

# МЕТАЛЛУРГИЯ. МЕТАЛЛООБРАБОТКА. МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9.91 (035)

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ МНОГОКООРДИНАТНОЙ ОБРАБОТКЕ

*Доктора техн. наук, профессора ШЕЛЕГ В. К., ПРИСЕВОК А. Ф., асп. КЛАВСУТЬ П. Н.*

*Белорусский национальный технический университет*

Значение высокоскоростной обработки (ВСО), и особенно высокоскоростного фрезерования, значительно возросло с появлением новой гаммы конструкций станков и инструментов. Применение технологии высокоскоростного фрезерования приводит к повышению производительности при обработке металлов резанием с одновременным повышением точности и качества поверхности деталей, что важно в производстве пресс-форм и другой технологической оснастки [1]. Повышение производительности достигается за счет применения более высоких скоростей резания, которые в два-три раза превышают обычные (рис. 1). При небольших сечениях среза в данном диапазоне скоростей основная масса теплоты концентрируется в стружке, не успевая переходить в заготовку, что позволяет производить обработку закаленных сталей, не опасаясь отпуса поверхностного слоя. Отсюда следует основной принцип ВСО: малое сечение среза, снимаемое с высокой скоростью резания, высокие обороты шпинделя и высокая минутная подача (рис. 2).

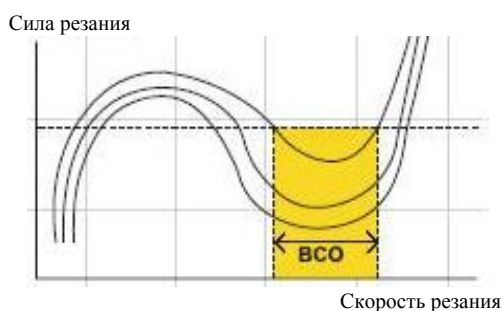


Рис. 1. Зависимость сил резания от скорости резания



Рис. 2. Параметры резания для высокоскоростной обработки

**Постановка задачи.** Метод высокоскоростного фрезерования требует использования САМ-систем (Computer Aided Manufacturing – система автоматизированного управления производственным оборудованием), обеспечивающих следующие основные критерии разработки управляющих программ (УП) [2]:

- 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;
- максимальную скорость отработки УП системой ЧПУ.

САМ-система создает проходы с мелким шагом на больших рабочих подачах, исключая резкие повороты, так как функция предварительного просмотра системы ЧПУ автоматически уменьшает рабочую подачу при приближе-

нии точки смены направления движения. Результатом является геометрически точное фрезерование изделий (например, деталей пресс-форм) с достижением шероховатости поверхности, исключаяющей финишную полировку (рис. 3). Проблему недостаточного быстродействия системы ЧПУ при обработке сигналов САМ-система решает созданием специальных траекторий инструмента, соответствующих возможностям систем управления. Для получения оптимальной траектории инструмента функциональные возможности САМ-системы включают в себя:

- исследование расстояния между слоями по оси Z;
- плавное соединение концов траектории;
- контроль наклона стенок детали и идентификацию специфики геометрии.

САМ-система изменяет расстояние между слоями по оси Z так, чтобы после предварительной обработки достигнуть окончательной формы с заданным значением припуска. Для этого САМ-система воспринимает изменения в рельефе поверхности между слоями и по значению остающегося припуска определяет дополнительные проходы. Такие функциональные возможности помогают исключить полустивую обработку, уменьшить время обработки и износ режущего инструмента. САМ-

система обеспечивает плавное врезание инструмента в материал заготовки (например, по спирали).

**Теоретическая модель траектории движения инструмента.** Существуют четыре принципа генерации траектории движения режущего инструмента, которым подчинены все подходы к созданию УП для высокоскоростной обработки [3]:

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 высокоскоростной обработке существенно уменьшаются в направлении осей X и Y, а в направлении оси Z практически не изменяются. К тому же при торцовом фрезеровании удаление стружки затруднено, что негативно сказывается на процессе резания.

3. Плавное изменение условий резания: условия отвода стружки, усилия резания в осевом и радиальном направлениях и т. д. Для инструмента из твердого сплава более благоприятна постоянная (пусть даже и высокая) температура в зоне резания, чем ее колебания.

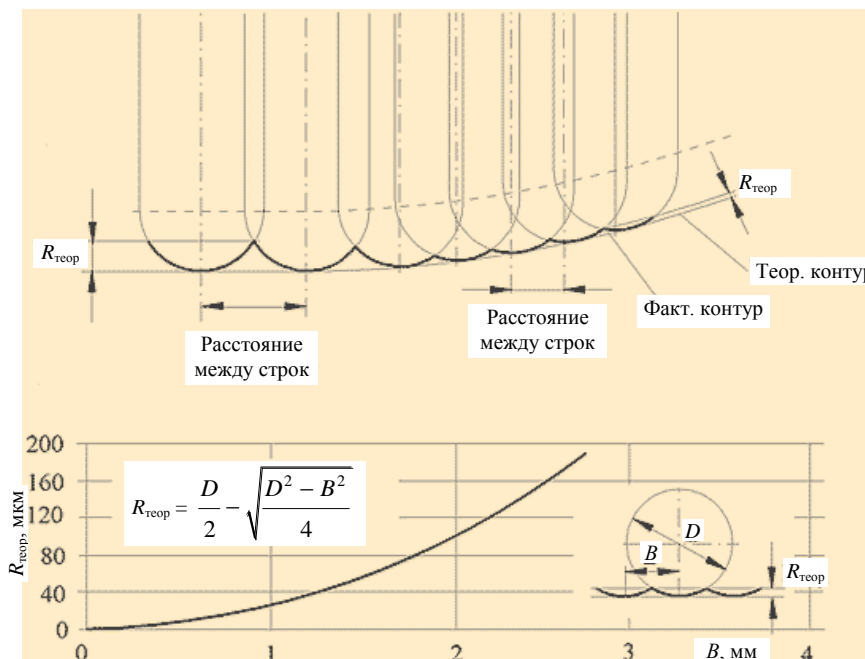


Рис. 3. Влияние расстояния между строками на теоретическую шероховатость

Резкое изменение условий резания при врезании инструмента в материал приводит к увеличению количества выделяемой теплоты 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. Применение функции предварительного анализа траектории с соответствующим регулированием рабочей подачи 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. При плавном изменении нагрузки на инструмент на механические узлы станка будут действовать наименьшие силы. Практика показывает, что деталь невозможно изготовить без использования траектории, предполагающей резкую смену направления движения инструмента (рис. 4а), но такие случаи необходимо минимизировать. Плавная траектория (рис. 4б) более подходит для высокоскоростной обработки. Трохоидальная обработка – фреза движется по окружности (рис. 5).

Сила резания в направлении оси  $Z$  не уменьшается при увеличении скорости вращения шпинделя. Врезание в твердый материал с высокой рабочей подачей создаст напряжение в инструментальном патроне и шпинделе и приведет к повреждению инструмента. Необходимо избегать вертикального врезания инструмента (за исключением графита, алюминия и некоторых других мягких материалов). Перемещение режущего инструмента на величину прохода по оси  $Z$  рекомендуется производить в воздухе, а врезание в горизонтальном направлении – по дугообразной траектории. Желательно и выход инструмента осуществлять по дуге. 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.

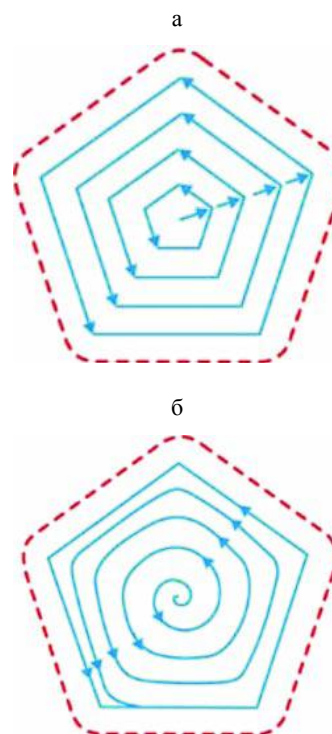


Рис. 4. Схемы траекторий движения инструмента: а – с резким изменением направления; б – плавное движение

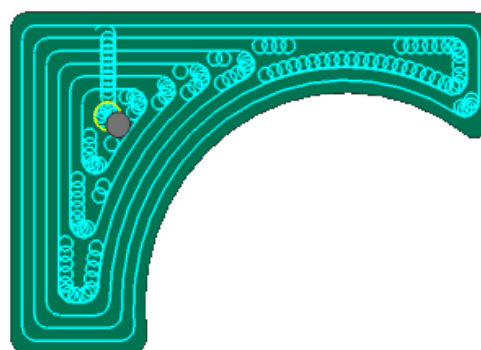


Рис. 5. Схема трохойдальной траектории движения инструмента

Резание параллельными слоями (фреза движется последовательно слоями по горизонтальным плоскостям) – наиболее распространенный метод формирования траектории для предварительной обработки (рис. 6). Преимущество этого подхода заключается в простоте программирования при сохранении глубины фрезерования. При обработке параллельными слоями генерируются проходы для окончательной обработки боковых стенок карманов или островов. Однако для обработки плоских поверхностей (низ кармана или верх острова) такая тех-

ника не совсем подходит, и тут лучше применять другие методы. Некоторые САМ-системы позволяют программировать траектории для обработки комбинированных поверхностей [4]. Одна из проблем обработки параллельными слоями – изменение шага по оси  $Z$ . Только часть САМ-систем автоматически определяют различные значения приращения по оси  $Z$  в зависимости от угла наклона стенок, большинство же – не может. 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.

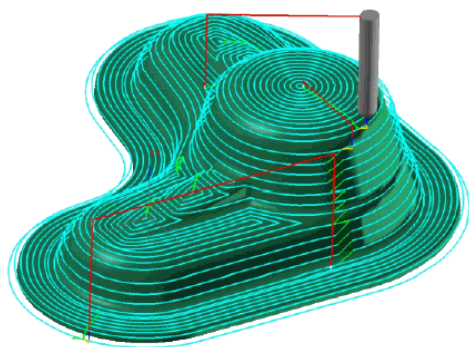


Рис. 6. Модель обработки сложнопрофильной поверхности параллельными слоями

**Практические рекомендации.** На основе практического опыта выработаны следующие рекомендации по программированию траекторий для высокоскоростной обработки (порядок перечисления является произвольным и не зависит от значимости):

1. Обработка с образованием стружки. Теплота из зоны резания в основном отводится вместе со стружкой. При малой рабочей подаче стружка почти не производится. Вырабатываемая в процессе трения теплота 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 (теплоты).

3. Попутное фрезерование для предварительной и окончательной обработки. Поверхность получается с лучшей шероховатостью, и происходит оптимальный отвод стружки; также 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 теплоты, 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.

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. 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. Свои преимущества есть и у обработки «от периферии – к центру», при которой уменьшаются случаи врезания инструмента по оси  $Z$  и в углах. Если в САМ-системе есть функция минимизации врезаний инструмента, то рекомендуется ее использовать.

8. Предварительная обработка фрезами большого диаметра с припуском 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). САМ-системы позволяют удалять припуск, оставленный в углах, с помощью дополнительных фрез меньшего диаметра, если твердость материала высока.

9. Использование функции САМ-системы «аппроксимация дугами» 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 должно быть на порядок выше, чем оставляемый припуск.

10. Предварительная обработка глубокого кармана с наклонными стенками предпочтительна, так как ее 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.

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

12. Предварительную обработку предпочтительно осуществлять концевыми фрезами с небольшим радиусом (до 1 мм) на торце. Они могут сохранять свою целостность дольше фрез без радиуса на торце или сферических фрез.

13. Контроль процесса удаления стружки. Поскольку вместе со стружкой отводится теплота из зоны резания, необходимо контролировать процесс стружкообразования и распределение потока стружки, особенно при обработке глубокого кармана. Важно избегать резания самой стружки при обработке закаленной стали, иначе режущие кромки инструмента будут повреждены.

14. Рекомендуются применять обильное охлаждение или работать вовсе без охлажде-

ния.

Целесообразность использования СОЖ повышается с уменьшением скорости резания. Процесс отвода теплоты в большой степени зависит от своевременного удаления стружки, для чего следует использовать воздушную струю, поданную под большим давлением, вместо охлаждающей эмульсии на водной основе. Поскольку в зоне резания создаются высокая температура и большие центробежные силы, любая жидкость на водной основе вблизи от режущей кромки мгновенно превратится в пар и какой-либо охлаждающий эффект будет отсутствовать. При этом жидкость на мгновение охладит режущую кромку, находящуюся в тот момент вне процесса резания. Эти тепловые удары приводят к преждевременному износу инструмента. Масляно-воздушная охлаждающая эмульсия в виде тумана служит в основном для смазки и уменьшения трения.

**Вибрация и балансировка технологической системы.** При высокой скорости вращения жесткая технологическая система переходит в разряд упругодеформируемой, упругие и диссипативные характеристики которой накладывают существенные ограничения на ее режимы работы. Поэтому для реализации заданных режимов высокоскоростного резания необходимо установить допустимые характеристики технологической системы либо при ее известных характеристиках назначить разрешенные режимы резания. В первом случае решается задача синтеза, а во втором – анализа динамики технологической системы. Вопросы анализа и синтеза машин и механизмов различного назначения, в том числе технологических машин, широко освещены в научно-технической литературе. Однако в большинстве исследований авторы рассматривают отдельно механическую систему или только кинематику и динамику процесса резания.

Отличительной особенностью технологической системы при ВСО является тесная взаимосвязь процесса резания с динамикой системы, качеством и производительностью обработки. Для практической реализации ВСО необходимо выбрать допустимые режимы резания, установить значения вибродиагностических параметров технологической системы для управления



качеством обрабатываемой детали и техническим состоянием самой системы. Установлено, что высокоскоростная обработка для конкретной технологической системы осуществима в очень узком диапазоне скоростей, подач и глубин резания, который характеризуется низкими уровнями ее вибраций.

Обычно технологическую систему подразделяют на четыре подсистемы (рис. 7), каждая из которых включает в себя ряд структурных единиц (СЕ). На основании расчетных и экспериментальных данных определены основные требования для подсистем и их структурных единиц, предназначенных для высокоскоростного фрезерования [5].



Рис. 7. Технологическая система

Заготовки для высокоскоростного фрезерования должны соответствовать повышенному классу точности, так как в противном случае дефекты ее поверхности могут привести к высоким и неравномерным нагрузкам на подсистему шпинделя, что вызовет повышенные вибрации всей системы. У заготовок, не отвечающих этим требованиям, необходимо снять поверхностный слой – обработать ее предварительно. Предельные отклонения от плоскостности и прямолинейности заготовки не должны превышать 12-го класса точности.

В технических характеристиках инструментов, предлагаемых для высокоскоростного фрезерования, указываются рекомендуемые параметры резания типовых материалов и точность их изготовления. Эти параметры обеспечивают только необходимые, но не достаточные условия применения данного инструмента в конкретной технологической системе. Такой инструмент должен иметь: допуск на диаметр – 7-й квалитет по ИСО, радиальное биение зубьев – не более 4-й степени точности, дисбаланс – 4-й или 5-й класс точности по ГОСТ 22061 (зависит от соотношения масс инструмента и ротора шпинделя), максимальное число оборотов, соответствующее частоте вращения

шпинделя.

Основные требования, предъявляемые к вспомогательному инструменту для закрепления фрез (оправки, патроны), это – 3-й класс точности балансировки в сборе, точность соединения шпиндель–оправка АТЗ, а отклонения формы и расположения посадочной поверхности

по 2-й и 3-й степеням точности. Погрешность базирования оправки в шпинделе необходимо оценивать с помощью контрольной оправки (эталоны инструмента), радиальное биение которой не должно превышать 3 мкм на длине, равной четырем диаметрам, при нескольких установках ее в шпинделе. От данного требования зависит стойкость инструмента, которая убывает по гиперболе с ростом биения инструмента. Так, стойкость инструмента при биении 12 мкм составляет 30 % от его стойкости при биении 3 мкм.

Высокоскоростные фрезерные центры оснащены электрошпинделями с частотами вращения 8000–24000 мин<sup>-1</sup> с тенденцией роста до 40000 мин<sup>-1</sup> и более. На этих оборотах роторная система «якорь – оправка – инструмент» (рис. 8) становится упругодеформируемой, а уровень вибраций зависит от динамической жесткости роторного узла и дисбалансов структурных единиц. Сама жесткость зависит как от конструкторско-технологических параметров шпинделя, так и от условий закрепления в нем оправки с инструментом, существенно влияющих на значения резонансных частот, при которых не допустима эксплуатация станка, что ограничивает разрешенный диапазон частот вращения шпинделя. Например, для электрошпинделя с рабочим диапазоном частот вращения от 12000 до 24000 мин<sup>-1</sup>, схема которого представлена на рис. 8, были вычислены возможные собственные частоты колебаний:

- вала (СЕ1) – 44000 мин<sup>-1</sup>;
- механизма натяжения (СЕ4) – 24000 или 16000 или 10000 мин<sup>-1</sup> в зависимости от усилия зажима штрелева оправки в соединениях М2 и М3 (жесткое, шарнирное или свободное закрепление);
- опор (СЕ2, СЕ3) – 15100 и 23700 мин<sup>-1</sup>.

Из этих расчетов следует, что с 10%-м запасом устойчивости эксплуатация шпинделя возможна в двух диапазонах оборотов:

- от 12000 до 13200 мин<sup>-1</sup>;
- от 18000 до 21300 мин<sup>-1</sup>.

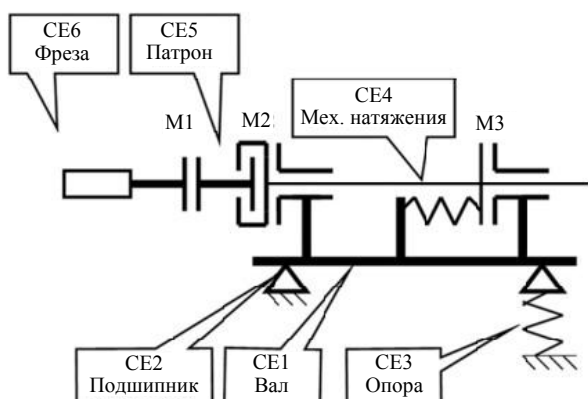


Рис. 8. Схема роторной системы высокоскоростного электрошпинделя

Экспериментальные исследования этого шпинделя на холостом ходу с контрольной оправкой и рабочей фрезой подтвердили наличие резонанса в рабочем диапазоне оборотов шпинделя. Для выбора режимов высокоскоростной обработки непременным условием является установление всех динамических характеристик шпинделя и станка, которые должен представить изготовитель, или их следует определить на месте установки станка.

Вибрации высокооборотных шпинделей при холостом ходе определяются остаточными дисбалансами их роторов, а при эксплуатации – технологическими дисбалансами оправки с инструментом и переменными нагрузками от реакций сил резания. Роторы шпинделей станков балансируют как отдельные детали в собственных подшипниках, что может соответствовать 2-му классу точности по ГОСТ 22061 (ИСО 1940). Допустимость такой балансировки оценивается уровнем вибраций корпуса шпинделя в рабочем диапазоне оборотов. Согласно пределам оценки колебательных свойств амплитуда виброскорости электрошпинделя должна лежать в пределах 0,7–1,1 мм/с. В противном случае шпиндель следует балансировать в собственном корпусе с соблюдением условий эксплуатации, т. е. по 1-му классу. Также не допускается эксплуатация шпинделя при вибрациях выше 4,5–7,0 мм/с.

В процессе резания к ротору приложены неуравновешенные силы от дисбалансов, реакция силы резания и сила натяжения. Неуравновешенная сила от дисбалансов пропорциональна

квадрату угловой скорости вращения шпинделя и коэффициенту динамичности вала, причем она меняется при каждой смене инструмента из-за погрешностей базирования фрезы, оправки и штока [6]. Сила натяжения из-за зазора в направляющих штока (тяги) приложена эксцентрично. Возникает ее радиальная составляющая, и она действует как неуравновешенная сила. Значение этой силы не зависит от оборотов шпинделя, а зависит от точности штревели и величины зазора в направляющих тяги. Радиальная составляющая реакции сил резания приложена к режущей кромке фрезы, находящейся в контакте с заготовкой в течение части периода вращения ротора шпинделя и действует на ротор как неуравновешенная сила. При входе в контакт с заготовкой следующей режущей кромки меняется направление действия неуравновешенной силы и т. д. Следовательно, сила резания выступает как периодическая сила и создает полигармонические вибрации. Зависимость значения радиальной составляющей силы резания, оцениваемая по вибрациям шпинделя, от параметров резания имеет различный характер.

Экспериментальные данные, полученные при высокоскоростной обработке алюминиевого сплава двух-, трех- и четырехзубыми фрезами из инструментальной быстрорежущей стали, показывают характер зависимостей вибраций шпинделя от параметров резания (табл. 1):

- 1) резонансный – от скорости резания (режим № 1);
- 2) экспоненциальный – от минутной подачи (режим № 2);
- 3) монотонно возрастающий – от производительности (режим № 3).

Таблица 1  
Испытываемые режимы высокоскоростного фрезерования

№ режима	№ опыта	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Скорость резания, м/мин	Минутная подача, м/мин	Производительность, см <sup>3</sup> /мин
1	1	12000	720	6	245
	2	15000	900	6	245
	3	17400	1040	5,9	240
2	1	15000	850	5	110
	2	15000	850	6	115
	3	15000	850	7,5	140

3	1	12000	740	4,8	310
	2	12000	740	4,8	430
	3	12000	740	4,8	550

С ростом вибраций шпинделя качество обработки снижается – увеличивается протяженность следов обработки. Из результатов испытаний найдены оптимальные режимы высокоскоростного фрезерования для данной технологической системы:

- черновая обработка с шероховатостью поверхности по 4-му классу должна выполняться при скорости резания 750 м/мин (12000 мин<sup>-1</sup>), минутной подаче – 4800 мм/мин, производительности – 430 см<sup>3</sup>/мин;

- получистовая обработка с шероховатостью поверхности по 6-му классу должна выполняться при скорости резания 850 м/мин (15000 мин<sup>-1</sup>), минутной подаче – 6000 мм/мин, производительности – 110 см<sup>3</sup>/мин.

Каждая технологическая система будет иметь свои оптимальные режимы резания. При их выборе необходимо соблюдать следующие правила:

1) балансировать все элементы роторной подсистемы не хуже, чем по 3-му классу;

2) измерять виброскорость шпинделя перед и в процессе резания;

3) не допускать к эксплуатации шпиндель с вибрациями более 1,1 мм/с и биением оправки более 5 мкм;

4) прекращать обработку при росте вибраций шпинделя более 4,5 мм/с.

**Материалы и характеристики режущих инструментов для высокоскоростной обработки.** Процесс предварительного фрезерования осуществляется фрезами из быстрорежущей стали и твердого сплава [7]. Преимущество фрез из быстрорежущей стали, заключается в том, что они могут применяться, если жесткость станка невысока. Однако из-за низкой скорости резания значение рабочей подачи ограничено. Стойкость такого инструмента существенно ниже по сравнению с твердосплавными фрезами, и обработка ими закаленных сталей практически невозможна.

Наиболее эффективен процесс предварительного фрезерования монолитными фрезами из твердого сплава. Геометрия режущих кромок способствует снижению сил резания. Жесткость и стойкость такого инструмента

позволяют обрабатывать закаленную сталь. Высокая скорость и температура в зоне обработки способствуют снижению сил резания, а большая рабочая подача обуславливает увеличение производительности (даже при фрезеровании закаленной стали). Фактор, ограничивающий эффективность данного процесса, – малое сечение стружки. Из-за возможности повторного резания инструментом стружки ее своевременное удаление из зоны резания имеет важнейшее значение. Геометрия режущего инструмента, предназначенного для предварительной обработки, рассчитана при условии достижения эффективного удаления стружки из зоны резания.

В процессе высокоскоростной обработки режущий инструмент наиболее часто служит причиной ограничения скорости резания и производительности. В зависимости от обрабатываемого материала параметры резания изменяются в широком диапазоне (табл. 2).

Таблица 2

Скорость резания и вид охлаждения при ВСО разных типов 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	100–200	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	75–100	СОЖ или масляный туман

Стойкость инструмента при фрезеровании обусловлена материалом режущего инструмента, качеством поверхностного покрытия, точностью и особенностями геометрии. Характеристики режущего инструмента для высокоскоростной обработки могут быть классифицированы следующим образом:

- способность сопротивляться высоким ме-



ханическим и тепловым воздействиям. Мелкозернистый карбид (размер частиц карбида – от 1 до 0,4 микрона) с покрытием на основе карбида титана – это комбинация, обеспечивающая износостойкость, сопротивление высокой температуре, низкий коэффициент трения и защиту от трения стружкой;

- более точная геометрия, чем у обычного режущего инструмента. Значения предела точности (допуск) на диаметр 0,02 мм и предела точности радиуса режущей кромки 0,01 мм вдвое меньше, чем значения предела точности обычного инструмента;

- фрезы, предназначенные для высокоскоростной обработки закаленных сталей, имеют центральные стержни большего диаметра и более мелкие зубья, чем обычные фрезы. За счет этого инструмент обладает большей жесткостью и имеет лучшие характеристики сопротивляемости деформации и вибрации. Угол наклона спирали (длина режущей кромки) зуба наибольший из возможных.

Высокая скорость вращения шпинделя увеличивает влияние вибрации инструмента на процесс резания. Чтобы стойкость инструмента и качество поверхности были удовлетворительными, необходимо использовать жесткий инструмент, причем каждый миллиметр вылета имеет большое значение. Инструмент с малым вылетом имеет наименьшую деформацию и менее подвержен вибрации.

При высокоскоростной обработке инструментом из твердого сплава учитывается не только его твердость, но и значение сопротивления изгибу, так как обработка производится с высокой частотой ударов режущей кромки о металл. Инструмент с более высоким значением сопротивления изгибу менее подвержен повреждениям или трещинам в результате ударов о металл или стружку.

Оптимальным сочетанием значения твердости и сопротивления изгибу обладают сплавы с измельченным зерном (менее 0,5 микрона). Существуют технологии получения твердых сплавов с абсолютно малым размером зерна, обладающих высоким сопротивлением изгибу при незначительном уменьшении твердости.

Нанесение покрытия значительно увеличивает стойкость инструмента, обеспечивая дополнительную защиту твердого сплава от тре-

ния и высокой температуры. Обычно используются три типа покрытия:

1) алумонитрид титана (TiAlN). Служит теплоизолятором в операциях обработки, характеризующихся высокими температурами, в том числе без применения СОЖ. Это покрытие характеризуется сопротивлением высокотемпературному износу и скользящим эффектом. Покрытие TiAlN позволяет инструменту сохранять сопротивление износу при высокой температуре, так как имеет температуру плавления приблизительно на 35 % больше, чем нитрид титана (TiN). Наружный слой покрытия TiAlN представляет собой оксид алюминия, который является одновременно твердым и скользящим. Хорошо защищая инструмент от износа, оксид алюминия как бы смазывает горячую стружку, чтобы она скользила по поверхности фрезы без теплопередачи и прилипания. Низкий коэффициент трения делает это покрытие эффективным для обработки графита, чугуна и других абразивных материалов;

2) нитрид карбида титана (TiCN). Толстое, многослойное покрытие, которое преимущественно применяется для обработки стали. Недостаток этого покрытия состоит в том, что его нельзя наносить повторно. Инструменты, покрытые однажды TiCN, обычно повторно покрываются TiN. Покрытие TiCN применяется там, где твердость заготовки меньше 42 HRC и скорость резания не больше 240 м/мин. При этих условиях резания рекомендуется использовать охлаждающую эмульсию;

3) нитрид титана (TiN). Это дешевое покрытие, и хотя не может работать в условиях, в которых работают предыдущие два покрытия, оно является универсальным и рентабельным.

## **ВЫВОДЫ**

1. При создании управляющих программ для высокоскоростной обработки предпочтительно использовать длинные и плавные траектории движения инструмента, резание осуществлять образующей инструмента с небольшой глубиной в осевом и радиальном направлениях.

2. Для реализации заданных режимов высокоскоростного фрезерования необходимо установить допустимые характеристики технологи-

ческой системы либо при ее известных характеристиках назначить разрешенные режимы резания.

3. При высокоскоростном фрезеровании наиболее эффективно использовать монокристаллические фрезы из твердого сплава с покрытием из алюминитрида титана, нитрида карбида титана или нитрида титана.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев, А. SURFCAM 2002 plus. / А. Николаев // Что нового? САПР и графика. – 2003. – № 6. – С. 43–47.
2. Степанов, А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве / А. Степанов // САМ/САЕ Observer. – 2003. – № 4. – С. 2–8.
3. Zelinski, P. Five sides and one zero: Shopfloor

programming for five-side parts. Mod. Mach. / P. Zelinski // Shop. – 2003. – 76. – № 7. – С. 54–55.

4. Hans, B. Kief. CNC for Industry / Hans B. Kief. – 2000. – P. 198.

5. Smith S. Тенденции развития высокоскоростной обработки / S. Smith // ASME: Journal of Manuf. Science, 2002. – №. 4, V. 119. – С. 664–666.

6. Popoli, B. Шпиндели для высокоскоростной обработки / B. Popoli // Tooling & Production. – 2002. – №. 5, V. 68. – С. 60–62.

7. Pontius, K. Высокоскоростное фрезерование заготовок из разнородных деталей / K. Pontius // Cutting Tool Engineering. – 2002. – №. 2, V. 54. – С. 41–43.

Поступила 01.04.2009

УДК 621.762

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВОК ИЗ ЧУГУНОВ ПРИ ИГЛОФРЕЗЕРОВАНИИ

*Доктора техн. наук, профессора БАРШАЙ И. Л., ФЕЛЬДШТЕЙН Е. Э., инженеры БИРИЧ А. В., ГОНЧАРОВ С. П.*

*Белорусский национальный технический университет,  
Зеленогурский университет (Польша),  
ИОО «Ист Юропан Партс», РУП «МТЗ»*

Повышение конкурентоспособности промышленной продукции, выпускаемой в Республике Беларусь, предопределяет необходимость интенсивного поиска эффективных научно-технических решений по увеличению срока службы машин, механизмов и оборудования за счет разработки и применения высокопроизводительных мало- и безотходных, ресурсосберегающих и экологически чистых технологий.

Качество поверхности в значительной степени определяет эксплуатационные характеристики деталей машин. По данным [1], методы формирования качества поверхности деталей машин составляют 10–20 % общей трудоемкости их изготовления. Приведенные в этой работе результаты анализа технологических процессов изготовления деталей машин в различных отраслях машиностроения показали, что такой обработке подвергаются 85–95 % выпуска-

емых деталей. Обработка проволочным инструментом, в частности иглофрезой, является перспективным методом для формирования качества поверхности деталей.

Формирование топографии и геометрической структуры поверхности при иглофрезеровании осуществляется в режиме микрорезания в зоне взаимодействия режущих элементов с поверхностью заготовки. При иглофрезеровании, кроме уменьшения высоты микронеровностей до  $Ra = 40$  мкм, в поверхностном слое формируется наклеп. Степень наклепа иглофрезерованной поверхности достигает 40 % [2]. Варьирование параметров режима иглофрезерования позволяет управлять формированием качества обработанной поверхности детали, а следовательно, ее эксплуатационными показателями.

Исследовали влияние параметров режима