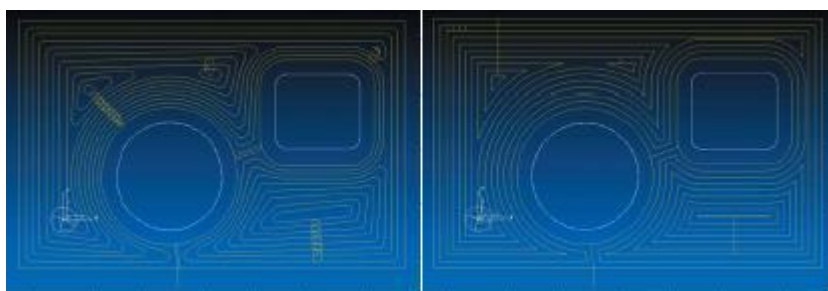


Рис. 19. Траектория смещением контура и сглаженная траектория для ВСО

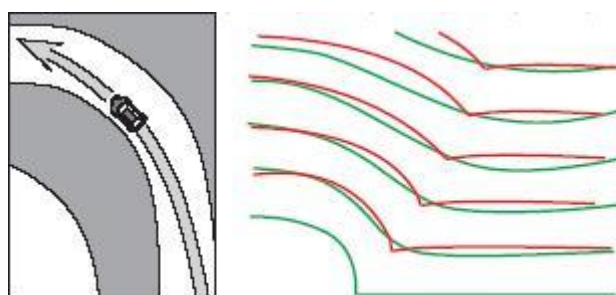


Рис. 20. Алгоритм сглаживания траектории в углах — «гоночная» траектория

Равномерная нагрузка

Правило № 3 — равномерная нагрузка на инструмент. Традиционная строчная обработка, состоящая из многочисленных ходов врезания и выходов инструмента (даже если это сглаженные входы по дуге), не может быть признана оптимальной для ВСО. Предпочтение должно отдаваться спиральным стратегиям, где инструмент, однажды врезавшись, сохраняет непрерывный и равномерный контакт с заготовкой (рис. 21), или стратегиям

эквидистантного смещения контура, которые длительное время сохраняют контакт инструмента с заготовкой, с одним заходом и выходом (рис. 22).

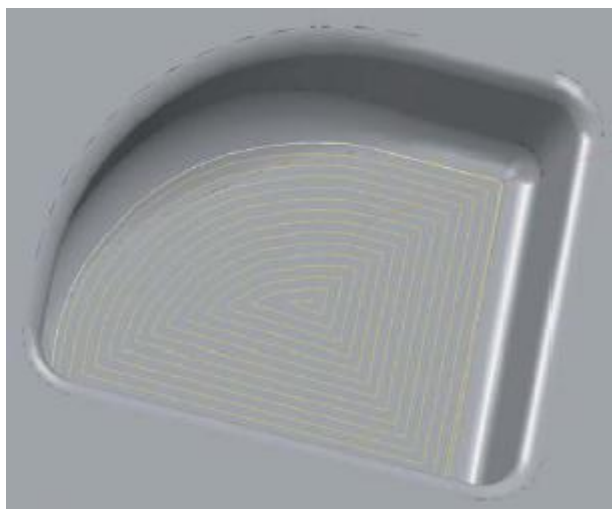


Рис. 21. Спиральная эквидистантная траектория

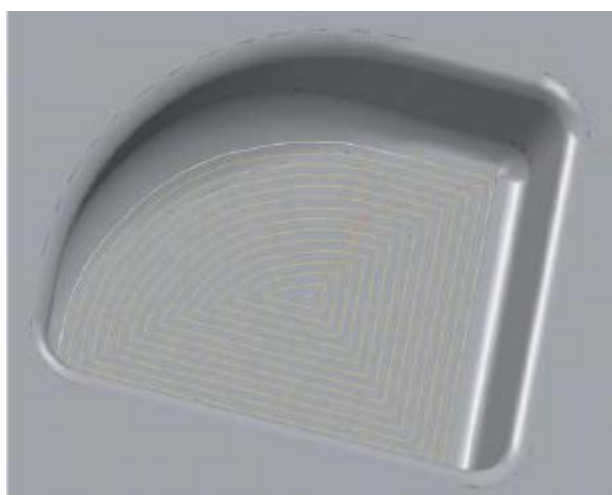


Рис. 22. Оптимизированная траектория: на пологих участках — эквидистантная, на крутых участках — послойная

Это же правило равномерных нагрузок диктует технику обработки внутренних скруглений. При ВСО надо стремиться исключать обработку фрезами с радиусами, равными радиусам скругления на детали. Как видно из рис. 23, в местах скруглений это вызывает резкое увеличение сечения среза и соответственное повышение нагрузки на инструмент, и если он будет ломаться, то это наверняка будет происходить именно в этих местах. Правда, для этого придется перейти к моделированию всех радиусов скругления на компьютерной модели, между тем как раньше, в целях экономии времени, радиусы не моделировались, а формировались геометрией фрезы.

Соответственно одним из требований, предъявляемых к системам моделирования, должна стать возможность легкого и надежного моделирования радиусов скругления. При получистовой обработке, когда снимаются ступени, оставшиеся после черновой обработки, эффективным инструментом сглаживания нагрузки на инструмент являются модули управления подачей. В PowerMILL это модуль PS-Optifeed, который в местах увеличения сечения среза на ступеньке уменьшает, а в местах малых сечений, напротив, — увеличивает подачу инструмента (рис. 24). Таким образом, САМ_система для ВСО должна обеспечить:

- широкий набор вариантов гладкого подвода-отвода и связок между проходами;
- набор стратегий спиральной и эквидистантной обработки зон как на чистовой, так и на черновой обработке и поиск оптимальной стратегии в различных зонах обработки;
- автоматическое сглаживание траекторий в углах;
- исключение проходов полной шириной фрезы и автоматическое применение трохоидального врезания в этих местах;
- оптимизацию подач для сглаживания нагрузки на инструмент.

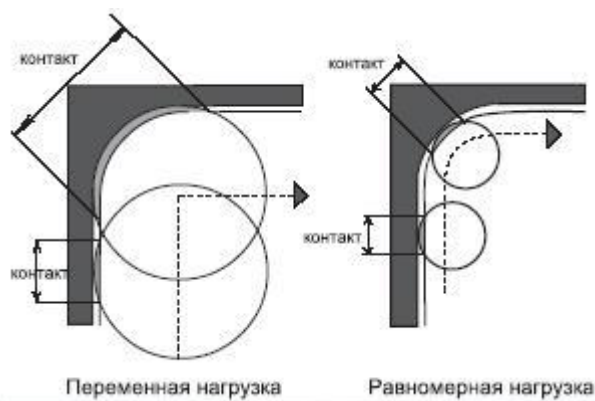


Рис. 23. Обработка скруглений

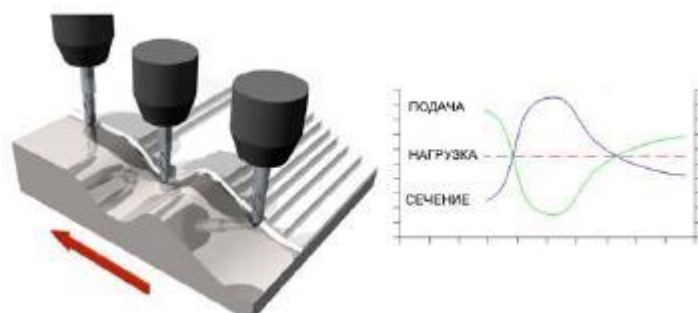


Рис. 24. Оптимизация подачи в зависимости от сечения среза

В заключение можно сказать, что успех внедрения ВСО целиком зависит от технолога-программиста, хорошо владеющего САМ-системой, поскольку сложность программ для ВСО значительно больше, чем при традиционной обработке, хотя бы потому, что инструмент здесь делает большее число ходов и требует специальных технологий подвода-отвода, обхода углов и сглаживания нагрузки на инструмент, а кроме того, повышенная производительность станков требует ускорения подготовки программ. Отметим тот положительный момент, что ВСО заставила обратить внимание на качество траектории инструмента.

Внедрение новых подходов и стратегий, разработанных для ВСО, в обычную обработку благоприятно скажется на качестве обработки и снизит вероятность поломки инструмента. Освоение технологий высокоскоростной обработки обеспечит такое качество обработки, которое позволит исключить финишные операции ручной полировки (рис. 25), а также даст возможность выполнять работы, которые при традиционных методах вызывали определенные проблемы (например, необходимость использовать большие вылеты инструмента для обработки высоких стенок — рис. 26).



Рис. 25. Пример обработки вставки штампа горячей штамповки. Полная обработка за один установ без полировки. Время обработки 95 мин. Размер вставки 300x145 мм, твердость 51 HRC, подача 5 м/мин, обороты шпинделя 35 тыс. об./мин. Самая малая фреза диаметром 2 мм



Рис. 26. Пример обработки графитового электрода. Размер 350x200 мм, 9600 шестигранных отверстий с радиусом скругления 0,2 мм. Наружная поверхность обработана шаровой фрезой диаметром 10 мм, черновая обработка отверстий фрезой диаметром 1,5 мм и чистовая обработка отверстий фрезой диаметром 0,4 мм. Обороты шпинделя 45 тыс. об./ мин, время обработки 34 ч

Источник информации:

"САПР и графика", 11/2002