

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Значение высокоскоростной обработки (ВСО), и в особенности 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. При небольших сечениях среза в данном диапазоне скоростей основная масса тепла концентрируется в стружке, не успевая переходить в заготовку, что позволяет производить обработку закаленных сталей, не опасаясь отпуска поверхностного слоя. Отсюда следует основной принцип ВСО: малое сечение среза, снимаемое с высокой скоростью резания, высокие обороты шпинделя и высокая минутная подача.

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;
- максимальная 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 приближении точки смены направления движения. Результатом является геометрически точное фрезерование изделий (например, деталей пресс-форм) с достижением шероховатости поверхности, исключаяющей финишную полировку (рис.1).

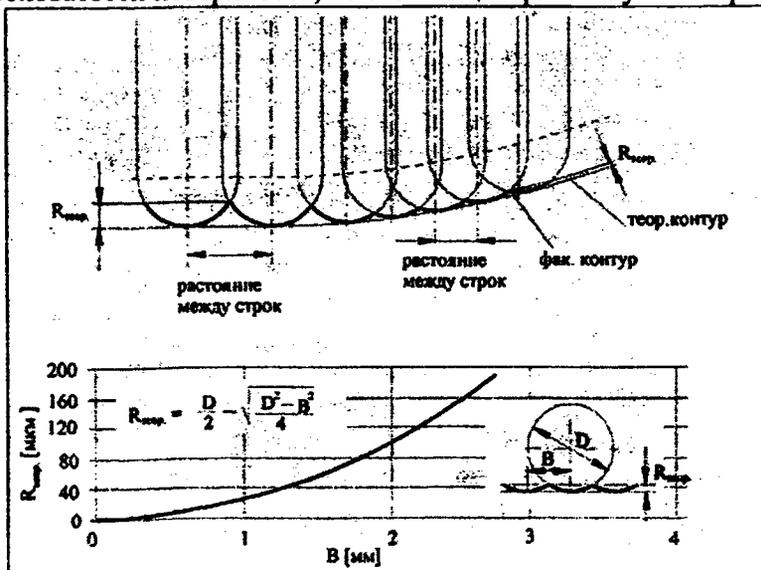


Рис. 1. Влияние расстояния между строками на теоретическую шероховатость

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:

- 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).

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 её колебания. Резкое изменение условий резания при врезании инструмента в материал приводит к увеличению количества выделяемого тепла и механических напряжений, что отрицательно сказывается на стойкости инструмента. Если траектория инструмента рассчитана при условии плавного изменения условий резания, то это позволит значительно увеличить стойкость инструмента, получить лучшую точность и шероховатость обработанной поверхности.

4. Плавные траектории инструмента. 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.2, а), но такие случаи необходимо минимизировать. Плавная траектория (рис.2, б) более подходит для высокоскоростной обработки.

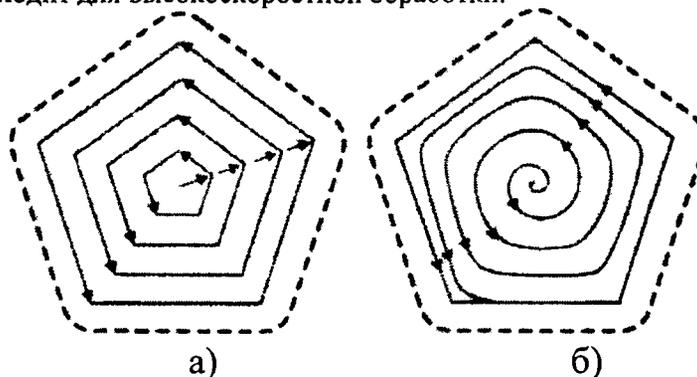


Рис.2. Схемы траекторий движения инструмента: траектория с резким изменением направления (а), плавная траектория движения (б)

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.

Резание параллельными слоями (фреза движется последовательно слоями по горизонтальным плоскостям) - наиболее распространенный метод формирования траектории для предварительной обработки. Преимущество этого подхода 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 техника не совсем подходит, и тут лучше применять другие методы. Некоторые САМ-системы позволяют запрограммировать 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.

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. Тепло из зоны резания в основном отводится вместе со стружкой. При малой рабочей подаче стружка почти не производится. Вырабатываемое в процессе трения тепло будет отводиться только через инструмент и обрабатываемую деталь, что приведет к перегреву и преждевременному износу инструмента.

2. Если условия резания не могут быть постоянными в силу специфичной геометрии детали, то уменьшение значения шага по оси Z является наиболее эффективным способом улучшить резание. При уменьшении шага минимизируются случаи внезапного увеличения объема удаляемого материала при врезании фрезы в угол, которые приводят к повышению вибрации и ухудшению условий отвода стружки (тепла).

3. Попутное фрезерование для предварительной и окончательной обработки. Поверхность получается с лучшей шероховатостью и происходит оптимальный отвод стружки; так же существенно возрастает стойкость фрезы. Современные инструменты из твердого сплава лучше сопротивляются усилиям сжатия (что характерно для попутного фрезерования), нежели растяжения. При встречном фрезеровании толщина стружки увеличивается от нуля до максимума, что способствует выделению большого количества тепла, поскольку режущая кромка движется с большим трением.

4. Резание в одном направлении. При таком резании инструмент всегда будет находиться с одной стороны от материала, поэтому условия резания будут более однородными. Недостаток - большое время, затрачиваемое на холостые перебеги.

5. Минимум врезаний инструмента. При врезании количество стружки резко увеличивается, и в режущем инструменте возникает большое напряжение.

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 её 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. Это особенно полезно, когда твердость материала высока.

9. Использование функции САМ-системы «аппроксимация дугами». Она служит для преобразования нескольких линейных сегментов траектории в одну дугу, что позволяет уменьшить размер УП и обеспечить постоянство рабочей подачи. Эта функция особенно полезна при интерполяции одновременно по трем осям. При этом значение точности интерполяции должно быть на порядок выше, чем оставляемый припуск.

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

11. 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.

12. Рекомендуется применять обильное охлаждение или работать вовсе без охлаждения. Целесообразность использования СОЖ повышается с уменьшением скорости резания. Процесс отвода тепла в большой степени зависит от своевременного удаления стружки, и для этого правильной будет использовать воздушную струю, поданную под большим давлением вместо охлаждающей эмульсии на водной основе. Поскольку в зоне резания создается высокая температура и большие центробежные силы, любая жидкость на водной основе вблизи от режущей кромки будет мгновенно превращена в пар, и какой-либо охлаждающий эффект будет отсутствовать. При этом жидкость будет на мгновение охлаждать режущую кромку, находящуюся в тот момент вне процесса резания. Эти тепловые удары приведут к преждевременному износу инструмента. Масляно-воздушная охлаждающая эмульсия в виде тумана служит в основном для смазки и уменьшения трения.

При высокой скорости вращения жесткая технологическая система переходит в разряд упругодеформируемой, упругие и диссипативные характеристики которой накладывают существенные ограничения на её режимы работы. Поэтому, для реализации заданных режимов высокоскоростного резания необходимо установить допустимые характеристики технологической системы, либо при её 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 её вибраций.

Обычно технологическую систему подразделяют на четыре подсистемы (рис. 3), каждая из которых включает ряд структурных единиц (СЕ). На основании расчётных и экспериментальных данных определены основные требования для подсистем и их структурных единиц, предназначенных для высокоскоростного фрезерования [5].

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

ЗАГОТОВКА

ИНСТРУМЕНТ

ПРИСПОСОБЛЕНИЕ

СТАНОК

Рис. 3. Технологическая система

Заготовки для высокоскоростного фрезерования должны соответствовать повышенному классу точности, так как в противном случае дефекты её 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 её предварительно. Предельные отклонения от плоскостности и прямолинейности заготовки не должны превышать 12 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 квалитет по ИСО, радиальное биение зубьев – не более 4 степени точности, дисбаланс – 4 или 5-й класс точности по ГОСТ 22061 (зависит от отношения 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-ей 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 четырём диаметрам при нескольких установках её в шпинделе. От данного требования зависит стойкость инструмента, которая убывает по гиперболе с ростом биения инструмента. Так, например, 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⁻¹ с тенденцией роста до 40000 мин⁻¹ и более. На этих оборотах роторная система «якорь-оправка-инструмент» (рис. 4) становится упругодеформируемой, а уровень вибраций зависит от динамической жёсткости роторного узла и дисбалансов структурных единиц. Сама жёсткость зависит как от конструкторско-технологических параметров шпинделя, так и от условий закрепления в нём оправки с инструментом, существенно влияющих на значения резонансных частот при которых не допустима эксплуатация станка, что ограничивает разрешённый диапазон частот вращения шпинделя. Так, например, для электрошпинделя с рабочим диапазоном частот вращения от 12000 до 24000 мин⁻¹, схема которого подобна представленной на рис. 8, были вычислены возможные собственные частоты колебаний: вала (СЕ1) ... 44000 мин⁻¹; механизма натяжения (СЕ4) ... 24000 или 16000 или 10000 мин⁻¹ в зависимости от усилия зажима штрелева оправки в соединениях М2 и М3 (жёсткое, шарнирное или свободное закрепление); опор (СЕ2, СЕ3) ... 15100 и 23700 мин⁻¹.

Из этих расчётов следует, что с 10% запасом устойчивости, эксплуатация шпинделя возможна в двух диапазонах оборотов: от 12000 до 13200 мин⁻¹ и от 18000 до 21300 мин⁻¹.

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 не переменным условием является установление всех динамических характеристик шпинделя и станка, которые должен представить изготовитель или их следует определить на месте установки станка.

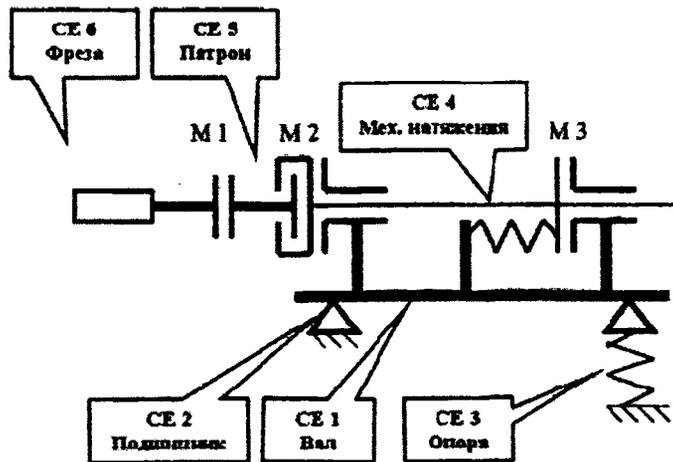


Рис. 4. Схема роторной системы высокоскоростного электршпинделя

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 электршпинделя 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. Так же 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, причём 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 её радиальная составляющая и она действует как неуравновешенная сила. Значение этой силы не зависит от оборотов шпинделя, а зависит от точности штрелева и величины зазора в направляющих тяги. Радиальная составляющая реакции сил резания приложена к режущей кромке фрезы, находящейся в контакте с заготовкой в течении 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 создаёт полигармонические вибрации. Зависимость значения радиальной составляющей силы резания, оцениваемое по вибрациям шпинделя, от параметров резания имеет различный характер.

Экспериментальные данные, полученные при высокоскоростной обработке алюминиевого сплава двух, трёх и четырёхзубыми фрезами из инструментальной быстрорежущей стали, показывают характер зависимостей вибраций шпинделя от параметров резания:

1. Резонансный – от скорости резания.
2. Экспоненциальный – от минутной подачи.
3. Монотонно возрастающий – от производительности.

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

- черновая обработка с шероховатостью поверхности по 4 классу должна выполняться при скорости резания – 750 м/мин (12000 мин⁻¹), минутной подаче – 4800 мм/мин, производительности – 430 см. куб. /мин;
- получистовая обработка с шероховатостью поверхности по 6 классу должна выпол-

няться при скорости резания – 850 м/мин (15000 мин-1), минутной подаче – 6000 мм/мин, производительности – 110 см. куб. /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-ему 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Николаев А. SURFCAM 2002 plus. Что нового? САПР и графика. Июнь 2003. №6, с. 43-47. 2. Степанов А. Высокоскоростное фрезерование в современном производстве. CAM/CAE Observer. 2003. №4, с. 2-8. 3. Zelinski P. Five sides and one zero: Shopfloor programming for five-side parts. Mod. Mach. Shop. 2003. 76, № 7, с. 54-55. 4. Hans B. Kief. CNC for Industry. 2000. - p. 198. 5. Smith S. Тенденции развития высокоскоростной обработки. ASME, Journal of Manuf. Science, 2002, V. 119, Nr. 4, с. 664 - 666, ил. 3. 6. Popoli B. Шпиндели для высокоскоростной обработки. Tooling & Production. 2002. V. 68. Nr. 5, с. 60 - 62, ил. 3.

УДК 621.7.02

Цыганков Л.Е., Туромша В.И.

ПРОГРЕССИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРАВКИ КРУГА ПРИ ПРОФИЛЬНОМ ШЛИФОВАНИИ

*РУПП «Станкозавод «Красный борец», Орша, Беларусь
Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

Введение

При профильном шлифовании правка является одним из основных факторов, обеспечивающих производительность и точность обработки деталей, а также качество поверхностного слоя. В настоящее время правка развивается в следующих направлениях:

- обеспечение возможности правки шлифовального круга со сложной рабочей поверхностью;
- автоматизация правки;
- повышение производительности и точности правки;
- упрощение наладки и сокращение простоев станка на правку;
- универсальность (отказ от применения трудоемких в изготовлении переналадке копиров, управление перемещениями правящего инструмента с помощью системы ЧПУ);
- стабилизация качества обработки деталей при профильном шлифовании и обеспечение одновременной обработки нескольких поверхностей.

В современной технологии машиностроения роль правки шлифовального круга постоянно возрастает. Традиционно правку шлифовального круга производили при помощи алмазного карандаша, устанавливаемого в универсальном поворотном приспособлении. Данный метод не отвечает современным требованиям по производительности и точности. Поэтому в последнее время, в связи с широким применением профилированных станков с ЧПУ, для правки шлифовальных кругов стали использоваться алмазные ролики.

Методы правки при помощи алмазных роликов

Эффективность применения правящих алмазных роликов особенно велика в массовом производстве, когда необходимо производить обработку больших партий деталей с одинаковым профилем (например, шлифование зубьев рулевой рейки гидроусилителя руля автомоби-