К.Б.УСМАНОВ

ОСНОВЫ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

621.7/9
У-74

Министерство Высшего и среднего
специального образования Республики Узбекистан

К.Б.Усманов

ОСНОВЫ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Рекомендован министерством Высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан в качестве учебного пособия по направлениям образования **«Авиастроение и ракетно-космическая техника» шифр 5520800, «Технология машиностроения, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» шифр 5520600** для студентов высших технических учебных заведений.

AKADEMIYA
Ташкент 2005

67 ТА
БИБЛИОТЕКА
ТИП и ЛП
№ 7 128

Рецензент: Аликулов Д.Е.,
зав.кафедрой «Технология машиностроения»
Ташкентского государственного технического
университета им. Беруни.

К.Б.Усманов. Основы резания металлов.
Ташкент, Akademiya, 2005 г.

В учебном пособии представлены основные сведения о свойствах инструментальных материалов. Изложены геометрические параметры режущих инструментов, форма и размеры срезаемого слоя и освещены основные закономерности взаимосвязанных явлений и процессов в зоне резания, рассмотрены основные физические вопросы процесса резания металлов.

Книга предназначена для студентов, обучающихся в бакалавриате и магистратуре в высших технических учебных заведениях.

© «Akademiya», Ташкент 2005г.

Введение

Обработка металлов резанием является одним из самых распространенных способов формообразования деталей. Несмотря на значительное развитие способов формообразования без снятия стружки, обработка металлов резанием остается ведущим процессом производства машин и механизмов.

Появление новых конструкционных материалов, таких как жаропрочные, высокопрочные, тугоплавкие стали и сплавы, непрерывное возрастание требований к точности и качеству обработки выдвигает перед специалистами все новые и более сложные задачи.

Успешное решение практических задач механической обработки материалов во многом зависит от понимания физической сущности явлений, сопровождающих процесс резания.

Первые серьезные научные исследования процессов резания металлов были выполнены в XIX веке. Научное исследование и обоснование явлений, происходящих при резании металлов впервые было осуществлено в 1870 году профессором Петербургского горного института И.А.Тиме. В 1893 г. проф. К.А. Зворыкин опубликовал научные исследования, в которых теоретически определил плоскость скалывания и показал зависимость силы резания от толщины и ширины срезаемого слоя металла. В 1915 г. наука о резании металлов пополнилась крупными исследованиями тепловых явлений и образования стружки в процессе резания, в которых Я.Г.Усачев впервые использовал металлографический метод, применил термопары и разработал теорию нароста на резце.

В конце XIX и начале XX вв. наука о резании металлов обогатилась работами ряда русских и иностранных ученых, которые дополнили указанные фундаментальные исследования и способствовали развитию теоретических основ процесса резания.

В 1936г. была создана комиссия по резанию металлов под председательством Е.П.Надеинской в составе В.А.Кривоухова, А.И.Каширина, И.М.Беспрозванного, С.Д.Тишина. В качестве руководителей отдельных разработок участвовали ведущие специалисты в области обработки металлов резанием, такие как Г.И.Грановский, П.П.Грудов, М.Н.Ларин, А.М.Розенберг, Е.К.Зверев, С.С.Рудник, А.М.Даниелян, Н.И.Резников и др. В результате исследовательских работ были разработаны совершенные нормативы и руководящие материалы по расчету режимов резания для всех основных видов металлообработки.

Таким образом, накопленный с годами большой экспериментальный материал позволил приступить к разработке общей теории процесса резания. В частности, Г.И.Грановский, В.А.Шишков, С.С.Петрухин и др. разработали кинематику резания.

В.А.Кривоухов, А.Ш.Розенберг, Н.Н.Зорев, А.И.Исаев, М.И.Клушин, М.Ф Полетика и др. развили механику процесса резания

В научных трудах А.Н.Резникова, А.М.Даниеляна, А.Я.Малкина, Д.Т.Васильева, П.И.Бобрика и др. изучена и развита теплофизика процесса резания.

Труднейшим задачам изнашивания и стойкости режущего инструмента посвящены работы Г.И.Грановского, Т.Н.Лоладзе, А.Д.Макарова и др.

Работами А.И.Каширина, Н.А.Дроздова, А.П.Сокольского, Л.К.Кучмы, В.А.Кудинова, В.Н.Подураева была создана теория колебаний при резании.

Благодаря трудам В.А.Кривоухова, Г.И.Грановского, Н.Н.Зорева, А.И.Исаева, Т.Н.Лоладзе, А.М.Розенберга, М.И.Клушина, А.Н.Резникова, В.Ф.Боброва, М.Ф.Полетика, А.Д.Макарова, С.С.Силина, В.Н.Подураева, Н.В.Талантова, Тейлора, Армарего, Брауна, Трента, Розенхайна, Пиисманена, Эрнста, Кроненберга, Мерчанта, Кобаяши, Топмпсена, Палмера, Оксли, Смита, Опитца и других ученых были созданы теоретические основы процесса резания.

Развитие машиностроения в Узбекистане стало основой для создания отечественной школы резания. Ее основал Г.И.Якунин, под научным руководством которого были проведены исследования физических явлений при резании во всем их многообразии. В эти исследования внесли свой вклад В.А.Мирбабаев, М.Т.Балабеков, Ф.Я.Якубов, Э.О.Умаров, А.С.Асцатуров, А.А.Анцупов, А.А.Абдурахманов, Н.С.Абдуллаханов, А.Н.Хашимов, В.А.Юматов, Г.К.Камалиддинов, Н.Г.Молчанова.

По мере развития научных исследований, накопления и обобщения полученных результатов, теоретических разработок происходило их использование в учебном курсе. Первый учебник по курсу "Резание металлов", написанный И.М.Беспрозванным, вышел в 1933г. С тех пор в разные годы был издан ряд учебников и учебных пособий по резанию металлов, которые сыграли и будут играть свою неоценимую роль в подготовке квалифицированных специалистов.

За годы независимости Республики Узбекистан в машиностроении произошли существенные изменения. В настоящее время обработка металлов резанием занимает большой удельный вес в промышленности. Особенно высок процент механической обработки в таких отраслях машиностроения, как автомобильная, энергетическая, железнодорожная, судостроительная. В связи с усложнением конструкций деталей и механизмов, а также применением труднообрабатываемых металлов и сплавов, резко возросла доля механической обработки в авиационной и космической отраслях.

По инициативе Президента Республики Узбекистан, была принята Национальная программа по подготовке кадров, что изменило подходы и концепции в подготовке специалистов с высшим техническим образованием. Все это выдвинуло задачу разработки настоящего учебного пособия, небольшого по объему, но в котором должны быть синтезированы все достоинства ранее изданных учебников по резанию металлов, а также отражены экспериментально проверенные и теоретически обобщенные результаты научных работ последних лет.

ОСНОВЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ОБРАБОТКОЙ РЕЗАНИЕМ

Глава 1

Основы механической обработки металлов резанием

1.1. Основные определения

Обработкой металлов резанием называется срезание с поверхности заготовки слоя металла с целью получения детали требуемой геометрической формы, размеров и качества поверхности.

Слой металла на заготовке, предусмотренный для обработки, называется припуском.

Металл, удаляемый в процессе резания с заготовки, подвергается пластическому деформированию и разрушению. В результате этот срезанный слой приобретает характерную форму и в таком виде его называют стружкой.

Все способы обработки металлов, основанные на срезании припуска и превращении его в стружку, составляют разновидности, определяемые термином "резание металлов".

Для осуществления процесса резания необходимо, чтобы заготовка и режущий инструмент согласованно перемещались относительно друг друга. Движения узлов металлорежущих станков делят на движения резания и вспомогательные. Одно из движений, сообщаемых режущему инструменту или заготовке, называют главным движением - движением резания. Движение, обеспечивающее непрерывность врезания режущего лезвия инструмента в новые слои металла, называют движением подачи. Отличительным признаком движения резания является также и то, что скорость этого движения во много раз превышает скорость движения подачи. Скорость движения резания называют скоростью резания и обозначают буквой v. Скорость движения подачи принято называть просто подачей и её обозначают буквой S.

Главное движение может быть непрерывным (точение, сверление) и прерывистым (строгание, долбление). По своему характеру оно может быть вращательным (точение), поступательным (протягивание) или возвратно-поступательным (строгание).

Движение подачи может быть непрерывным (точение, сверление) или прерывистым (строгание, долбление), а по своему характеру поступательным (точение, сверление) или вращательным (шлифование, зубонарезание). На схемах обработки у подачи ставят индексы, указывающие на характер подачи: Sпр - продольная подача, Sп - поперечная, Sв - вертикальная, Sг - горизонталь-

ная, Skp - круговая и т.д.

Сущность того или иного метода обработки определяется только соотношением скоростей, осуществляемых при движении, и не зависит от того, сообщается ли движение резания и подачи инструменту или заготовке. Например, если при строгании движение резания сообщают резцу, то это соответствует обработке на поперечно-строгальном станке, а если заготовке - то на продольно-строгальном станке. При сверлении на сверлильном станке вращательное движение резания совершает сверло, а на револьверном станке - заготовка. Соответственно, движение подачи может совершать как режущий инструмент, так и заготовка.

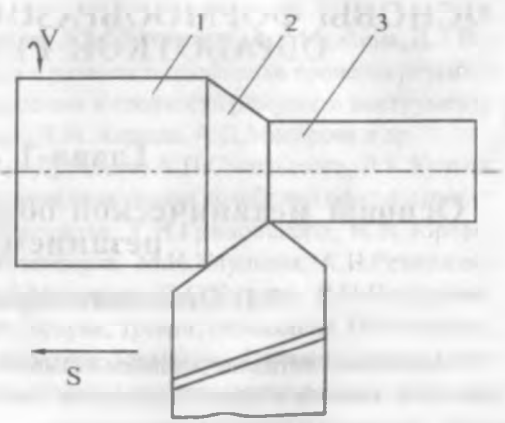


Рис.1.1

В процессе срезания припуска на заготовке различают характерные поверхности (рис.1.1). Поверхность на заготовке, срезаемая за проход режущего инструмента, принято называть обрабатываемой поверхностью 1. Поверхность на заготовке, образовавшуюся после снятия припуска, называют обработанной поверхностью 2. Поверхностью резания 3 называют поверхность, непосредственно образуемую лезвиями инструмента в процессе резания. Эта поверхность является переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями, она существует только во время резания и исчезает после окончания обработки.

Поверхность резания с геометрической точки зрения образована совокупностью траекторий относительного рабочего движения инструмента. Поэтому ее форма определяется формой лезвия инструмента и сочетанием движений заготовки и инструмента в процессе резания. При строгании поверхность резания является плоскостью, а при продольном точении - конволютной винтовой поверхностью.

1.2. Режущая часть инструмента

Для того чтобы режущий инструмент мог осуществлять процесс резания, его режущая часть должна иметь определенные геометрические параметры. Рассмотрим эти параметры на примере наиболее распространенного инструмента – резца (рис. 1.2).

Поверхность 1 называют передней поверхностью. Это такая поверхность инструмента, по которой в процессе резания сходит стружка. Поверхность 2 называется главной задней поверхностью - она обращена к поверхности резания заготовки. Поверхность 3 называют вспомогательной задней поверхностью, которая обращена к обработанной поверхности.

Пересечение передней и главной задней поверхностей образует главное

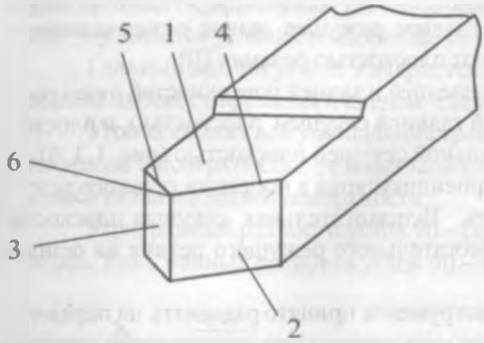


Рис 1.2.

режущее лезвие 4, а пересечение передней и вспомогательной задней поверхностей - вспомогательное режущее лезвие 5. Точка пересечения главного и вспомогательного режущих лезвий образует вершину 6. В зависимости от типа инструмента вспомогательных задних поверхностей на нем может быть больше, чем одна (например, отрезной резец), а может и не быть совсем (например, осевая цилиндрическая фреза).

У некоторых резцов и других инструментов между главным и вспомогательным лезвиями может быть переходное режущее лезвие, которое образовано пересечением передней поверхности с переходной задней поверхностью. Для простоты изготовления инструмента переходное режущее лезвие очерчивают дугой окружности или прямой линией. На переходном режущем лезвии вершиной инструмента называют ту точку лезвия, которой инструмент при его установке на станке коснется обработанной поверхности. Если в процессе резания участвует только одно главное режущее лезвие, то такое резание называют свободным.

Если же в процессе резания кроме главного режущего лезвия принимают участие переходное и вспомогательное лезвия, то резание называют несвободным.

1.3. Геометрические параметры режущей части инструмента

Положение передних и задних поверхностей, главных и вспомогательных режущих лезвий координируется относительно тела инструмента системой

угловых размеров, называемых геометрическими параметрами инструмента.

При заточке и контроле поверхностей и лезвий режущей части инструмента пользуются координатными плоскостями.

Плоскость, параллельную направлениям продольной и поперечной подач, называют основной плоскостью (рис.1.3а). У токарных резцов, имеющих тело в виде параллелепипеда, за основную плоскость принимают нижнюю опорную поверхность ОП.

Плоскость, проходящую через главное режущее лезвие резца, касательную к поверхности резания, называют плоскостью резания ПР.

Для изображения положения передней и задней поверхностей резец рассекают плоскостью NN, называемой главной секущей плоскостью, и плоскостью, N_1N_1, называемой вспомогательной секущей плоскостью (рис. 1.3, б).

Главная секущая плоскость перпендикулярна к проекции главного режущего лезвия на основную плоскость. Вспомогательная секущая плоскость перпендикулярна к проекции вспомогательного режущего лезвия на основную плоскость.

Геометрические параметры инструмента принято разделять на параметры инструмента как геометрического тела нужные при изготовлении инструмента (так называемые статические углы или углы заточки) и параметры инструмента в процессе резания, определяющие условия протекания процесса (так называемые рабочие углы или углы движения). Рабочие углы некоторых инструментов при определенных условиях обработки могут по величине очень сильно отличаться от углов заточки. Сообщив инструменту при его работе те

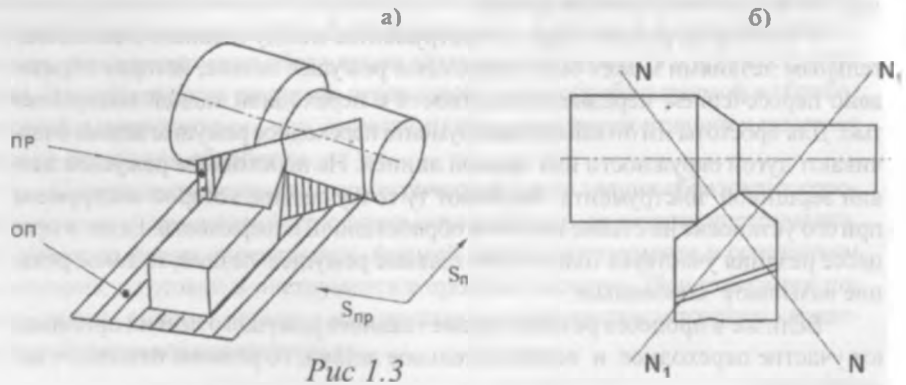


Рис 1.3

или иные движения или изменив соотношение скоростей этих движений, можно при неизмененных углах заточки получить различные по величине рабочие углы.

При рассмотрении углов резца в статике исходят из следующих предположений: ось резца, как геометрического тела, перпендикулярна линии центров токарного станка; вершина резца находится на линии центров станка;

совершается лишь главное движение резания, а движение подачи отсутствует. Углы резца в статике показаны на рис.1.4.

Передний угол γ измеряется в главной секущей плоскости между следом передней поверхности и следом плоскости, перпендикулярной к следу плоскости резания. С увеличением переднего угла уменьшается деформация срезаемого слоя, снижаются силы резания и мощность. Однако увеличение переднего угла приводит к ослаблению главного режущего лезвия, снижению его прочности, ухудшаются условия теплоотвода от режущего лезвия.

Главный задний угол α измеряется в главной секущей плоскости между следом плоскости резания и следом главной задней поверхности.

Угол α служит для уменьшения трения между главной задней поверхностью резца и поверхностью резания заготовки и, следовательно, для уменьшения износа резца по задней поверхности.

Угол, равный разности углов 90 – (α+γ)= β, называют углом заострения резца. Угол, равный разности углов 90 – γ = δ, называют углом резания.

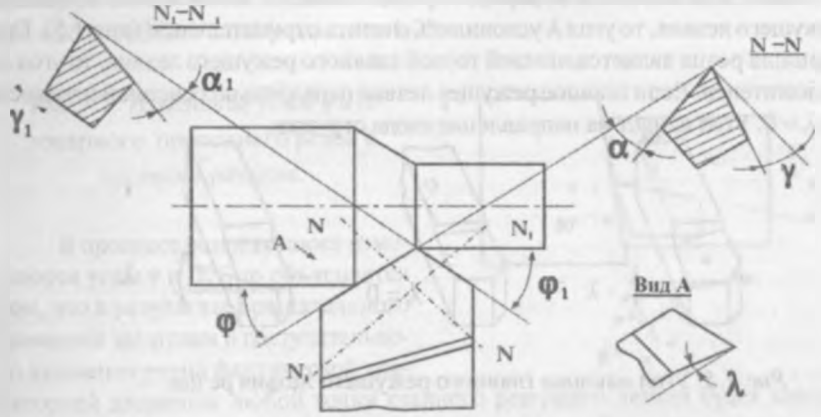


Рис. 1.4. Геометрические параметры резца

Вспомогательный задний угол α_1 измеряется во вспомогательной секущей плоскости между следом вспомогательной задней поверхности и следом плоскости, проходящей через вспомогательное режущее лезвие перпендикулярно основной плоскости. Основное назначение угла α_1 - уменьшение трения между вспомогательной задней поверхностью резца и обработанной поверхностью заготовки.

Положение главного режущего лезвия определяют главным углом в плане φ. Главным углом в плане резца называют угол между проекцией главного лезвия на основную плоскость и направлением подачи. Угол φ оказывает значительное влияние на шероховатость обработанной поверхности. С уменьшением угла φ, шероховатость обработанной поверхности уменьшается. Одновременно с этим это приводит к увеличению активной части длины главного

режущего лезвия, что уменьшает силу и температуру резания, приходящуюся на единицу длины лезвия. Однако с уменьшением угла φ резко возрастает радиальная составляющая силы резания, что увеличивает прогиб заготовки и возможность возникновения вибраций.

Вспомогательным углом в плане φ_1 называют угол между проекцией вспомогательного режущего лезвия на основную плоскость и направлением подачи. С уменьшением угла φ_1 шероховатость обработанной поверхности уменьшается, увеличивается прочность вершины резца и снижается его износ.

Угол, равный разности углов $180 - (\varphi + \varphi_1) = \varepsilon$, называют углом в плане при вершине резца.

Положение главного режущего лезвия относительно основной плоскости определяют углом λ, расположенным в плоскости, проходящей через главное режущее лезвие перпендикулярно основной плоскости. Этот угол называют углом наклона главного режущего лезвия. Угол λ есть угол между главным режущим лезвием или касательной к нему и плоскостью, параллельной основной плоскости. Если вершина резца является высшей точкой главного режущего лезвия, то угол λ условились считать отрицательным (рис.1.5). Если вершина резца является низшей точкой главного режущего лезвия, то угол λ – положителен. Если главное режущее лезвие параллельно основной плоскости, то $\lambda = 0$. Угол влияет на направление схода стружки.

Рис.1.5. Угол наклона главного режущего лезвия резца.

Установка вершины резца выше или ниже оси вращения заготовки, так же как поворот геометрической оси тела вокруг вертикальной оси, автоматически приводит к изменению фактической геометрии режущей части резца.

В процессе обработки наружной цилиндрической поверхности токарным проходным резцом (рис.1.6, а), при установке резца выше оси вращения заготовки на величину h угол γ увеличивается, а угол α уменьшается. При установке резца ниже оси вращения заготовки на величину h угол γ уменьшается, а угол α увеличивается.

На рис.1.6, б показано изменение углов φ и φ_1 в зависимости от положения оси резца относительно оси вращения заготовки. На основании схем, представленных на рис.1.6. б,

имеем $\varphi_p = \varphi \pm \mu$, $\varphi_{1p} = \varphi_1 \pm \mu$

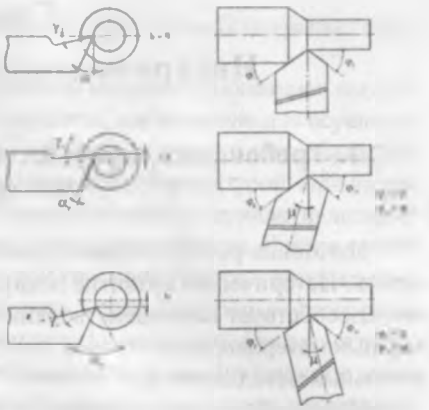


Рис. 1.6. Изменение углов γ и α (а) и φ и φ_1 (б) проходного резца при установке его на станке

В формулах μ - угол, на который ось резца повернута относительно перпендикуляра к оси заготовки. Верхние знаки соответствуют повороту резца против часовой стрелки, а нижние - по часовой стрелке.

Расчеты по уравнениям, выведенным из рис.1.6. а, показывают, что отклонение переднего угла $\Delta\gamma=\gamma_p-\gamma$ и заднего угла $\Delta\alpha=\alpha_p-\alpha$ мало зависят от размеров самих углов и для обычно распространенных их значений (γ=-15...+25°; α= 5...15°) не превышают 1-2°.

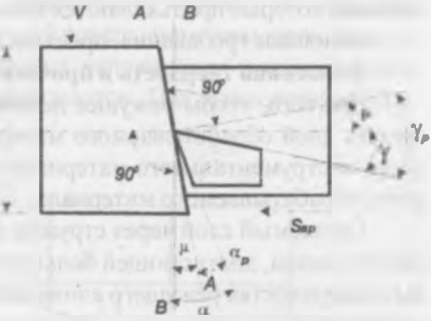


Рис.1.7. Изменение углов γи α токарного проходного резца в процессе резания.

В процессе резания также изменяются углы γ и α. Это объясняется тем, что в результате вращательного движения заготовки и поступательного движения резца фактической траекторией движения любой точки главного режущего лезвия будет винтовая линия, а поверхность резания - винтовая поверхность. Рассмотрим схему, представленную на рис.1.7. Действительным следом плоскости резания будет линия АА, касательная к винтовой поверхности и составляющая с теоретической плоскостью резания ВВ угол μ. Вследствие этого угол α уменьшится, а угол γ увеличится: $\alpha_p=\alpha-\mu$ и $\gamma_p=\gamma+\mu$.

Угол подъема винтовой линии μ связан со скоростью резания и подачей следующей зависимостью:

$$\operatorname{tg}\mu = \frac{n\,S_{пр}}{1000v} = \frac{S_{пр}}{\pi D}$$

При работе с большими подачами, а также при нарезании резьбы изменения углов будут существенны, так как, чем больше подача, тем больше значение угла μ.

Глава 2.

Инструментальные материалы

2.1. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам

Изготовив резец, в общем понятии орудие труда, человек затем создает станок. Историческое развитие показывает, что совершенствование одного из них способствует совершенствованию другого. Создание новых инструментальных материалов дает толчок для создания мощных, более высокопроизводительных металлорежущих станков.

Инструментальные материалы играют решающую роль в повышении режущих свойств инструмента и производительности труда, в формировании точностных параметров и качественных характеристик обрабатываемых деталей.

Надежная работа режущего инструмента зависит от определенных требований, которые предъявляются к инструментальным материалам.

Основные требования, предъявляемые к инструментальным материалам:

1. Высокая твердость и прочность.

Для того, чтобы режущее лезвие инструмента, не деформируясь, могло срезать слой обрабатываемого материала и превратить его в стружку, твердость инструментального материала должна значительно превосходить твердость обрабатываемого материала.

Срезаемый слой через стружку давит на переднюю поверхность инструмента с силой, достигающей больших значений. Вследствие этого на контактных поверхностях режущего клина возникают большие напряжения. Чтобы эти напряжения не приводили к разрушению рабочей части, инструментальные материалы должны быть достаточно прочными. Кроме того, режущим инструментам часто приходится работать в условиях прерывистого резания или с переменным значением сил резания из-за неравномерного припуска на обработку или различной твердости по длине и глубине обрабатываемого материала. Поэтому желательно, чтобы инструментальный материал сочетал высокую твердость с хорошей сопротивляемостью на сжатие и изгиб и обладал высоким пределом выносливости и ударной вязкостью.

2. Высокая теплостойкость.

В процессе резания вследствие превращения механической энергии в тепловую на инструмент действует мощный тепловой поток. Из-за интенсивного разогревания контактные поверхности инструмента теряют свою исходную твердость, размягчаются и быстро изнашиваются. На рис.2.1., где показано уменьшение твердости различных инструментальных материалов при нагревании видно, что при температурах более 300° С углеродистая сталь У10 резко

снижает свою твердость, а минералокерамика ЦМ-332 еще сохраняет свою твердость [1].

Под теплостойкостью инструментального материала понимают способность материала сохранять при нагреве твердость, достаточную для осуществления процесса резания. Теплостойкость инструментального материала при резании характеризуют так называемой критической температурой. При нагреве выше критической температуры в инструментальном материале происходят структурные изменения и связанное с этим снижение стойкости. Иногда критическая температура называется температурой красностойкости, температуростойкости. Режущий инструмент может работать в условиях прерывистого резания, при котором его режущее лезвие периодически нагревается во время рабочего хода инструмента и остывает во время холостого хода. Циклическое изменение тепловой нагрузки вызывает термомеханическую усталость инструментального материала и способствует образованию усталостных трещин. Поэтому наряду с высокой теплостойкостью инструментальный материал должен быть малочувствительным к циклическим температурным изменениям.

3. Высокая износостойкость

В процессе резания, в результате перемещения стружки по передней поверхности и поверхности резания по задней поверхности режущего лезвия с большой скоростью, при высоких контактных напряжениях и температурах рабочие поверхности инструмента изнашиваются. Под износостойкостью

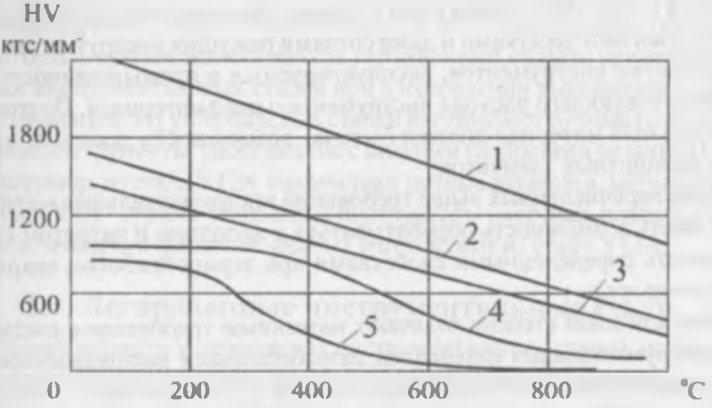


Рис. 2.1. Влияние температуры на твердость (по Виккерсу) инструментальных материалов:

1. Минералокерамика ЦМ-332.
2. Твердый сплав Т15К6.
3. Твердый сплав ВК8.
4. Быстрорежущая сталь Р18.
5. Углеродистая сталь У10.

понимают способность инструментального материала сопротивляться при резании удалению его частиц с контактных поверхностей инструмента. Изнашивание контактных поверхностей происходит на протяжении всего периода их подвижного соприкосновения с обрабатываемым материалом. В результате этого процесса лезвия теряют некоторую часть своей массы и на них отчетливо видны следы износа в виде нарушений формы рабочих поверхностей. Износостойкость материала зависит от его твердости, прочности и теплостойкости, возрастая при их увеличении.

4. Высокая теплопроводность.

Большое значение для улучшения качества инструментального материала имеет повышение его теплопроводности. Особенно это важно при обработке жаропрочных материалов. Чем выше теплопроводность материала, тем меньше опасность возникновения шлифовочных прижогов и трещин на лезвиях инструмента при заточке. Кроме того, при возрастании теплопроводности улучшаются условия отвода тепла из зоны резания, что снижает температуру резания и повышает износостойкость инструмента. Высокая теплопроводность является важным показателем инструментального материала, повышающим надежность и работоспособность режущего инструмента.

5. Высокая экономичность.

В настоящее время в машиностроительной промышленности работает большое количество металлорежущих станков, многие из которых оснащены несколькими инструментами. Обрабатывающие центры, которые быстро внедряются в парк металлорежущих станков, оснащены магазинами инструментов со многими десятками и даже сотнями режущих инструментов. Большое количество инструментов, эксплуатируемых в промышленности, требует соответствующего расхода инструментального материала. Поэтому инструментальный материал должен быть по возможности дешевым и не содержать дефицитных элементов.

Кроме перечисленных выше требований инструментальные материалы должны иметь возможность обрабатываться в холодном и нагретом состоянии, обладать определенными свойствами при термообработке, сварке, напайке, заточке и т.п.

В той или иной степени отвечают названным требованиям следующие группы инструментальных материалов, разработанных к настоящему времени:

1) углеродистые инструментальные стали, 2) легированные инструментальные стали, 3)быстрорежущие стали, 4) твердые сплавы, 5) минералокерамика, 6) природные и синтетические алмазы, 7) сверхтвердые материалы, 8) абразивные материалы.

2.2. Углеродистые инструментальные стали

Используют следующие марки углеродистых инструментальных сталей: У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А и У13А. Входящая в маркировку этих ста-

лей буква А указывает на высшее качество выплавки. Для получения высокой твердости углеродистые стали подвергают закалке с последующим отпуском для снятия остаточных напряжений и повышения прочности и вязкости. В зависимости от содержания в стали углерода и размеров инструмента температура закалки колеблется в пределах 760-820°С.

В результате термической обработки углеродистые стали приобретают твердость HRC 61-63, что дает возможность обрабатывать ими все основные конструкционные стали и чугуны в отожженном и нормализованном состояниях. Структура углеродистой стали после закалки и отпуска состоит из скрытокристаллического мартенсита и карбидов (цементита) с некоторым количеством остаточного аустенита. Углеродистые стали обладают достаточно высокой механической прочностью (табл.2.1) и обеспечивают хорошую формоустойчивость лезвий инструмента.

Вследствие отсутствия в стали легирующих химических элементов углеродистые стали хорошо шлифуются и являются дешевым инструментальным материалом.

К недостаткам углеродистых сталей следует отнести низкую закаливаемость, требующую закалки с охлаждением в воде, что увеличивает напряжения и деформации в закаленном инструменте и способствует образованию трещин. Но главным недостатком углеродистых сталей является их низкая теплостойкость (критическая температура $\theta_{кр}$=200-250 °С).

При более высоких температурах нагрева в процессе резания в результате структурных превращений твердость углеродистых сталей резко снижается и лезвия инструментов, быстро изнашиваясь, не в состоянии резать обрабатываемый материал. Низкая теплостойкость ограничивает область применения углеродистых инструментальных сталей при изготовлении высокопроизводительных инструментов Из углеродистых сталей изготовляют ручные (слесарные) и машинные инструменты, работающие с низкими скоростями резания (10-15 м/мин) Например, из стали У12А изготовляют ручные развертки, метчики и плашки, из стали У9А - зубила. Машинные инструменты (метчики, плашки, развертки, сверла, зенкеры и концевые фрезы) изготовляют из стали У12А.

2.3. Легированные инструментальные стали.

Износостойкость углеродистых инструментальных сталей, особенно при невысоких скоростях резания, может быть значительно повышена при добавлении в них в небольших количествах хрома, марганца, вольфрама, кремния. Такие инструментальные стали получили название легированных.

Наибольшее распространение получили стали марок ХВ5, ХВГ, 9ХС

Сталь ХВ5 закаливается в воде при температуре нагрева 820-840° С и подвергается отпуску при температуре 150-180° С. Присутствие в стали большого числа сложных карбидов при высокой концентрации углерода в мартенсите позволяет получить весьма высокую твердость (HRC 65-67). Сталь ХВ5

Марка стали	Углерод С	Марганец Мп	Кремний Si	Предел прочности на растяж. σ в, ГПА	Предел прочности на изгиб σ п, ГПА	Твердость HRC	Теплостойкость, °С	Предел прочности на сжатие $\sigma_к$ ГПА
У10А У12А	0,95-1,04 1,15-1,24	0,15-0,30 0,15-0,30	0,15-0,30 0,15-0,30	1,8	2,8	61...62 60...62	220	3,5

Таблица 2.1. Содержание легирующих элементов (в %) и физико-механические свойства углеродистых инструментальных сталей.

плохо прокаливается и по прочности не уступает стали У12А, но вследствие большой твердости обладает высоким сопротивлением малым пластическим деформациям и изготовленные из нее инструменты имеют высокую формоустойчивость лезвий. Эта сталь применяется для изготовления разверток и фасонных резцов, работающих при невысоких скоростях резания.

Сталь ХВГ закаливается в масле при температуре нагрева 830-850°С и подвергается отпуску при температуре 150-180°С. После закалки и отпуска получают твердость HRC 63-65 и достаточно высокую вязкость. Сталь хорошо прокаливается и вследствие содержания в ней марганца, увеличивающего количество остаточного аустенита, имеет малые объемные изменения при закалке. Поэтому инструмент, изготовленный из этой стали, мало деформируется и хорошо поддается правке. К недостаткам стали ХВГ следует отнести пониженное сопротивление малым пластическим деформациям из-за излишнего остаточного аустенита, большую карбидную неоднородность и склонность к шлифовочным трещинам. Сталь ХВГ применяется, в основном, для изготовления протяжек крупных размеров.

Сталь 9ХС закаливается в масле при температуре нагрева 865-875° С и отпускается при температуре 150-180° С, приобретая твердость HRC 63-64. Сталь обладает хорошей прокаливаемостью и закаливаемостью. Благодаря закалке в масле деформация инструмента, изготовленного из стали 9ХС, уменьшается. Содержание в стали кремния уменьшает чувствительность к перегреву, способствует сохранению мелкого зерна и обеспечивает равномерное распределение карбидов по сечению инструмента. К недостаткам стали 9ХС следует отнести склонность к обезуглероживанию и плохую обрабатываемость резанием по шероховатости обработанной поверхности. Высокая карбидная однородность стали 9ХС делает ее особо пригодной для изготовления инструментов с тонкими режущими элементами (малого диаметра сверл, разверток, метчиков, плашек и концевых фрез).

Все рассмотренные легированные стали имеют теплостойкость, мало отличающуюся от теплостойкости углеродистой стали У12А ($\theta_{кр} \approx 250°$ С), а поэтому инструменты, изготовленные из указанных сталей, могут работать при низких скоростях резания (20-25 м/мин).

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	V	Mo	W	Твердость HRC не ниже
ХВ5	1,25-1,5	< 0,3	< 0,3	0,4- 0,7	0,15- 0,3	-	4,5-5,5	65
ХВГ	0,9-1,05	0,8 - 1,1	0,15-0,35	0,9-1,2	-	-	1,2-1,6	62
9ХС	0,85-0,95	0,3- 0,6	1,2-1,6	0,95-1,25	-		-	62

Таблица 2.2. Химический состав (в %) и твердость легированных инструментальных сталей.

2.4. Быстрорежущие инструментальные стали.

Быстрорежущие инструментальные стали отличаются от легированных присутствием в них значительно большего количества карбидообразующих элементов (вольфрам, ванадий, молибден и хром), существенно повышающих теплостойкость стали.

Потеря твердости углеродистой инструментальной стали при нагреве выше 200-250°С объясняется интенсивной коагуляцией карбида железа, выделяющегося из мартенсита. Введение в сталь вольфрама, ванадия, молибдена и хрома в определенных количествах и сочетаниях приводит к образованию сложных карбидов, связывающих почти весь углерод, в результате чего процесс коагуляции карбидов начинает происходить при значительно более высоких температурах и теплостойкость стали возрастает. Главную роль в этом явлении играют вольфрам, ванадий и молибден. Высокая теплостойкость быстрорежущих сталей обеспечивается нагревом под закалку до максимально высоких температур (1300° С), охлаждением в масле и последующим троекратным отпуском при температурах 550-580° С. Высокие закалочные температуры способствуют растворению достаточного количества сложных карбидов и предельному насыщению аустенита углеродом и легирующими элементами. После закалки структура быстрорежущей стали состоит из высоколегированного мартенсита, карбидов и аустенита. При отпуске происходит частичный распад твердого раствора, превращение остаточного аустенита в мартенсит и выделение дисперсных частиц карбидов, приводящие к повышению твердости.

По сравнению с углеродистыми и легированными инструментальными сталями быстрорежущие стали имеют более высокую твердость, прочность, теплостойкость и износостойкость, сопротивление малым пластическим деформациям и обладают хорошей прокаливаемостью. Высокая теплостойкость

Библиотека
Инв. ТИП и ЛП
№ 3128

Марка стали	Хим ический состав (в %)					
	W	Mo	V	Co	C	Cr
P9	8,5-10,0	1,0	2,0-2,5	-	0,85-0,95	3,8-4,4
P18	17,0-18,5	1,0	1,0-1,4	-	0,70-0,80	3,8-4,4
P9Ф5	9,0-10,5	1,0	4,3-5,1	-	1,4-1,5	3,8-4,4
P6M5	5,5-6,5	5,0-5,5	1,0-2,1	-	0,8-0,88	3,8-4,4
P6K5	5,5-6,5	1,0	2,0-2,6	5,0-6,0	0,9-1,0	3,8-4,4
P9K10	9,0-10,5	1,0	2,0-2,6	9,0-10,5	0,9-1,0	3,8-4,4

Таблица 2.3. Химический состав быстрорежущих инструментальных сталей.

быстрорежущих сталей позволяет изготовленным из них инструментам работать со скоростями резания в 2,5-3,0 раза более высокими, чем те, которые при равной стойкости допускают углеродистые инструменты.

Хорошие режущие и технологические свойства быстрорежущей стали являются причиной широкого применения ее при изготовлении самых разнообразных инструментов. Из быстрорежущих сталей изготовляют инструменты в тех случаях, когда изготовление инструментов из твердых сплавов связано со значительными технологическими трудностями и обходится слишком дорого (например, фасонные инструменты и инструменты со сложными кон-

Марка стали	Предел прочности на растяжении, σ b, ГПА	Предел прочности на изгиб, σ и, ГПА	Предел прочности на сжатие, σ сж, ГПА	Твердость, HRC	Теплостойкость, °С
P9	2,5	3,35	4,0	62-63	620
P18	2,5	2,9-3,1	4,0	62-63	620
P6M5	2,5	3,3-3,4	4,0	63-64	620
P9Ф5	2,5	2,6-2,9	4,0	64-65	620
P6K5	2,5	2,5	4,0	63-64	640
P9K10	2,5	2,05-2,1	4,0	63-64	640

Таблица 2.4. Физико-механические свойства быстрорежущих инструментальных сталей.

структивными формами). Кроме того, механическая прочность инструментов, изготовленных из твердых сплавов, при резании бывает недостаточной, и это может привести к аварии инструмента, особенно при безлюдной технологии (например, при резании высокопрочных материалов с большими сечени-

ями срезаемого слоя, прерывистое резание с тяжелым динамическим режимом, резание при малой жесткости технологической системы).

Из быстрорежущих сталей изготовляют фасонные резцы, сверла, зенкеры, развертки, метчики, плашки, винторезные головки, цилиндрические, осевые и концевые фрезы, фасонные и резьбовые фрезы, червячно-модульные и червячно-шлицевые фрезы, зуборезные долбяки, шеверы, протяжки.

2.5. Твердые сплавы.

Внедрение твердых сплавов в начале 30-х годов XX века вызвало резкое повышение производительности труда в металлообрабатывающей промышленности. Износостойкость инструмента и скорости резания увеличились в десятки раз, улучшилось качество обработанной поверхности, повысилась точность изготовления. Для изготовления режущей части инструментов применяют так называемые металлокерамические твёрдые сплавы. Металлокерамические твердые сплавы изготавливают спеканием в защитной атмосфере смеси порошков карбида и цементирующего металла. Из-за некоторой аналогии технологии изготовления твердых сплавов с керамическим производством они получили название металлокерамических твердых сплавов.

Исходным материалом для изготовления твердых сплавов являются порошки карбидов тугоплавких металлов: вольфрама, титана, тантала и не образующие карбидов кобальта. Порошки смешивают в определенных пропорциях, прессуют в формах и спекают при температуре 1500-2000° С. При спекании твердые сплавы приобретают высокую твердость и в дополнительной терми-

Марка	Химический состав (в%)				Плотность г/см³	Предел прочности		Твердость HRA	Теплостойкость θ кр,°С
	WC	TiC	TaC	Co		при изгибе, σ b, ГПА	при сжатии σ сж, ГПА		
ВК3	97	-	-	3	14,8-15,3	1,0	5	89	800-850
ВК6	94	-	-	6	14,5-15,0	1,2	5	88	
ВК8	92	-	-	8	14,4-14,8	1,3	5	87,5	
Т30К4	66	30	-	4	9,5-9,8	0,9	4	91	850-900
Т15К6	79	15	-	6	11,0-11,7	1,1	4	90	
Т5К10	85	6	-	9	12,2-13,2	1,15	4	88,5	
ТТ7К12	81	4	3	12	13,0-13,3	1,65	-	-	750

Таблица 2.5. Химический состав и физико-механические свойства некоторых твердых сплавов.

ческой обработке не нуждаются. Твердые сплавы для изготовления режущих инструментов поставляют в виде пластинок определенной формы и размеров. Пластинки твердых сплавов присоединяют к корпусу инструментов припаиванием или с помощью разнообразных устройств механического крепления.

Чем больше в сплаве карбидов вольфрама, титана, тантала, тем выше твердость и теплостойкость сплава и ниже его механическая прочность. При увеличении содержания кобальта, наоборот, твердость и теплостойкость сплава снижаются, но возрастает его прочность.

Твердые сплавы делятся на три группы: *1)* вольфрамовые (однокарбидные) сплавы, состоящие из карбидов вольфрама и кобальта. Сплавы этой группы обозначаются буквами ВК. После буквы К прибавляют цифру, показывающую процентное содержание кобальта. Например, обозначение ВК6 характеризует сплав с 6% Со и 94% WC. Крупнозернистые сплавы этой группы дополнительно обозначают буквой В (например, ВК8В), мелкозернистые сплавы - буквой М (например, ВК6М); *2)* титано-вольфрамовые (двухкарбидные), состоящие из карбида вольфрама, карбида титана и кобальта. Сплавы этой группы обозначаются буквами ТК. Цифры, следующие за буквами Т и К, означают примерное содержание в процентах карбида титана и кобальта в сплаве; *3)* титанотанталовольфрамовые (трехкарбидные), состоящие из карбида вольфрама, карбида титана, карбида тантала и кобальта. Сплавы этой группы аналогично титановольфрамовым сплавам обозначают теми же буквами, но прибавляют еще одну букву Т (например, ТТ7К12). Буквы ТТ и цифра, следующая за ними, означают примерное процентное содержание карбидов титана и тантала в сумме. Цифра, следующая за буквой К, означает процент содержания кобальта в сплаве.

Твердость и теплостойкость титановольфрамовых сплавов выше, чем вольфрамовых. Увеличение твердости и теплостойкости титановольфрамовых сплавов сопровождается снижением их прочности на изгиб и ударной вязкости. Предел прочности на изгиб сплавов уменьшается по мере увеличения в сплавах карбидов вольфрама и титана и уменьшения кобальта. Теплопроводность титановольфрамовых сплавов значительно ниже, чем вольфрамовых, и приближается к теплопроводности быстрорежущей стали. Прочность твердых сплавов определяется не только их составом, но и размером зерен карбида вольфрама. Сплавы с большим размером зерна имеют большую прочность, что связано с относительным увеличением толщины прослойки цементирующей фазы. Уменьшение размеров зерен карбидов вольфрама, наоборот, несколько снижает прочность, но повышает твердость и износостойкость сплава.

Повышенную хрупкость вольфрамовых и особенно титановольфрамовых сплавов необходимо учитывать при конструировании и эксплуатации инструментов. Твердые сплавы, значительно уступая быстрорежущей стали по прочности на изгиб, равны ей или даже превосходят сталь по прочности на сжатие. Очевидно, режущий клин твердосплавного инструмента должен быть таким, чтобы действующие на инструмент нагрузки создавали в клине преоб-

ладающие напряжение не изгиба, а сжатия, которые твердый сплав, как всякий хрупкий материал, воспринимает несравненно лучше.

Трехкарбидные титанотанталовольфрамовые сплавы по своим свойствам занимают промежуточное положение между сплавами высокой теплостойкости и титановольфрамовыми твердыми сплавами. Уступая сплавам ТК по теплостойкости, они превосходят их по прочности. Скорость резания, допускаемая сплавом ТТ7К12 при малых сечениях срезаемого слоя, в 2-3 раза превышает скорость резания, допускаемую сталью Р18, и в 1,5 раза ниже скорости резания для сплава Т5К10.

Выбор группы твердого сплава при конструировании инструментов определяется родом и механическими свойствами материала обрабатываемой заготовки и условиями работы. Обработка хрупких материалов по сравнению с обработкой пластичных материалов характерна меньшими температурами резания. Поэтому при обработке чугуна используют менее теплостойкие, но более дешевые сплавы группы ВК. Применение вольфрамовых сплавов в этом случае целесообразно и вследствие их повышенной прочности, так как ширина площадки контакта при обработке чугуна мала и нагрузка на передней поверхности концентрируется в непосредственной близости от лезвия. Сплавы группы ВК применяют также при резании мягких цветных металлов, обработка которых сопровождается малой интенсивностью тепловыделения.

При резании конструкционных углеродистых и легированных сталей и сплавов, когда температура резания высока, применение вольфрамовых сплавов не обеспечивает высокой производительности обработки, и целесообразно использовать более теплостойкие и износостойкие сплавы группы ТК. Однако в некоторых случаях, когда при обработке указанных материалов прочность титановольфрамовых сплавов оказывается недостаточной, используют менее теплостойкие, но более прочные сплавы группы ВК. К таким случаям можно отнести обработку некоторых сталей и сплавов, обладающих высокой твердостью и вязкостью, титановых сплавов повышенной прочности, закаленных углеродистых и легированных сталей, обработку с большими сечениями срезаемого слоя при прерывистом резании.

Сплавы группы ТТК по использованию являются универсальными и их можно применять при обработке как сталей, так и чугунов. Основная область применения трехкарбидных сплавов - это резание с очень большими сечениями срезаемого слоя, обработка с тяжелыми ударами. В этих случаях повышенная прочность титановольфрамовых сплавов компенсирует их пониженную теплостойкость.

При выборе марки твердого сплава в пределах каждой группы необходимо учитывать следующее: чем тяжелее условия работы инструмента в силовом отношении, тем больше кобальта должен содержать сплав, и чем легче силовой режим, тем больше в сплаве должно содержаться карбидов титана и вольфрама.

Из твердого сплава изготавливают самый разнообразный режущий ин-

струмент. По мере совершенствования технологии инструментального производства границы изменения твердосплавного ,инструмента непрерывно расширяются.

2.6. Минералокерамика.

Минералокерамика так же, как и металлокерамика, получается спеканием оксидной минеральной керамики, являющейся кристаллической окисью алюминия Al_2O_3. Наибольшее распространение получила минеральная керамика марки ЦМ-332.

Исходным материалом для изготовления минералокерамики является тонкоизмельченный порошок корунда - искусственной окиси алюминия, полученной прокаливанием при температуре 1500-1700°С технического глинозема. Для предотвращения роста кристаллов корунда при спекании в керамику добавляют 0,5-1% окиси магния, которая, вступая в реакцию с окисью алюминия, образует достаточно прочное цементирующее вещество. При прессовании керамических пластинок в исходную шихту добавляют пластификатор: 5%-ный раствор каучука в бензине. Спекание пластинок производят в два приема. Первое спекание в течение 2 часов при температуре 1100°С и второе спекание в течение 10-15 мин при температуре 1720-1760° С.

В результате спекания минералокерамика представляет собой поликристаллическое тело, состоящее из мельчайших кристаллов корунда и межкристаллической прослойки в виде аморфной стекловидной массы. Минералокерамика поставляется в виде пластинок тех же форм и размеров, что и пластинки твердых сплавов. Пластинки минералокерамики прикрепляют к корпусу инструментов припаиванием, приклеиванием и механическим путем. Минералокерамика является наиболее дешевым и доступным инструментальным материалом, так как не содержит в своем составе дефицитных и дорогих химических элементов. Минералокерамика обладает большой твердостью (HRA 91-93), исключительно высокой теплостойкостью: ее критическая температура $\theta_{кр}$=1200°С. По теплостойкости минералокерамика превосходит все распространенные инструментальные материалы, включая алмазы, что позволяет минералокерамическому инструменту работать со скоростями резания (300-600 м/мин), значительно превышающими скорость резания твердосплавных инструментов. Это является основным достоинством минералокерамики. По сравнению с другими инструментальными материалами минералокерамика наименее склонна к слипанию с обрабатываемым материалом.

Серьезным недостатком минералокерамики, ограничивающим ее применение, является низкая прочность на изгиб и низкая ударная вязкость. Для пластинок марки ЦМ-332, например, предел прочности на изгиб $\sigma_{из}$ = 0,37 ГПа, что значительно меньше, чем у наименее прочных титановольфрамовых твер-

дых сплавов. Не менее существенным недостатком минералокерамики является исключительно низкая сопротивляемость циклическому изменению тепловой нагрузки, в результате чего при прерывистом резании на контактных поверхностях инструмента возникают температурные усталостные трещины, являющиеся причиной преждевременного выхода инструмента из строя. Из-за низкой прочности на изгиб и высокой хрупкости минералокерамику целесообразно использовать при обработке мягких цветных металлов. При обработке стали и чугуна применение минералокерамики ограничивается чистовым непрерывным точением с малыми сечениями срезаемого слоя при отсутствии толчков и ударов.

С целью повышения прочности минералокерамики в ее состав стали вводить такие добавки, как вольфрам, титан, молибден или сложные карбиды этих металлов. Образовавшиеся составы из кристаллов корунда и карбидов тугоплавких металлов получили название керметы.

Керметы имеют предел прочности на изгиб $s_и$ = 0,6-0,7 Гпа, что почти в два раза выше, чем у пластинок марки ЦМ - 332. Однако добавки тугоплавких металлов и сложных карбидов снизили теплостойкость и износостойкость.

Пластинки керметов изготовляются в виде многогранников и круглых пластинок. Они имеют марки ВОК-60, ВОК-63 и ВЗ. Твердость пластинок из кермета и минералокерамики практически одинакова. Керметы применяются для окончательной обработки металлов резанием.

2.7. Природные и синтетические алмазы.

Алмаз по своей природе представляет собой одну из аллотропических модификаций углерода. Основными разновидностями технических алмазов являются борт, баллас и карбонадо. Борт - кристалл октаэдрической формы с дефектами; баллас - шаровидный агрегат мелкозернистого строения; карбонадо - тонкозернистый пористый агрегат черного цвета. Кристаллы алмаза отличаются большой анизотропией и имеют так называемые "твердые" и "мягкие" направления, в которых твердость и прочность неодинакова. При подготовке кристаллов алмаза для инструментов их необходимо обрабатывать в "мягком" направлении, а при закреплении кристаллов в инструменте располагать их так, чтобы износу сопротивлялись "твердые" направления.

В режущих инструментах применяют кристаллы алмаза весом от 0,31 до 0,75 карата (1 карат равен 0,2 г). Закрепление кристаллов в инструменте осуществляется пайкой и механическим путем.

Алмаз обладает многими свойствами, весьма полезными для оснащения им режущих инструментов, в первую очередь, исключительно высокой твердостью (100 ГПа). Алмаз отличается высокой теплопроводностью (коэффициент теплопроводности λ=140Вт/(мК)), намного превышающей теплопровод-

ность всех известных инструментальных материалов. Малый коэффициент линейного расширения алмаза $(0,73\text{-}1,45)10^{-6}$ позволяет производить алмазным инструментом точную размерную обработку. Низкий коэффициент трения по стали (μ= 0,17-0,05) и малая склонность к адгезии обеспечивают при резании алмазными инструментами низкую шероховатость обработанной поверхности.

Но наряду с перечисленными достоинствами алмаз имеет и ряд серьезных недостатков, из которых главным является пониженная прочность. Предел прочности алмаза на изгиб составляет 300 МПа, а предел прочности на сжатие 2000 МПа, что значительно меньше, чем у твердых сплавов. При нагревании алмаза в контакте с железом происходит интенсивное растворение алмаза в железе. Поэтому критические температуры при резании не должны превышать 700-750° С.

Высокая хрупкость и относительно низкая теплостойкость алмаза не позволяют применять его при обработке стали и чугуна. Алмазные инструменты в настоящее время успешно применяют при обработке цветных металлов, прочных пластмасс и полупроводников.

Совершенствование технологии получения синтетических алмазов позволило изготовлять поликристаллические образования достаточно больших размеров, из которых делают вставки-лезвия к режущим инструментам. По твердости синтетические алмазы лишь незначительно уступают природным. Синтетические алмазы маркируются буквами "АС". Применяются для плавной чистовой обработки со скоростями резания 1000-1200 м/мин.

2.8. Сверхтвердые материалы

В настоящее время инструментальная промышленность выпускает сверхтвердые материалы на основе нитрида бора - композиты. Кубический нитрид бора представляет собой соединение бора 43,6% и азота 56,4%, имеющего так же, как и графит, гексогональную кристаллическую решетку. При высоком давлении и температуре гексогональная решетка превращается в кубическую. Кубический нитрид бора (КНБ) - весьма твердый, теплостойкий и химически устойчивый материал. По твердости КНБ (90 ГПа) близок к алмазу, а по теплостойкости (1300° С) превосходит его. КНБ инертен к железоуглеродистым сплавам. Для изготовления режущих инструментов используются поликристаллы КНБ и композиционные материалы ("композиты"), созданные на его основе. Композиты (Табл.2.6) подразделяются на эльбор-Р (композит 1), гексанит (композит 10), композит 05, композит 10Д, силинит. Все они выпускаются в виде цилиндров диаметром 4-8 мм и высотой 3-6 мм.

Расширение применения сверхтвердых материалов в качестве режущих инструментов обусловлено внедрением в машиностроение все больших объе-

мов труднообрабатываемых материалов, процессов точного литья с малыми припусками под механическую обработку, а также созданием нового высокопроизводительного автоматизированного оборудования в комплексе с эффективным режущим инструментом.

Рациональное применение инструмента из сверхтвердых материалов - один из перспективных путей интенсификации металлообработки, особенно на станках с ЧПУ, многоцелевых станках, в гибких производственных модулях и системах.

Марка	Состав	Твердость HV, ГПА	Область применения
Эльбор-Р(К01)	КНБ	до 90	Чистовая обработка закаленных сталейс HRC 40-63, чугунов
Гексанит К01, К10, К108	КНБ	60	Чистовая обработка закаленных сталейс HRC 40 -68, чугунов, твердых сплавов
Композит 05	КНБ+ Al_2O_3	45	Получистовая обработка чугунов, в том числе отбеленных и других материалов,дающих стружку надлома
Силинит	Si_3N_4, Al_2O_3 и другие добавки	до 96 HRA	
BN100 (Япония)	КНБ+добавки	45	Чистовая обработка закаленных сталейс HRC 68
BN230 (Япония)	КНБ+TiC	45	Получистовая и чистовая обработка углеродистых, инструментальных сталей, подшипниковых сталей твердостью HRC более 45
Сиалон (Англия)	Si_3N_4+Al_2O_3+AlN	-	Обработка чугуна, коррозионностойких сталей с припусками до 12 мм
Кион 2000 (США)	Si_3N_4+Al_2O_3+AlN	-	Обработка чугуна, коррозионностойких сталей с припусками до 12 мм

Таблица 2.6. Основные характеристики и область применения некоторых инструментальных материалов на основе кубического нитрида бора.

2.9. Абразивные материалы

Абразивными материалами называют вещества природного или синтетического происхождения, содержащие минералы высокой твердости и прочности, зерна и порошки которых способны обрабатывать поверхности других твердых тел путем царапанья, скобления или истирания. Их применяют для изготовления шлифовальных и заточных кругов, головок, брусков, хонов, а также для доводочных и полировальных паст и порошков.

Абразивные материалы подразделяются на естественные и искусственные. К первым относятся кварц (SiO_2), наждак и корунд. Все они имеют сравнительно низкие режущие свойства и поэтому мало применяются в обрабатывающей промышленности. Для абразивных инструментов, в основном, применяются искусственные абразивные материалы: электрокорунд, карбид кремния, карбид бора, силикокарбид бора, синтетические алмазы.

Электрокорунд получают методом плавки в дуговых электропечах при температуре 2000-2050°С из материалов, богатых окисью алюминия (бокситы, глинозем). Электрокорунд - весьма твердый, плотный и термостойкий материал. В зависимости от процентного содержания Al_2O_3 он бывает нормальный, белый, легированный и монокорунд.

Электрокорунд нормальный содержит до 95% Al_2O_3. Выпускают его марок 12А, 13А, 14А, 15А и 16А. Применяют электрокорунд нормальный для менее ответственных кругов при шлифовании сталей, чугунов и твердых бронз.

Электрокорунд белый содержит более 97% Al_2O_3. Выпускают его марок 22А, 23А, 24А и 25А. Имеет белый, серовато-белый или светло-розовый цвет. Электрокорунд белый более тверже, чем электрокорунд нормальный. Применяют электрокорунд белый для резьбошлифовальных, заточных кругов, выполняющих более точные работы, бруски к хонинговальным и суперфинишным головкам.

Легированный электрокорунд бывает хромистый, титанистый и циркониевый. Электрокорунд хромистый (технический рубин) получают из глинозема с добавкой от 0,4 до 2% Cr_2O_3. По сравнению с электрокорундом белым зерна хромистого электрокорунда более стабильны по физико-механическим свойствам, более тверже. Выпускают марки 32А, 33А и 34А. Электрокорунд титанистый (технический сапфир) получают плавкой глинозема с добавкой 2-3% окиси титана. Его зерна имеют повышенную режущую способность, он тверже хромистого электрокорунда. Выпускаются марки 37А. Электрокорунд циркониевый получают из глинозема, двуокиси циркония (10-40%) и окислов титана. Циркониевый электрокорунд более твердый (21 ГПа) и износостойкий, чем титанистый электрокорунд. Выпускается марки 38А.

Монокорунд - одна из разновидностей электрокорунда, зерна которого

имеют форму правильных кристаллов малых размеров или их осколков. Его особенность - наличие большого числа граней, а значит, режущих кромок зерна. Применяется монокорунд для скоростных и заточных кругов, а также для микропорошков. Выпускается марки 43А, 44А и 45А.

Карбид кремния (SiC) получают в электропечах при температуре 1800-1850°С из материалов, богатых кремнеземом и материалов с высоким содержанием углерода. Карбид кремния обладает большой твердостью (32-35ГПА) и хрупкостью, чем электрокорунд, имеет более острые режущие кромки. Карбид кремния делится на черный и зеленый. Карбид кремния черный обозначается маркой 5С, содержит 95-98% SiC и имеет черный или темно-синий цвет. Выпускаются марки 52С, 53С, 54С и 55С. Применяется карбид кремния черный для заточки инструментов, шлифования твердых сплавов и хрупких материалов. Карбид кремния зеленый выпускается марок 62С, 63С, 64С. По твердости и остроте режущих кромок карбид кремния зеленый превосходит карбид кремния черный. Карбид кремния зеленый применяют для заточки быстрорежущих и твердосплавных инструментов и правки шлифовальных кругов.

Карбид бора (B_4C) получают при плавке борной кислоты B_2O_3 и нефтяного кокса в электропечах. Он имеет серовато-черный цвет, содержит до 93% B_4C и 1,5% свободного углерода. Карбид бора значительно тверже (39-44 ГПа) карбида кремния, но термостойкость ниже. Поэтому применяется в виде микропорошков или паст для доводки твердосплавных инструментов.

Силикокарбид бора получают методом восстановительной плавки в дуговой печи смеси борной кислоты, нефтяного кокса и кварцевого песка. Его режущая способность намного выше карбида бора. Применяется в виде высококачественных микропорошков для обработки технических рубинов, твердых сплавов и других весьма твердых материалов.

Синтетические алмазы в зависимости от размеров зерен, метода их получения и контроля делятся на две группы: шлифпорошки зернистостью 630...50 мкм и микропорошки зернистостью 40-3 мкм.

Шлифпорошки бывают пяти марок: АСО - обычной прочности для изготовления инструментов на органических связках; АСР - повышенной прочности для инструментов на керамических и металлических связках; АСВ высокой прочности для инструментов на металлических связках, работающих при повышенных удельных нагрузках; АСК-более прочные, чем АСВ, рекомендуются для инструментов на металлических связках, применяемых в особо тяжелых условиях работы (хонингование закаленных чугунов и др.); АСС - обладают наибольшей из всех марок порошков прочностью, рекомендуются для инструмента, применяемого в процессе правки абразивных кругов.

Микропорошки выпускают двух марок: АСМ-нормальной абразивной способности для обработки твердых сплавов, стали, чугуна, стекла и других

материалов; АСН - повышенной абразивной способности для обработки алмазов, корундов и других особо твердых материалов.

2.10. Основные пути и методы повышения качества режущих инструментов

Высокопроизводительная эксплуатация современных мощных и скоростных металлорежущих станков, станков с ЧПУ, обрабатывающих центров, гибких производственных модулей и систем, создание безлюдных технологий диктуют непрерывного повышения качества режущего инструмента, изыскания путей и методов надежного и оптимального использования его.

При изготовлении режущих инструментов из быстрорежущей стали получили применение различные способы химико-термической обработки, позволяющие значительно улучшить ряд таких показателей качества инструмента, как твердость, износостойкость, коррозионную стойкость и др. Наиболее распространенными являются следующие виды химико-термической обработки [2,13,6].

Азотирование, нитрирование - диффузионное насыщение поверхностного слоя толщиной 0,2-0,8 мм в среде аммиака или в расплаве солей на основе карбамида при температуре 500-650° С.

В результате повышаются твердость, износостойкость, коррозионная стойкость и сопротивление усталости.

Борирование - насыщение поверхности бором для повышения твердости, теплостойкости, износостойкости, коррозионной стойкости.

Цианирование - насыщение поверхностного слоя инструмента углеродом и азотом одновременно. Цианирование производится после термообработки и окончательной заточки. После цианирования получают слой толщиной 20-30 мкм, обладающий высокой твердостью (до 70 HRC), а также теплостойкостью и износостойкостью. После цианирования стойкость инструментов повышается в 1,5-2 раза.

Алитирование - насыщение поверхностного слоя инструмента алюминием на глубину 0,02-1,2 мм для повышения теплостойкости.

Находит применение упрочнение режущих элементов инструмента поверхностным пластическим деформированием. Для инструментов из быстрорежущей стали упрочнение производится после закалки с помощью алмазного выглаживания, обкатки шариком, ультразвука. Например, алмазное выглаживание зубьев протяжек повышает в 2-3 раза их стойкость по сравнению с шлифованием и на 20-40% по сравнению с полированием.

Одним из способов поверхностного деформирования твердосплавных пластин является виброабразивная и дробеструйная обработка. Виброабразивная обработка повышает стойкость пластин при фрезеровании в 1,2-2 раза, при точении - в 1,5 раза.

Внедрение технологии склеивания режущих инструментов исключает трещинообразование и снижает себестоимость изготовления инструмента на 20%. При переводе паяных и сварных конструкций на клеенную - стойкость инструмента увеличивается в 1,3-1,5 раза.

Метод химико-термического образования покрытия лишь ограниченно увеличивает поверхностные свойства за счет варьирования технологическими параметрами процесса, поэтому эффективность этого метода относительно невысока. Более широкое распространение получил метод химического осаждения покрытий из парогазовой фазы (метод ХОП).

Методы ХОП получили широкое распространение для нанесения покрытий на основе карбидов, нитридов, карбонитридов титана, а также окисла алюминия на многогранные неперетачиваемые твердосплавные пластинки.

Отличительной особенностью покрытий, полученных методами ХОП, является формирование переходной зоны между покрытием и твердым сплавом. Формирование переходной зоны связано с интердиффузионными реакциями между насыщающим тугоплавким металлом из парогазовой смеси и компонентами твердого сплава.

Методы ХОП обычно реализуются при температурах около 1000-1100° С, что исключает их использование для нанесения покрытий на инструменты из быстрорежущей стали, подвергнутые полной термической обработке.

Очень широкое распространение получили методы физического осаждения покрытия. Этот процесс обычно включает вакуумное испарение тугоплавкого металла - образователя соединения покрытия, его частичную или полную ионизацию, подачу реакционного газа, химические и плазмохимические реакции, конденсацию покрытия на рабочих поверхностях режущего инструмента.

Среди этих методов наибольшее распространение получил метод конденсации покрытий из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхностей инструмента (метод КИБ), а также метод реактивного электронно-лучевого плазменного осаждения покрытий из пароплазменной фазы в вакууме (метод РЭП).

Возможность широкого варьирования температурой в зонах нанесения покрытий позволяет использовать вакуумно-плазменные методы в качестве универсальных методов для нанесения покрытий на инструменты из твердых сплавов и быстрорежущей стали.

Вакуумно-плазменные методы универсальны и с точки зрения возможности получения широкой гаммы монослойных, многослойных и композиционных покрытий на базе нитридных, карбидных, карбонитридных, оксидных, боридных соединений тугоплавких металлов IV-VI групп Периодической системы элементов. Эти методы позволяют более эффективно управлять процессами получения покрытий с заданными свойствами, а также предупреждать образование геометрических, кристаллохимических и физико-механи-

ческих дефектов на поверхностных слоях инструментального материала.

Одним из важнейших параметров покрытия, оказывающим сильное влияние на работоспособность режущего инструмента, является его толщина.

Выбор оптимальной толщины покрытия во многом определяется свойствами инструментальной матрицы.

В таблице 2.7. представлены обобщенные данные [2] оптимальных значений толщины покрытий для твердосплавных пластинок широкой области использования.

Таблица 2.7.

Покрытие, полученное методом ИБ	Толщина покрытия, мкм					
	ВК6	Т5К10	ТТ10К8Б	ВК6	ТТ10К8Б	ТТ7К12
	Точение			Фрезерование		
	Чугун	Сталь		Сталь		
TiN, ZrN, (Ti-Cr), MoN, CzN	6-8	6-8		3-5		

Исследованиями [2] установлены оптимальные толщины покрытий, полученных методом КИБ. При изменении условий резания оптимальное значение толщины покрытий для инструментов из быстрорежущей стали, работающих в условиях наростообразования, снижается до 3-5 мкм, в то время как при отсутствие нароста это значение может быть увеличено до 5-7 мкм. Для твердосплавных пластинок ВК6, Т5К10, ТТ10К8Б при точении конструкционных сталей при значениях подач 0,01-0,6 мм/об оптимальной толщиной покрытий является значение в пределах 6-10 мкм.

Для прерывистых процессов резания в условиях знакопеременных значений тепловых и силовых напряжений оптимальную толщину покрытий для инструментов из твердых сплавов и быстрорежущих сталей следует снижать до 3-5 мкм.

Практика применения инструментов с износостойкими покрытиями показала их надежность и стабильность в процессе резания, увеличение стойкости в 2-3 раза, уменьшение сил резания и температуры на 20-25%.

Глава 3.

Физические основы резания металлов

3.1. Элементы резания и размеры срезаемого слоя при продольном точении

Общепринятая схема процесса резания металлов достаточно проста. Режущее лезвие инструмента, перемещаясь, внедряется в обрабатываемый металл, разделяет его, образуя стружку и обработанную поверхность. Но, несмотря на кажущуюся простоту, при резании имеет место сложнейший комплекс различных физико-химических явлений.

Принципиальная кинематическая схема при продольном точении определяется сочетанием двух движений: равномерного вращательного движения заготовки и равномерного поступательного резца вдоль оси вращения заготовки. На рис.3.1. показана схема продольного точения.

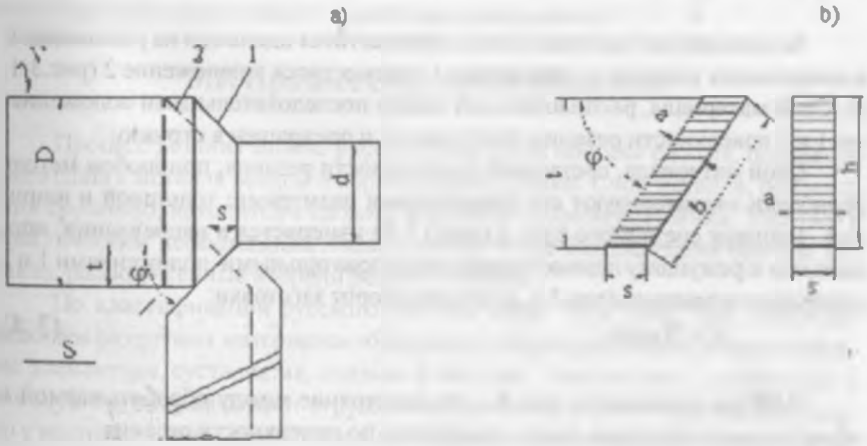


Рис.3.1. Размеры срезаемого слоя при продольном точении.

Заготовка вращается вокруг своей оси с числом оборотов n в минуту, совершая движения резания. Скорость резания численно равна окружной скорости вращения точки заготовки, расположенной на обрабатываемой поверхности диаметром D, и определяется по формуле:

$$v = \frac{\pi D n}{1000} \text{ м/мин} \qquad (3.1)$$

Резец перемещается вдоль оси заготовки со скоростью $S_м$ мм/мин, совершая движение подачи. Скорость $S_м$ получила название минутной подачи резца. Путь, пройденный резцом вдоль оси заготовки за один оборот, называют подачей на оборот и определяют по формуле:

$$S = \frac{S_м}{n} \text{ мм/об} \qquad (3.2)$$

В результате вращательного движения заготовки и поступательного движения резца вдоль оси заготовки, которые совершаются одновременно, с поверхности заготовки удаляется слой материала размером t, который называют глубиной резания. Под глубиной резания понимается расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренные перпендикулярно к последней, за один проход инструмента относительно обрабатываемой поверхности. При продольном точении глубину резания определяют по формуле:

$$t = \frac{D - d}{2} \text{ мм} \qquad (3.3)$$

За один оборот заготовки резец переместится вдоль оси на расстояние S и поверхность резания из положения 1 переместится в положение 2 (рис.3.1, а). Слой материала, расположенный между последовательными положениями 1 и 2 поверхности резания, будет срезан и превращен в стружку.

Слой материала, срезаемый с поверхности резания, при любом методе обработки характеризуют его физическими размерами: толщиной и шириной. Толщина срезаемого слоя *a* (рис.3.1,б) измеряется в направлении, нормальном к режущему лезвию (между последовательными положениями 1 и 2 поверхности резания) (рис.3.1,а) за один оборот заготовки:

$$a = S\sin\varphi \qquad (3.4)$$

Ширина срезаемого слоя b - это расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями, измеренное по поверхности резания:

$$b = \frac{t}{\sin\varphi} \qquad (3.5)$$

Если передний угол $\gamma \neq 0$ и угол наклона режущего лезвия $\lambda \neq 0$, то формулы 4 и 5 принимают вид

$$a = \frac{S\sin\varphi}{\cos\gamma}; \quad b = \frac{t}{\sin\varphi\cos\lambda} \qquad (3.6)$$

Как видно из приведенных формул и рис.3.1,б, при одних и тех же глубине резания (t) и подаче (S) форма и физические размеры срезаемого слоя в зависимости от величины угла φ и формы режущего лезвия могут быть различными. С увеличением главного угла в плане φ толщина среза *a* увеличивается, а ширина среза b уменьшается. Если режущее лезвие имеет криволинейную форму, то очевидно, что толщина срезаемого слоя *a* в разных точках режущего лезвия будет неодинаковой.

За время одного полного оборота заготовки резец срезает площадь металла, называемую номинальной площадью поперечного сечения срезаемого слоя. Площадь поперечного сечения срезаемого слоя для резцов с прямолинейным режущим лезвием определяется из формулы:

$$f_1 = ab = tS \text{ mm}^2 \qquad (3.7)$$

Действительное сечение срезаемого слоя будет меньше номинального на величину осевого сечения гребешков, остающихся на обработанной поверхности. Таким образом, после резания на обработанной поверхности остаются микронеровности, являющиеся следом вершины резца. С увеличением подачи, глубины резания и углов φ и φ_1 высота микронеровностей увеличивается, т.е. шероховатость обработанной поверхности повышается.

3.2. Процесс стружкообразования

Процесс резания можно рассматривать как процесс сжатия, последующего сдвига металла резцом и образования стружки. Слой металла, подлежащий срезанию, находится в сложно деформированном состоянии. Упругим и пластическим деформациям подвергаются также близлежащие объемы металла, расположенные впереди резца и под ним.

По классификации русского ученого проф. И.А.Тиме, при обработке резанием различных материалов образуются следующие основные виды стружки: элементная, суставчатая, сливная и надлома. Элементную, суставчатую и сливную стружку называют стружками сдвига, так как их образование связано с напряжениями сдвига. Стружку надлома иногда называют стружкой отрыва, так как ее образование связано с растягивающими напряжениями.

Рис.3.2. Типы стружек, образующихся при резании пластичных и хрупких материалов

Элементная стружка (рис.3.2,а) состоит из отдельных элементов 1 приблизительно одинаковой формы, не связанных или слабо связанных друг с другом. Границу ОА, отделяющую образовавшийся элемент стружки от срезаемого слоя, называют поверхностью скалывания.

Физически она представляет собой поверхность, по которой в процессе резания периодически происходит разрушение срезаемого слоя. У суставчатой стружки (рис.3.2,б) разделение ее на отдельные части не происходит. Поверхность скалывания только наметилась, но она не пронизывает стружку по всей толщине. Поэтому стружка состоит как бы из отдельных суставов 1 без нарушения связи между ними.

Основным признаком сливной стружки (рис.3.2,б) является то, что она сплошная. Если на пути движения сливной стружки нет никаких препятствий, то она сходит непрерывной лентой, завиваясь в плоскую или винтовую спираль, пока часть стружки не отламывается под действием собственного веса. Поверхность 1 стружки, прилегающую к передней поверхности инструмента, называют контактной стороной. Она сравнительно гладкая, а при высоких скоростях резания отполирована в результате трения о переднюю поверхность инструмента. Ее противоположную поверхность 2 называют свободной стороной стружки. Она покрыта мелкими зазубринками - насечкой и при высоких скоростях резания имеет бархатистый вид. Стружка соприкасается с передней поверхностью инструмента в пределах площадки контакта. В зависимости от рода и свойств обрабатываемого материала и скорости резания ширина площадки контакта в 1,5-6 раз больше толщины срезаемого слоя. Стружка надлома (рис.3.2,г) состоит из отдельных, не связанных друг с другом кусочков различной формы и размеров. Образованию стружки надлома сопутствует мелкая металлическая пыль.

Тип стружки во многом зависит от рода и механических свойств обрабатываемого материала. При резании пластичных материалов возможно образование первых трех типов стружки. По мере увеличения твердости и прочности обрабатываемого материала сливная стружка переходит в суставчатую, а затем в элементную. При обработке хрупких материалов образуется или элементная стружка, или стружка надлома. С повышением твердости материала элементная стружка переходит в стружку надлома.

Из геометрических параметров инструмента наиболее сильно на тип стружки влияет передний угол и угол наклона главного лезвия. При обработке пластичных материалов влияние углов γ и λ принципиально одинаково. По мере увеличения этих углов элементная стружка переходит в суставчатую, а затем в сливную. При резании хрупких материалов при больших передних углах может образовываться стружка надлома, которая по мере уменьшения переднего угла переходит в элементную. При увеличении угла наклона главного лезвия стружка постепенно переходит в элементную стружку.

На тип стружки оказывает влияние подача и скорость резания. Глубина

резания на тип стружки практически не влияет. Увеличение подачи приводит при резании пластичных материалов к последовательному переходу от сливной стружки к суставчатой и элементной. При резании хрупких материалов с увеличением подачи элементная стружка переходит в стружку надлома.

Наиболее сложно на тип стружки влияет скорость резания. При резании пластичных материалов, если исключить зону скоростей резания, при которых образуется нарост, по мере увеличения скорости резания стружка из элементной становится суставчатой, а затем сливной. Однако при обработке некоторых жаропрочных сталей и сплавов, титановых сплавов повышение скорости резания, наоборот, превращает сливную стружку в элементную. Физическая причина этого явления еще не выяснена. Повышение скорости резания при обработке хрупких материалов сопровождается переходом стружки надлома в элементную стружку с уменьшением размеров отдельных элементов и упрочнением связи между ними.

Режущее лезвие при внедрении контактирует с обрабатываемым материалом по передней и задней поверхностям (рис. 3.3).

Режущий клин инструмента через площадку контакта шириной С дей-

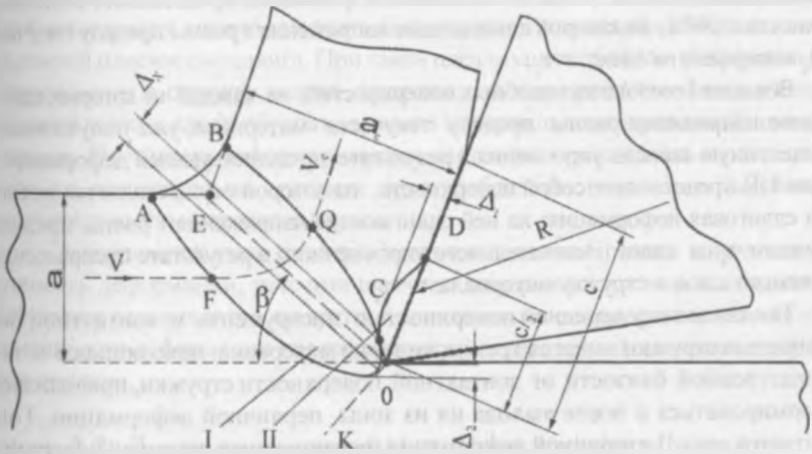


Рис.3.3. Зоны первичной и вторичной деформаций при превращении срезаемого слоя в стружку.

ствует на срезаемый слой толщиной *a*. Сосредоточенная сила R, с которой передняя поверхность инструмента давит на срезаемый слой, получила название силы стружкообразования. Линией ОК обозначена нейтральная линия, разграничивающая области сжимающих и растягивающих напряжений в обрабатываемом материале ниже поверхности резания. Левее нейтральной линии расположена область сжимающих напряжений, а правее-растягивающих

Перед передней поверхностью инструмента расположена зона I пер-

вичной деформации. Зона OABCO первичной деформации имеет форму клина с вершиной на лезвии инструмента. Ее нижняя граница OA - вогнута и пересекает продолжение поверхности резания. Верхняя граница OB зоны - выпукла и ее длина в 2-4 раза меньше длины линии OA. Линия AB плавно сопрягает предыдущую поверхность резания со свободной стороной стружки. Левее линии OA находятся еще недеформированные зерна материала срезаемого слоя, а правее линии OB- зерна материала, принадлежащие стружке. Зерно срезаемого слоя, перемещающееся относительно инструмента со скоростью резания v, начинает деформироваться в точке F и, проходя по траектории своего движения, получает все большую степень деформации. Деформация зерна заканчивается в точке Q, где зерно приобретает скорость v_c, равную скорости стружки.

Многочисленные эксперименты показывают, что ширина стружки по сравнению с шириной срезаемого слоя даже при свободном резании увеличивается незначительно; при несвободном резании уширение стружки еще меньше. Поэтому можно считать, что деформированное состояние в зоне стружкообразования является плоским и срезаемый слой в процессе резания претерпевает деформацию сдвига. На основании этого линия OA физически представляет собой поверхность сдвига, на которой сдвигающие напряжения τ равны пределу текучести τ_s материала на сдвиг: $\tau=\tau_s$.

Вся зона I состоит из подобных поверхностей, на каждой из которых сдвигающие напряжения равны пределу текучести материала, уже получившего определенную степень упрочнения в результате предшествующей деформации. Линия OB представляет собой поверхность, на которой осуществляется последняя сдвиговая деформация; на ней сдвигающие напряжения τ равны пределу текучести τ_s на сдвиг окончательного упрочненного в результате превращения срезаемого слоя в стружку материала: $\tau = \tau_s$.

Так как между передней поверхностью инструмента и контактной поверхностью стружки имеется трение, то зерна материала, находящиеся в непосредственной близости от контактной поверхности стружки, продолжают деформироваться и после выхода их из зоны первичной деформации. Так, образуется зона II вторичной деформации, ограниченная передней поверхностью и линией CD. Ширина OD зоны вторичной деформации, приблизительно, равна половине ширины площадки контакта C/2, а максимальная высота в среднем составляет 0,1 толщины стружки. Степень деформации в зоне II может в 20 раз и более превышать среднюю деформацию стружки. Наличие зоны вторичной деформации приводит к неоднородности конечной деформации стружки по ее толщине. На большей части толщины стружки степень деформации зерен одинакова, а в слое толщиной Δ_1 наблюдается резкое увеличение степени деформации. Размеры зоны вторичной деформации и степень деформации зерен материала в этой зоне определяется интенсивностью трения на передней поверхности.

Чем меньше сила трения на передней поверхности, тем меньше размеры зоны вторичной деформации и интенсивность деформации. При уменьшении толщины срезаемого слоя, увеличении переднего угла и применении хорошо смазывающих жидкостей размеры зоны II уменьшаются и она становится исчезающе малой. В этом случае степень деформации зерен стружки по ее толщине практически одинакова.

Сложность физических процессов, происходящих в зонах первичной и вторичной деформаций, не позволяет дать простых математических методов их количественного описания. Поэтому при инженерных расчетах реальный процесс стружкообразования заменяют его упрощенной моделью. Правомерность использования упрощенной модели связана со следующими обстоятельствами. Зона первичной деформации по своей толщине соизмерима с толщиной срезаемого слоя только при малых передних углах инструмента, больших толщинах срезаемого слоя и скоростях резания, применяемых в производственных условиях, протяженность FQ зоны первичной деформации резко уменьшается, ее границы OA и OB сдвигаются, приближаясь к некоторой линии OE, наклоненной к поверхности резания под углом β. Это позволяет считать, что сдвиговые деформации локализуются в очень тонком слое Δ_x, а семейство поверхностей скольжения можно заменить единственной плоскостью OE, называемой условной плоскостью сдвига. При такой идеализации процесс превращения срезаемого слоя в стружку можно представлять как процесс последовательных сдвигов тонких слоев обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига. Поскольку деформированное состояние практически является плоским, то, следовательно, процесс стружкообразования должен подчиняться закономерностям простого сдвига.

Экспериментальная проверка подтверждает это. Средняя конечная интенсивность деформации, рассчитанная по измерению размеров искажений в результате резания ячеек квадратной делительной сетки, мало отличается от интенсивности деформации простого сдвига, определенной на основании размеров стружки.

3.3. Дислокационный механизм процесса резания

Дислокационный механизм пластической деформации и разрушения основан на преимущественном влиянии линейных дефектов кристаллического строения - дислокаций на поведение материала под нагрузкой.

Работа на преодоление сопротивления деформируемого материала - работа пластической деформации - составляет 90% и более от энергетических затрат на резание. Процесс пластической деформации, порождая в большом количестве дислокации, вакансии, дислоцированные атомы и другие дефекты кристаллического строения, интенсифицирует процессы диффузии и адгезии в контакте инструментального и обрабатываемого материалов. Пластическая деформация является основным источником тепла, выделяющегося в зоне обработки

и оказывающего дополнительное воздействие на сопутствующие физико-химические явления.

Различные стадии эволюции дислокаций в процессе пластической деформации и разрушения непосредственно связаны с зарождением новых дислокаций, их движением, взаимодействием и торможением на препятствиях. Характер дислокационной структуры определяется многими факторами: температурой, способом, степенью пластической деформации, типом кристаллической решетки, величиной энергии, дефектов упаковки, наличием примесей и др. Поэтому дислокационный анализ резания должен учитывать указанные факторы, оценка которых для реальных условий обработки достаточно затруднительна.

К настоящему времени разработаны и применяются различные методы прямого наблюдения дислокаций. Наиболее распространенные методы, используемые для изучения дислокаций при резании материалов - это избирательное травление, декорирование, рентгеновские методы и электронная микроскопия.

Избирательное травление. Атомы в ядре дислокаций обладают высокой свободной энергией. Поэтому в месте выхода дислокационных линий на поверхность кристалла при действии специально подобранного травителя формируются ямки или фигуры травления.

С помощью метода избирательного травления можно определить вид дислокаций, подсчитать их плотность, изучать характер расположения выходов дислокаций на поверхность.

Декорирование дислокаций. Эффект избирательного травления значительно усиливается, когда дислокации декорированы. Метод декорирования состоит в том, что в процессе нагрева металла и выдержки при определенной температуре вдоль линий дислокаций выделяются маленькие, но видимые частицы. Термическая обработка нужна, в основном, для обеспечения миграции декорирующих агентов к дислокации. В сплавах на основе железа, например, наиболее легко диффундируют атомы углерода и азота.

Возможность исследования не только плотности, но и картины распределения дислокаций в микроструктуре делает этот метод особенно важным для изучения процессов в металлах, связанных с движением дислокаций.

Рентгеновские методы. Для исследования несовершенств строения кристаллов используется явление дифракций рентгеновских лучей. Рентгеновские лучи, проходящие через тонкий кристалл вблизи дислокации, будут меньше поглощаться по сравнению с лучами, которые проходят через совершенный по своему строению кристалл. В результате малые угловые отклонения или небольшая разница в параметре решетки соседних кристаллических блоков выявляется как тонкая структура дифракционных пятен, на которых будут различимы плоские проекции дислокаций. Основным недостатком рентгеновских методов является их низкое разрешение, которое составляет 2-5 мкм. С их помощью можно изучать только сравнительно совершенные кристаллы.

Метод электронной микроскопии. Наиболее прямым и универсальным методом прямого наблюдения дислокаций считается просвечивающая или трансмиссионная электронная микроскопия, исследующая тонкие фольги толщиной в несколько сотен ангстрем, прозрачной для электронов.

Электронный пучок, проходя через кристалл, будет отклоняться любой кристаллографической плоскостью, имеющей правильную ориентацию. Если имеются участки кристалла, где атомы смещены от их правильных кристаллографических положений, то дифракционная способность этих областей будет отличаться от дифракционной способности совершенного кристалла. В результате, дислокации становятся видимыми в виде темной линии шириной около 100 $_{A}$.

Для исследования явлений на поверхности деформируемого материала используются электронно-микроскопические изображения, получаемые с помощью реплик. С этой целью на предварительно полированный образец напыляют в вакууме уголь или окись кремния. Чтобы напыленный слой лучше отделялся от кристалла, его скрепляют легкорастворимым лаком. Затем после отделения для повышения контраста на реплику еще напыляют при наклонном падении какой-либо тяжелый металл, например, палладий. Метод позволяет наблюдать линии скольжения и их развитие на различных стадиях пластической деформации.

Прямое наблюдение дислокационной структуры пластически деформируемой зоны резания различных конструкционных сталей и сплавов дает основание сделать вывод, что неоднородный характер пластического течения металлов проявляется на атомном уровне и является следствием статической природы размножения, движения и взаимодействия дефектов кристаллической структуры. Пластическая деформация металлов протекает как процесс размножения и кооперированного направленного движения дислокаций в полосах скольжения. Полоса скольжения - это, по существу, область материала с повышенной плотностью дислокаций. Ориентация полос скольжения, их длина, ширина и плотность свидетельствуют о кристаллографической ориентации плоскостей скольжения в обрабатываемом материале, характере протекания и степени пластической деформации и упрочнения.

Для деформации жаропрочных сплавов при резании характерны тонкие полосы скольжения. При декорировании структуры ширина полос скольжения составляет 0,1-0,6 мкм, что соизмеримо с размерами декорирующих частиц.

Полосы скольжения, являются основным элементом тонкой структуры, которая формируется при различных процессах обработки сталей и сплавов как в поверхностном слое, так и в стружке. Полоса скольжения представляет собой локальную высокодеформированную область материала, которая граничит с областями, испытавшими только упругую деформацию. При увеличении плотности полос скольжения и их расширении пластическая деформация приобретает все более гомогенный характер.

Развитие тонкой структуры зоны пластической деформации при резании связана с различными стадиями деформационного упрочнения. Каждая стадия упрочнения зависит от уровня действующей нагрузки, скорости и времени деформирования и многих других факторов. В зоне резания с удалением от поверхностей раздела нагрузка уменьшается от максимальной на поверхности, где материал уже прошел стадию разрушения, до минимальной на глубине, где деформации нет. Микроструктурным признаком начала пластической деформации является развитие полос скольжения, однородно расположенных на поверхности металла. В этот период пластической деформации скольжение развивается только по одной системе скольжения. Обнаруживается неодновременность начала пластического течения в различных зернах. Дальнейшее увеличение нагрузки на обрабатываемый материал способствует зарождению новых полос скольжения. При степени деформации 0,8% пластическая деформация развивается по двум системам скольжения, при степени деформации 5% - по двум-четырем системам скольжения.

Полосы скольжения, в основном, начинаются из источников дислокаций, расположенных на поверхностях раздела обрабатываемого материала или в приповерхностном слое, т.е. там, где нагрузка достигает максимальной величины. При движении в полосах скольжения дислокации встречают препятствия. Преодолевая барьеры и продвигаясь дальше, дислокации обеспечивают дальнейшее развитие пластической деформации. Остановка дислокации у препятствия является одной из причин упрочнения обрабатываемого материала. Препятствиями для движения дислокаций в многофазных материалах являются дисперсные выделения упрочняющих фаз, примесные атомы, дислокации исходной структуры и др.

Препятствием для развития полос скольжения являются границы сильно разориентированных зерен - так называемые высокоугловые границы.

Наряду с механизмом скольжения стали и сплавы могут пластически деформироваться с помощью механизмов двойникования и зернограничного проскальзывания, характерных для деформации поликристаллических материалов. Соотношение механизмов деформирования и их вклад в общую деформацию материала зависят от исходной структуры и условий обработки.

Стружкообразование, как и любое разрушение, сопровождается тремя типами пластической деформации. Предшествующая деформация, упрочняя металл впереди резца, генерирует большое количество дефектов кристаллического строения и создает фон для последующего разрушения. Сопутствующая деформация протекает одновременно с ростом трещины, разделяющей материал на две части. Процесс формирования поверхностей раздела завершается пластической деформацией при контактировании соответственно с передней и задней поверхностями инструмента. Все три типа пластической деформации взаимообусловлены и протекают одновременно.

Статистический анализ большого количества полос скольжения в различных сечениях пластически деформируемой зоны показывает, что пластическая деформация при резании является процессом эволюционным: она сопровождается прогрессирующим накоплением дислокаций и изменением субструктуры материала обрабатываемой детали на всем протяжении деформирования (рис.3.4). Плотность дислокаций, а следовательно, и степень деформации в зоне стружкообразования возрастает постоянно, начиная от внешней границы пластически деформируемой зоны и вплоть до завершения контакта резца с металлом.

При внедрении режущего лезвия на поверхностных источниках материала в непосредственной близости от режущего лезвия начинают интенсивно зарождаться полосы скольжения. Статистическая независимость расстояний между соседними полосами скольжения означает независимость срабатывания источников дислокаций, каждый из которых дает начало отдельной полосе скольжения, а также независимость их развития. Вновь образовавшиеся дислокации, а также дислокации, которые имелись в материале, начинают перемещаться под действием градиента напряжений в тех плоскостях скольжения, где величина касательной составляющей напряжения превысит предел текучести. Действующие плоскости скольжения ориентированы относительно режущего клина различным образом, и дислокации по этим плоскостям в различных направлениях будут удаляться от режущего лезвия в глубь деформируемого металла. Такое движение можно условно рассматривать как веерообразное перемещение дислокаций от поверхности контакта инструмента с материалом в направлении внешней границы, пластически деформируемой зоны и наружной поверхности срезаемого слоя.

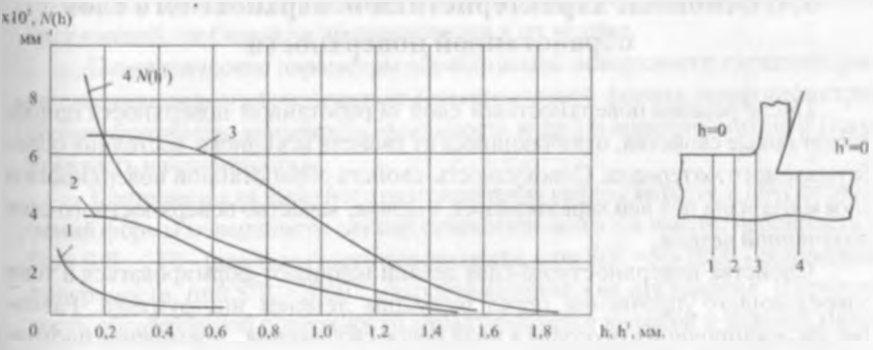


Рис 3 4 Плотность полос скольжения в пластически деформированной зоне при свободном резании. Сплав ХН77ТЮР - резец ВК8 [10].

За время деформирования, которое в обычных условиях резания составляет 10^{-2}-10^{-3}с дислокации, лидирующие в головной части полосы скольжения успевают переместиться на достаточно большое расстояние от режущего лезвия. Положение этих дислокаций определяет конфигурацию, размеры пластически деформированной зоны. Чем выше скорость резания, тем меньше объем металла участвует в пластической деформации, так как скорость распространения полос скольжения растет относительно медленнее, чем скорость резания. Для легированных сталей и сплавов скорость распространения полос скольжения достигает 70 см/с. Следовательно, дислокации при резании тормозятся, в основном, на локальных препятствиях - дисперных выделениях упрочняющих фаз, отдельных примесных атомах или их сегрегациях. Для преодоления препятствий необходимо увеличение нагрузки. В материале обрабатываемой заготовки, содержащем повышенное количество препятствий движению дислокаций, размеры пластически деформируемой зоны будут меньше, а сопротивление резанию больше.

Когда плотность дислокаций в металле в непосредственной близости от режущего лезвия достигает критической величины, происходит его разрушение. Срезаемый слой начинает перемещаться вдоль передней поверхности инструмента, продолжая деформироваться в результате размножения и скольжения дислокаций и испытывая дополнительно деформацию сдвига. В поверхностном слое стружки наблюдаются дополнительные изменения в текстуре деформации и увеличивается степень деформации на поверхности, что приводит к неоднородному упрочнению стружки по сечению и создает предпосылки для ее завивания.

3.4. Основные характеристики поверхностного слоя обработанной поверхности

После резания поверхностный слой обработанной поверхности приобретает новые свойства, отличающиеся от свойств исходного состояния обрабатываемого материала. Совокупность свойств обработанной поверхности и слоя материала под ней характеризует, в целом, качество поверхностного слоя полученной детали.

Свойства поверхностного слоя детали начинают формироваться в зоне опережающего упрочнения перед режущим лезвием инструмента. Развитие дислокационной структуры в виде полос скольжения, повышение плотности дислокаций приводит к упрочнению поверхностного слоя (наклепу), к увеличению его твердости. В результате трения и вторичной деформации при контактировании с задней поверхностью инструмента несколько возрастают глубина упрочнения и плотность дислокаций в поверхностном слое. Из теории дислокаций следует, что напряжение деформирования при различных

механизмах упрочнения пропорционально квадратному корню из плотности дислокаций. Соответственно твердость упрочненного металла HV и степень наклепа U могут быть непосредственно связаны с плотностью дислокаций:

$$HV = \frac{Gb}{K}\sqrt{\rho}\ ; \qquad (3.8)$$

$$U = \frac{HV - HV_{исх}}{HV_{исх}} = \frac{K_{исх}}{K}\sqrt{\frac{\rho}{\rho_{исх}}} - 1\ , \qquad (3.9)$$

где G - модуль сдвига, b - вектор Бюргерса, K и $K_{исх}$ - соответственно коэффициенты связи для упрочненного и неупрочненного материалов.

Зарождение и движение дислокаций приводит также к интенсивному теплообразованию в результате рассеяния энергии движущихся дислокаций. Нагрев деформированного металла до температуры 0,2-0,3 температуры плавления вызывает в нем возврат (отдых, полигонизацию), а до температуры более 0,4 температуры плавления возможны рекристаллизация с частичным или полным разупрочнением поверхностного слоя.

3.5. Качество обработанной поверхности

Надежность работы деталей и узлов машин, в основном, зависит от качества обработанных поверхностей. В понятие качества поверхности входит целый ряд характеристик, определяющих, с одной стороны, геометрические параметры реальной поверхности, а с другой - ее физико-механические свойства.

Физико-механические свойства поверхностного слоя характеризуются глубиной и степенью упрочнения (наклепа), а также значениями остаточных напряжений, глубиной их проникновения и их знаком.

Геометрические параметры обработанной поверхности характеризуются следующими отклонениями от геометрической формы: макрогеометрией (бочкообразность, конусность, овальность и др.) и микрогеометрией (шероховатость и волнистость).

Критерием для условного разграничения шероховатости и других отклонений формы поверхности служит отношение шага S к высоте неровности R_z. При $S/R_z < 50$ - шероховатость поверхности, при S/R_z=50-1000 - волнистость поверхности, при S/R_z>1000 - макрогеометрические отклонения. Шероховатость обработанной поверхности характеризуется высотой и формой микронеровностей. Действительные неровности или просто неровности - это те неровности, которые образовались на обработанной поверхности после прохода режущего инструмента. Высота неровностей аналитическому расчету не поддается. Ее можно измерить приборами, называемыми профилометрами и профилографами. Профилометры дают визуальный отсчет высоты неровнос-

тей, а профилографы в определенном масштабе вычерчивают микропрофиль поверхности.

Расчетный микропрофиль обработанной поверхности при точении (а) и фрезеровании цилиндрическими фрезами (б) показан на рис.3.5.

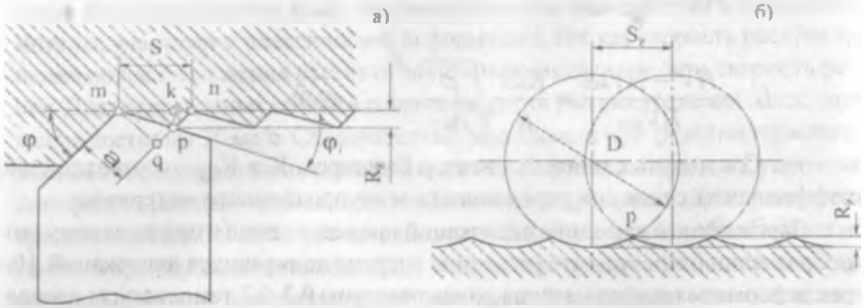


Рис. 3 5. Расчетный микропрофиль обработанной поверхности при точении и фрезеровании цилиндрическими фрезами

При точении высота расчетных неровностей R_z равна высоте РК треугольника mnp:

$$R_z = mn\sin\varphi_1,$$

$$mn = \frac{mq}{\sin mpq} = \frac{\alpha}{\sin(\varphi+\varphi_1)} = \frac{S\sin\varphi}{\sin(\varphi+\varphi_1)}$$

или $$R_z = \frac{S\sin\varphi\sin\varphi_1}{\sin(\varphi+\varphi_1)}$$

Данную формулу можно использовать для расчета R_z при растачивании, сверлении, зенкеровании, строгании и фрезеровании торцовыми фрезами.

При фрезеровании высота расчетных неровностей определяется положением точки p пересечения двух окружностей, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном подаче S_z на зуб фрезы:

$R_z = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{S_z^2}{4}}$, выражение упрощается, так как

$\frac{S_z^2}{4} = R_z D - R_z^2$ и $R_z^2 \le R_z D$, пренебрегая членом R^2_z,

получим $R_z \approx \frac{S_z^2}{4D}$.

Расчетные неровности при точении уменьшаются при уменьшении подачи, углов в плане и увеличении радиуса переходного лезвия.

Реальные неровности по форме и высоте отличаются от расчетных. Это вызвано следующими причинами:

1) пластическим течением материала из зоны первичной деформации в сторону вершин микронеровностей: чем больше степень деформации срезаемого слоя, тем больше интенсивность пластического течения в сторону уже обработанного следа на микропрофиле и тем больше высота неровностей; 2) колебаниями детали и инструмента во время обработки; 3) трением задних поверхностей инструмента о поверхность резания; 4) неровностями лезвий инструмента, которые возрастают по мере его изнашивания. Если материал склонен к наростообразованию, то в зоне скоростей резания, при которых нарост получает максимальное развитие, высота неровностей дополнительно увеличивается за счет роста и разрушения нароста.

На высоту неровностей оказывают влияние те же факторы, что и на высоту расчетных неровностей. При уменьшении подачи, углов в плане инструмента и увеличении радиуса переходного лезвия высота неровностей уменьшается.

Помимо этих факторов на высоту неровностей влияют все те, которые изменяют объем пластического деформирования материала и условия трения на контактных поверхностях инструмента. К ним относятся механические свойства обрабатываемого материала, скорость резания и свойства применяемой смазочно-охлаждающей среды. Глубина резания и передний угол инструмента на высоту неровностей значительного влияния не оказывает. С повышением твердости и прочности обрабатываемого материала и снижением его пластичности объем пластической деформации уменьшается, и это приводит к уменьшению высоты неровностей.

Влияние скорости резания на высоту неровностей находится в зависимости от склонности обрабатываемого материала к наростообразованию. Если материал не склонен к наростообразованию, то с увеличением скорости резания высота неровностей непрерывно уменьшается. Это объясняется уменьшением объема пластической деформации и среднего коэффициента трения. Если материал склонен к наростообразованию, то высота неровностей находится в прямой зависимости от высоты нароста. При увеличении скорости резания от v_1 до v_2 высота нароста растет, соответственно растет высота неровностей, достигая максимума при наибольшем развитии нароста. При скоростях больших v_2 уменьшается и высота нароста, и высота неровностей.

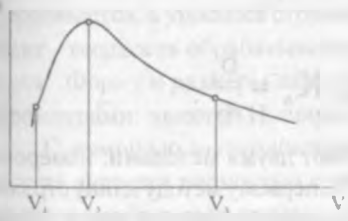


Рис. 3.6. Схема влияния скорости резания на высоту неровностей при обработке материала, склонного к наростообразованию.

Применение смазочно-охлаждающей технологической среды уменьшает высоту неровностей. При этом следует отметить, что с увеличением скорости резания действие среды ослабевает, а различие во влиянии различных сред уменьшается.

3.6. Усадка стружки

Усадка стружки является внешним проявлением процесса деформирования. Усадкой называют изменение линейных размеров срезаемого слоя после превращения его в стружку (рис.3.7.).

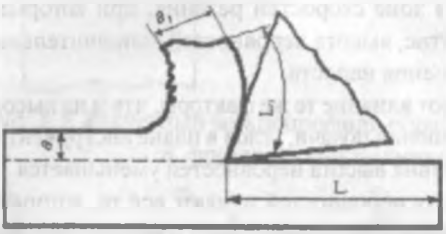


Рис. 3.7. Схема к определению усадки стружки

Опыт показывает, что длина стружки L_1 получается меньше пути L, пройденного резцом, а толщина стружки a_1 больше толщины срезаемого слоя a. Ширина стружки b_1 мало отличается от ширины срезаемого слоя b (хотя тоже несколько увеличивается). Практически объем деформируемого элемента принимается неизменным, в результате получается $abL = a_1 b_1 L_1$; откуда

$$\frac{L}{L_1} = \frac{f_1}{f} = \frac{a_1 b_1}{ab} = K \qquad (3.10)$$

где f и f_1 - соответственно площади сечений срезаемого слоя;

K - коэффициент усадки стружки.

Степень изменения размеров стружки по сравнению со срезаемым слоем характеризуют тремя коэффициентами:

коэффициентом усадки или укорочения $K_L = \frac{L}{L_1}$, коэффициентом утолщения $K = \frac{a_1}{a}$ и коэффициентом уширения $K_b = \frac{b_1}{b}$.

Коэффициент усадки стружки определяют двумя методами: измерением длины стружки и взвешиванием стружки. По первому методу длину стружки ограничивают разделением длины срезаемого слоя на отдельные части. В опы-

тах при точении на заготовке делают один или несколько пазов и фиксируют расстояние между ними. При прохождении лезвия резца через паз процесс резания прерывается. Стружку собирают и измеряют ее длину по контактной стороне.

По второму методу площадь поперечного сечения $f_1 = a_1 b_1$ можно определить взвешиванием кусочков стружки. Если вес стружки в мг обозначить через G, а плотность в г/см³ через g, то $G = \frac{a_1 b_1 L_1 g}{10^3}$ (3.11)

Коэффициент усадки стружки $K_L = \frac{G10^3}{L_1 g a b}$

При точении ab = St, и следовательно,

$$K_L = \frac{G10^3}{L_1 g S t} \qquad (3.12)$$

На коэффициент усадки стружки основное влияние оказывают обрабатываемый материал, передний угол инструмента, толщина срезаемого слоя, скорость резания и применяемая смазочно-охлаждающая технологическая среда.

3.7. Наростообразование

При резании большинства конструкционных материалов при определенных условиях на резце образуется нарост. Под наростом понимают клиновидную, более или менее неподвижную область материала обрабатываемой заготовки, расположенную у лезвия инструмента перед его передней поверхностью (рис.3.8).

При образовании сливной стружки, при определенных условиях нарост может достаточно прочно присоединиться к передней поверхности, оставаясь на ней и после прекращения резания. При прерывистом резании и при образовании элементной стружки нарост на передней поверхности не удерживается, а уносится стружкой. Твердость нароста в 2,5-3 раза превосходит твердость обрабатываемого материала, из которого нарост образовался. Форму и размеры нароста можно характеризовать тремя основными параметрами: высотой H, шириной основания l и углом γ_p.

С помощью высокочастотной киносъемки было установлено, что нарост не является полностью стабильным телом, а постоянно и чрезвычайно быстро изменяет свои размеры. В сотые доли секунды нарост возникает, уве-

личивает свою высоту до максимальной, а затем частично или полностью разрушается. Частота возникновения и срывов нароста растет с увеличением скорости резания и при v = 40-60 м/мин составляет 3000-4000 циклов в минуту.

В нароста можно различить две зоны: зону 1, где скорость движения материала изменяется от нуля до скорости движения стружки, и зону 2, где материал полностью неподвижен. Вследствие клиновидной формы и твердости, более высокой, чем твердость обрабатываемого материала, нарост какое-то время выполняет функции режущего лезвия и образующаяся стружка вначале перемещается не по передней поверхности резца, а по наросту. Из-за того, что вершина нароста свешивается за лезвие резца, действительная толщина срезаемого слоя становится больше номинальной на величину Δa.

На размеры нароста основное влияние оказывают свойства обрабатываемого материала, скорость резания, толщина срезаемого слоя, передний угол и смазочно-охлаждающая технологическая среда.

Все материалы можно разделить на материалы, не склонные к наростообразованию и склонные к наростообразованию. К первым можно отнести медь, латунь, бронзу, олово, свинец, титановые сплавы, белый чугун, закаленные стали, легированные стали с большим содержанием хрома и никеля. Ко вторым можно отнести конструкционные, углеродистые и большинство легированных сталей, серый чугун, алюминий, силумин.

В обобщенном виде влияние скорости резания на размеры нароста и коэффициент усадки стружки представлено на рис. 3.8.

Кривая I соответствует резанию материалов, не склонных к наростообразованию. В этом случае по мере увеличения скорости резания коэффициент усадки стружки вначале быстро, а затем более медленно уменьшается. Указанное влияние скорости резания на коэффициент усадки стружки объясняется уменьшением коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью при увеличении температуры на передней поверхности с возрастанием скорости резания.

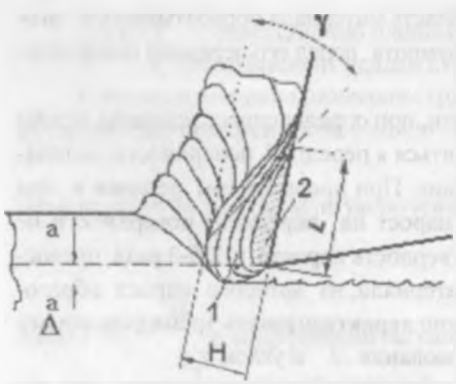


Рис. 3.8 Схема строения нароста

При резании материалов, склонных к наростообразованию (кривая 2), скорость резания влияет на коэффициент усадки стружки немонотонно. Вначале при увеличении скорости резания коэффициент усадки уменьшается, достигает минимальной величины (скорость v_2), а затем вновь возрастает. При достижении скорости резания значения v_1 возрастание коэффициента K_1 пре-

крашается и при скоростях резания $v>v_3$ кривая 2 аналогична кривой 1. Уменьшение коэффициента K_L при увеличении скорости резания от v_1 до v_2 и его дальнейшее увеличение при возрастании скорости резания от v_2 до v_3 связано с действием на процесс стружкообразования нароста.

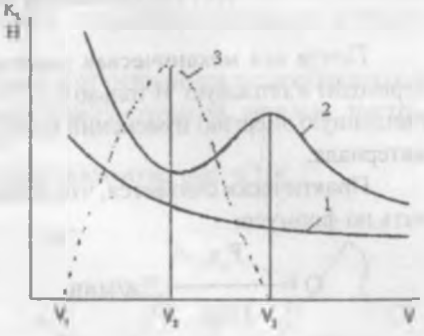


Рис. 3.8. Схема влияния скорости резания на высоту нароста (3) и коэффициент усадки стружки (1, 2)

Возрастание скорости резания от v_1 до v_2 сопровождается увеличением переднего угла инструмента, вследствие чего степень деформации срезаемого слоя уменьшается. При скорости резания v_2 действительный передний угол имеет максимальную величину и коэффициент K_L достигает минимума. При возрастании скорости резания от v_2 до v_3 высота нароста уменьшается также, как и величина действительного переднего угла заточки. Это вызывает увеличение коэффициента усадки стружки. При скоростях резания $v>v_3$ нарост отсутствует и скорость резания влияет на коэффициент K_L только через изменение коэффициента трения.

Экспериментально установлено, что при наиболее распространенных условиях резания сталей нарост имеет максимальную высоту при таком значении скорости резания, при которой температура более 300° С. Уменьшение размеров нароста при температурах более 300° С объясняется значительным снижением сопротивления материалов нароста пластическому сдвигу.

Наростообразование существенно влияет на процесс резания: нарост изменяет передний угол, а следственно уменьшает силу резания; меняются условия трения, а следовательно, меняется характер износа режущего лезвия и по передней, и по задней поверхности. Периодические срывы нароста приводят к возникновению вибраций, остающиеся продукты разрушения нароста на обработанной поверхности ухудшают шероховатость.

В практике обработки резанием ведут борьбу с наростообразованием, в особенности при чистовой обработке.

Наростообразование ведет к дестабилизации процесса резания, что крайне нежелательно при обработке на станках с ЧПУ, многооперационных станках, гибких производственных системах.

Глава 4.

Тепловые явления в зоне резания

4.1. Источники образования тепла

Почти вся механическая энергия, затрачиваемая на процесс резания, переходит в тепловую. И только 0,5-3% механической энергии переходит в поглощенную энергию изменений кристаллической решетки обрабатываемого материала.

Практически считается, что общее количество теплоты Q можно определить по формуле:

$$Q = \frac{P_z v}{4190} \text{ Дж/мин}, \qquad (4.1)$$

где Pz - вертикальная составляющая силы резания, Н;

v - скорость резания, м/мин,

1/4190 - тепловой эквивалент работы, Дж.

Принимают, что в процессе резания тепловые потоки происходят под воздействием высококонцентрированных источников энергии, сосредоточенных или распределенных в сравнительно малых объемах.

Процесс распространения теплоты сосредоточенных источников, действующих в той или иной системе твердых тел, математически описывается двумя главными уравнениями: теплового баланса и теплопроводности.

Для процесса резания уравнение теплового баланса может быть представлено в следующем виде:

$$Q_{деф} + Q_{тр} + Q_{тр} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \qquad (4.2)$$

где $Q_{деф}$ - количество теплоты, эквивалентное работе, затраченной на деформирование и разрушение при стружкообразовании и формировании поверхностного слоя;

$Q_{тр}$ - количество теплоты, эквивалентное работе сил трения при контакте передней поверхности лезвия и деформированного материала;

$Q_{тр}$ - количество теплоты, эквивалентное работе сил трения на задней поверхности лезвия при переходе деформированного материала в поверхностный слой детали;

Q_1 - количество теплоты, уходящее в стружку;

Q_2 - количество теплоты, идущее в деталь;

Q_3 - количество теплоты, переходящее в режущий инструмент;

Q_4 - количество теплоты, передающееся окружающей среде.

Источники образования тепла при резании составляют левую часть уравнения 4.2. Первый источник тепла $Q_{сд}$ образуется в зоне наибольших пластических деформаций, т.е. в плоскости скалывания (рис.4.1,а). Второй источник тепла $Q_т$ образуется на передней поверхности режущего инструмента - в пределах площадки контакта между стружкой и инструментом. Третий источник тепла $Q_з$ образуется на задней поверхности - в пределах площадки контакта между поверхностью и инструментом.

Образовавшееся тепло распространяется от источников теплообразования к более холодным областям, распределяясь между стружкой, деталью, инструментом и окружающей средой (рис.4.1.б).

Расположение источников тепла представлено на рис. 4.1.а.

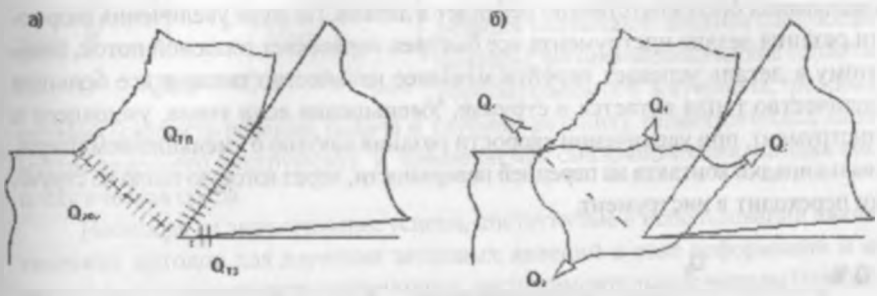


Рис. 4.1. Схема источников образования тепла и движения тепловых потоков

Несомненно, в процессе резания имеет место сложное переплетение маршрутов движения потоков, поскольку теплота от каждого из трех основных источников - деформации, трения на передней и задней поверхностях инструмента - распределяется между всеми телами, участвующими в процессе.

Второе главное уравнение теплопроводности имеет вид дифференциального уравнения теплопроводности: (4.3)

$$\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{1}{c\rho}\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda(\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\right]\right\}+v_x\frac{\partial\theta}{\partial x}+v_y\frac{\partial\theta}{\partial y}+v_z\frac{\partial\theta}{\partial z}$$

где λ - коэффициент теплопроводности;

c - весовая теплоемкость;

r - плотность;

v_x, v_y, v_z - проекции вектора скорости перемещения источника внутри тела на оси X, Y, Z.

Данное уравнение имеет бесчисленное множество решений. Чтобы определить из этого множества именно то решение, которое описывает процесс распространения теплоты в интересующем нас случае, нужно на искомую фун-

кцию θ (x,y,z,i) наложить дополнительные условия - начальные и граничные.

На процентное распределение тепла между стружкой, деталью и инструментом главное влияние оказывают механические и теплофизические свойства материала заготовки и скорости резания (рис.4.2).

Уменьшение доли тепла, переходящего в деталь при увеличении скорости резания, вызвано изменением соотношения между скоростью резания и скоростью распространения тепла из зоны деформации. Из источника теплообразования на плоскости скалывания в деталь распространяется тепловой поток $Q_д$. Скорость распространения тепла зависит от градиента температур на плоскости скалывания и в детали, и температуропроводности обрабатываемого материала. Если скорость резания, т.е. скорость, с которой режущее лезвие инструмента пересекает тепловой поток, мала, то тепло от плоскости скалывания беспрепятственно перейдет в деталь. По мере увеличения скорости резания лезвие инструмента все быстрее пересекает тепловой поток, и поэтому в деталь успевает перейти меньшее количество тепла и все большее количество тепла остается в стружке. Уменьшение доли тепла, уходящего в инструмент, при увеличении скорости резания связано с уменьшением ширины площадки контакта на передней поверхности, через которую тепло из стружки переходит в инструмент.

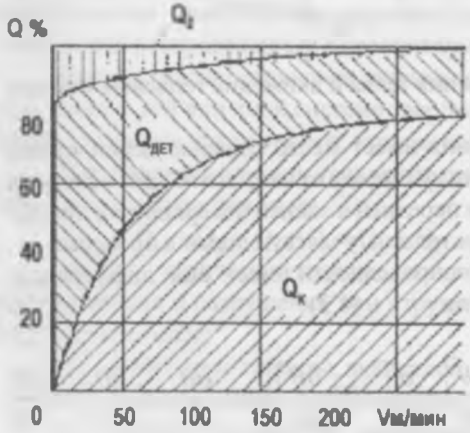


Рис.4.2. Распределение тепла Q между стружкой, инструментом и деталью при точении стали 40Х резцом из твердого сплава Т60К6 (t = 1,5 мм, S=0,12мм/об)

Количество тепла, уходящего в инструмент, очень мала и при резании любых материалов с любыми режимами обработки. Основной причиной низкой интенсивности теплоотвода в инструмент является более низкая теплопроводность инструментального материала. Несмотря на то, что доля тепла, уходящего в инструмент, очень мала, средняя температура на передней поверхности инструмента в несколько раз превосходит среднюю температуру стружки (рис.4.3).

Уменьшение доли тепла, переходящего в деталь при увеличении скорости резания, вызвано изменением соотношения между скоростью резания и скоростью распространения тепла из зоны деформации.

Под температурой резания понимают среднюю температуру на поверхности контакта инструмента со стружкой и поверхностью резания.

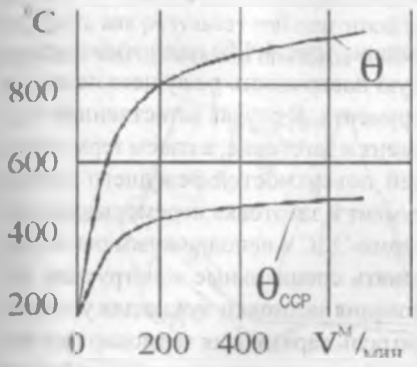


Рис. 4.3. Влияние скорости резания v на температуру резания и среднюю $\theta_{ср}$ температуру стружки при точении стали 40Х резцом из твердого сплава Т60К6 (t=1,5мм; S = 0,12 мм/об)

На величину температуры в зоне резания оказывают влияние следующие факторы: физико-механические свойства обрабатываемого материала, режимы резания (скорость резания, подача и глубина резания), геометрические параметры режущего инструмента и применяемая смазочно-охлаждающая технологическая среда.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые в использовании аналитических методов для изучения тепловых явлений в зоне деформации и на контактных поверхностях инструмента, экспериментальные методы благодаря их простоте и надежности являются главным инструментом исследования.

На практике применяют следующие основные методы определения температуры: калориметрический, сравнительный анализ цветов побежалости стружки и обработанной поверхности, метод термокрасок, методы оптической пирометрии, различные варианты метода термоэлектрической эмиссии.

Калориметрический метод основан на измерении температуры сходящей стружки при помощи калориметра. Метод позволяет определить количество тепла, переходящего в стружку, деталь и инструмент, а также определить среднюю температуру стружки.

Определение средней температуры стружки по цветам побежалости достаточно субъективен и дает значительные погрешности.

Метод термокрасок, применяющийся для определения поверхностной температуры нагретых частей инструмента, прост, нагляден, но дает малую точность.

Наибольшее применение для измерения температуры на контактных поверхностях режущего инструмента и в различных точках контактных площадок получили разнообразные термопары.

Метод искусственной термопары основан на измерении температуры резца около режущего лезвия (рис.4.4,а) с помощью хромель-алюмелевой или хромель-копелевой термопары. В резце от нижнего основания к передней по-

верхности сверлят отверстие диаметром 1-2 мм, которое не доходит до передней поверхности на расстояние 0,2-0,4 мм. В отверстие вставляют термопару. Располагая отверстия в различных точках режущего лезвия по передней и задней поверхностям, можно составить представление о температурном поле в режущем лезвии инструмента.

В методе полуискусственной термопары (рис.4 4,б) один изолированный проводник выводится на исследуемую поверхность режущего лезвия, а вторым проводником является тело инструмента. В случае естественной термопары проводниками являются инструмент и заготовка, а спаем термопары - площадка контакта передней и задней поверхностей режущего лезвия (рис.4.4,в). Так как при обработке инструмент и заготовка перемещаются относительно друг друга, то для передачи термо-ЭДС к неподвижным регистрирующим приборам 1 необходимо применять специальные конструкции токосъемников. Показанная на рис.4.4,в изоляция заготовки нужна для устранения влияния паразитных термопар, однако роль паразитных термопар при высокой температуре контактных поверхностей инструмента незначительна и за счет некоторого снижения точности измерения установку можно упростить, отказавшись от изоляции заготовки, сохранив изоляцию резца.

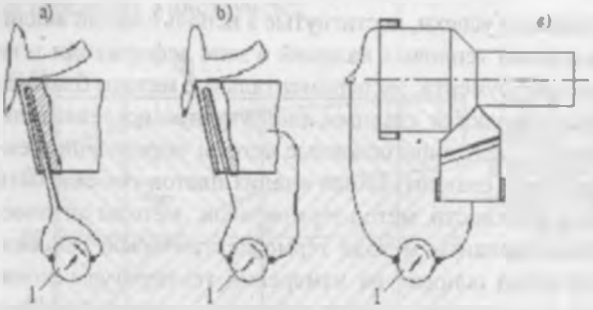


Рис. 4 4. Схема термопар:
а - искусственная,
б - полуискусственная,
в - естественная,
1 - регистрирующий термо-ЭДС прибор.

Для перевода показаний регистрирующего прибора в градусы Цельсия термопара должна быть предварительно подвергнута специальной тарировке.

Методы оптической пирометрии дают возможность получить представление о распределении температур в зоне резания путем регистрации ее теплового излучения. Методы связаны с применением сложных оптических установок или фотоэлектрических датчиков.

Характер распределения температур в резце и обрабатываемом материале или определение температурного поля рассчитывают на основе теории теплообмена в твердых телах с применением ЭВМ и электрического моделирования тепловых явлений.

Построение температурных полей стало возможным благодаря использованию метода источников тепла, позволяющего сравнительно простыми мате-

матическими способами получать приемлемые инженерные решения. Сущность метода источников состоит в том, что температурное поле, возникающее в теплопроводном теле под действием источника тепла любой формы, движущегося или стационарного, действующего временно или непрерывно, можно получать как результат той или иной комбинации температурных полей, возникающих под действием системы точечных мгновенных источников.

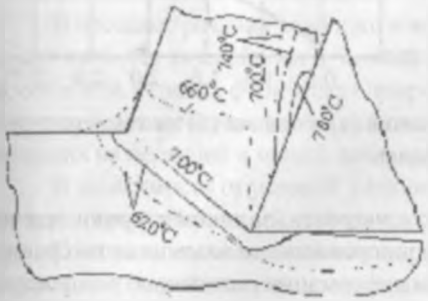


Рис 4.5. Сопоставление температурных полей, полученных экспериментом и расчетом (обрабатываемый материал - сталь, скорость резания v = 23м/мин, толщина среза a = 0,6 мм , углы резца γ = 30°; a = 7°).

Рис.4.5 показывает, что изотермы, полученные экспериментальным путем (использовался метод инфракрасного излучения), согласуются с расчетными.

4.2. Факторы, влияющие на температуру резания

На основании многочисленных экспериментов выведены эмпирические формулы для определения температуры резания. В этих формулах температура резания является функцией многих переменных, характеризующих условия резания:

$\theta = f(C_q, v, t, S, \gamma, \alpha, \varphi)$, где Cq - коэффициент, зависящий от условий обработки и физико-механических свойств материала заготовки и инструмента.

Чем больше работа, затрачиваемая на резание, тем при прочих равных условиях выше и температура резания. С увеличением твердости и прочности обрабатываемого материала температура резания возрастает (рис.4.6).

Большое влияние оказывает также теплопроводность и теплоемкость обрабатываемого материала. Чем выше теплопроводность обрабатываемого материала, тем интенсивнее отвод теплоты в стружку и заготовку, а следовательно, тем меньше нагревается резец. От теплоемкости обрабатываемого материала зависит количество теплоты, воспринимаемой стружкой и заготовкой.

Как видно из рис.4.6а средняя температура стружки при обработке стали значительно выше, чем при обработке чугуна и особенно алюминия, что вызвано как большой работой пластического деформирования, так и работой трения на передней поверхности. Уменьшение количества тепла, уходящего в

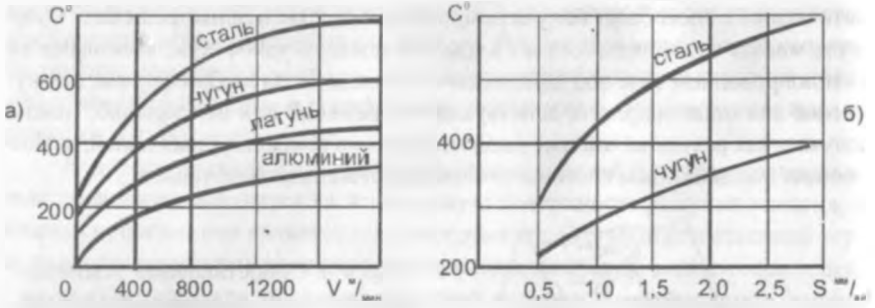


Рис. 4.6 Влияние скорости резания (а) и подачи (б) на температуру резания.

стружку, при обработке чугуна связано с элементным типом стружки при его резание. Вследствие более высокой теплопроводности алюминия по сравнению со сталью и чугуном тепло из зоны деформации интенсивно распространяется в деталь, тем самым резко уменьшая количество тепла, остающегося в стружке.

На основании измерений получена формула, связывающая температуру резания с глубиной, подачей, скоростью резания и главного угла в плане при работе различными инструментами:

$$\theta = C_\theta V^m S^n t^q (\mathrm{Sin}\varphi)^{n-q} \qquad (4.4)$$

Коэффициент C_θ в формуле зависит от рода и механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента и применяемой смазочно-охлаждающей среды. При любых видах обработки величины показателей m, n и q неодинаковы : $m > n > q$, т.е. на температуру резания наибольшее влияние оказывает скорость резания, затем подача, глубина резания и наименьшее - главный угол в плане.

При точении подача и глубина резания на температуру резания влияют с той же интенсивностью, что толщина и ширина срезаемого слоя. Следовательно, для снижения температуры при заданной площади сечения срезаемого слоя необходимо работать с возможно большим отношением t/S. При заданных глубине резания и подаче температуру резания можно уменьшить, уменьшая главный угол в плане резца. Последнее связано с тем, что при уменьшении отношение b/a возрастает. При постоянной мощности тепловых источников температуру резания можно понизить, интенсифицируя отвод тепла в деталь и инструмент. Этого можно достигнуть, охлаждая заготовку, стружку, инструмент струей смазочно-охлаждающей среды.

Глава 5.

Износ и стойкость режущего инструмента

5.1. Износ режущего инструмента

В процессе резания режущий инструмент изнашивается. Износ инструмента является важнейшим и, пожалуй, основным показателем его работоспособности. Однако, физическая природа изнашивания изучена еще недостаточно вследствие исключительной сложности контактных процессов, происходящих на передней и задней поверхностях инструмента.

В зависимости от условий резания видимые признаки износа наблюдаются на передней и задней поверхностях лезвия инструмента (рис.5.1).

Как правило, максимальная ширина площади износа $h_з$ наблюдается на переходной задней поверхности или в месте перехода главного лезвия во вспомогательное. Износ передней поверхности выглядит по-другому. Под действием сходящей стружки на ней образуется лунка износа шириной $l_л$ и глубиной $h_л$. В зависимости от скорости резания, с которой работает инструмент, изменяется расстояние между краем лунки и главным лезвием (фаска f), уменьшающееся по мере развития лунки.

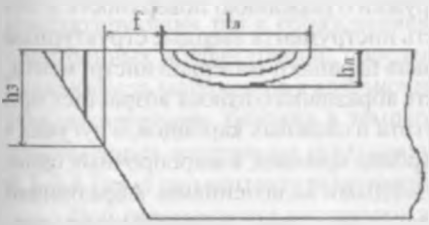


Рис. 5.1. Виды износа резца $l_л$ и $h_л$ - ширина и глубина лунки на передней поверхности, hз - ширина площадки по задней поверхности, f - фаска.

Это связано с наростом, предохраняющим часть передней поверхности, прилегающей к главному лезвию, от истирающего действия стружки.

Мерой изношенности инструмента могут служить линейный и массовый износы. Принимая за показатель линейный износ, об изношенности задней поверхности судят по максимальной ширине $h_з$ площадки износа, а передней поверхности - по максимальной глубине $h_л$ лунки износа. При чистовой размерной обработке изношенность инструмента целесообразно оценивать линейным размерным износом $h_р$ (рис.5.2.), характеризующим смещение вершины или переходного лезвия инструмента в направлении, перпендикулярном к обработанной поверхности, в результате износа его задних поверхностей. Величина размерного износа определяет увеличение или уменьшение размера обрабатываемой детали по мере изнашивания инструмента. Если за меру изношенности инструмента принят линейный износ, то при этом измеряется только его максимальная величина и не учитывается ни местоположе-

ние максимального износа на лезвии инструмента, ни то, что во время его работы в результате местного выкрашивания инструментального материала максимальный износ может перемещаться вдоль лезвия.

Рис. 5.2. Размерный износ инструмента.

Максимальный линейный износ может быть достаточно надежной характеристикой при разработке промышленных норм допускаемых износов и норм расхода инструмента на переточки. Для исследования же физической природы изнашивания инструментов более объективной характеристикой является массовый износ - масса изношенной части инструмента в мг, которой пропорциональна работа сил трения, затрачиваемая на превращение инструментального материала в продукты изнашивания.

Выдвинут ряд теорий, объясняющих физическую природу изнашивания режущих инструментов. По этим теориям основными причинами, приводящими к изнашиванию контактных поверх-ностей инструмента, являются: а) абразивный износ, б) адгезионный износ, в) диффузионный износ, г) окислительный износ.

Абразивный износ. При трении стружки о переднюю поверхность и поверхности резания о заднюю поверхность инструмента твердые структурные составляющие обрабатываемого материала царапают материал инструмента, непрерывно разрушая его. Интенсивность абразивного износа возрастает при увеличении в сталях содержания цементита и сложных карбидов, в чугунах - цементита и фосфидов, в силуминах - карбида кремния, в жаропрочных сплавах - интерметаллидов и пластмасс с твердыми включениями. Абразивный износ значительно возрастает при наличии на заготовках литейной корки (после литья) или окалины (после штамповки, термообработки).

Адгезионный износ. Вследствие высоких контактных давлений в точках соприкосновения выступов фактических площадок контакта инструмента, стружки и поверхности резания развиваются локальные и пластические деформации с высокой температурой. В результате этого происходит сближение и контакт ювенильных (химически чистых, без окисных пленок) участков настолько, что между атомами металлов контактирующей пары могут возникнуть силы сцепления, их взаимное схватывание, сварка, образование мостиков схватывания. Для возникновения схватывания недостаточно только сближения поверхностей на расстояние порядка параметра кристаллической решетки, а необходимо превышение определенного для каждой пары материалов энергетического порога. Необходимое для схватывания энергетическое состояние может достигаться как за счет повышения температуры, так и за счет совместного пластического деформирования.

В обычных условиях поверхность твердого тела, как правило, инертна, поскольку валентные электроны ее атомов связаны атомами адсорбированных газов. Для разрушения устойчивых электронных конфигураций и увеличения числа свободных электронов необходима дополнительная энергия (механическая или термическая активация) для образования адгезионных связей.

Образование адгезионных связей в контакте начинается от активных центров, роль которых могут играть случайные совпадения кристаллографических связей, дислокации, вакансии, другие участки с повышенной упругой искаженностью или тепловой энергией. При совместном деформировании при относительно низкой температуре (ниже температуры рекристаллизации) соединение твердых тел происходит в результате механической активизации при наличии дислокаций. Активность центров адгезионных связей повышается также при увеличении количества свободных электронов, что сопровождает деформацию при высоком давлении.

При высокой температуре деформирования большую роль в образовании адгезионных связей приобретает термическая активация, т.е. возбуждение упругих колебаний атомов кристаллической решетки. В процессе активации возрастает амплитуда колебаний атомов в узлах кристаллической решетки, что сопровождается разрушением стабильных электронных конфигураций с высвобождением валентных связей, т.е. появлением на поверхностях активных центров. Между этими центрами совершается электронный обмен контактирующих тел с образованием общего электронного облака и новых электронных конфигураций, определяющих прочность адгезионной связи. Способность материалов к адгезионному взаимодействию резко повышается при температурах, близких к температуре рекристаллизации. При контакте одноименных материалов схватывание начинается при температурах, равных 0,3-0,4 Тпл, а при контакте разноименных материалов - 0,35-0,5 Тпл.

При перемещении инструмента происходит непрерывное разрушение и возобновление мостиков схватывания. Разрушение происходит под поверхностью контакта одной из контактных поверхностей. Периодически повторяющееся схватывание адгезионных соединений вызывает циклическое нагружение поверхностного слоя инструментального материала. По сравнению с обрабатываемым материалом материал режущей части инструмента является более хрупким и указанный характер нагружения приводит к его локальному разрушению. Вырванные с контактных поверхностей инструмента продукты износа инструментального материала уносятся стружкой и обработанной поверхностью детали.

Теория адгезионного износа хорошо согласуется и подтверждается результатами исследований при использовании микрорентгеноспектрального анализа и электроноскопии.

Диффузионный износ. При температуре резания выше 800°С происходит диффузионное растворение инструментального материала в обрабатываемом.

Возможность протекания диффузионного процесса основывается на параболическом законе роста диффузионного слоя. В процессе резания с контактными поверхностями инструмента вступают в соприкосновение все новые участки стружки и поверхности резания, в результате чего постоянно поддерживается весьма высокая скорость растворения.

Различные компоненты твердого сплава диффундируют в обрабатываемый материал с различной скоростью. Наиболее быстро диффундирует углерод, затем вольфрам, кобальт, титан.

С увеличением скорости резания, и следовательно, температуры диффузионный перенос становится основным фактором, определяющим механизм износа режущего инструмента.

Скорость диффузии на поверхности раздела зависит от температуры, а также от многих других факторов, таких, как относительный размер атомов и их химическое взаимодействие и взаимная растворимость материалов друг в друге. Скорость диффузионного износа зависит от того, что иногда называют «сродством» материалов; большая разница в скорости диффузионного износа вызвана различием пар материалов заготовки и инструмента. Скорость износа в большей степени зависит от химических свойств, чем от механической прочности или твердости инструмента при условии, что инструмент достаточно прочный, чтобы выдержать возникающие напряжения.

Скорость диффузионного износа зависит от скорости диффундирования атомов из инструмента в материал заготовки. В случае быстрорежущих сталей атомы железа из матрицы диффундируют в обрабатываемый материал до тех пор, пока изолированные частицы карбидов, остающиеся практически неповрежденными, не подрываются и уносятся целиком. У инструментов из твердых сплавов также наиболее быстрая диффузия происходит за счет атомов кобальта, связывающего частицы карбидов и атомов железа обрабатываемого материала. Несмотря на то , что атомы углерода малы и могут быстро перемещаться между атомами железа, в материале инструмента они прочно связаны с вольфрамом и не могут перемещаться самостоятельно. Именно скорость диффузии атомов вольфрама и углерода совместно определяет скорость диффузионного износа. Он зависит не только от температуры, но также и от скорости износа атомов, т.е. скорости течения материала заготовки непосредственно на поверхности инструмента, на расстоянии 0,001-1мкм. На задней поверхности инструмента скорость течения обрабатываемого материала очень высокая и диффузия может быть причиной высокой скорости износа задней поверхности даже в том случае, когда смежная с ней передняя поверхность практически не изношена.

При обработке со сравнительно высокими скоростями резания, когда износ задней поверхности обусловлен диффузией, скорость износа быстро возрастает по мере увеличения скорости резания. На рис.5.3. представлено семейство кривых износа задней поверхности в зависимости от времени при

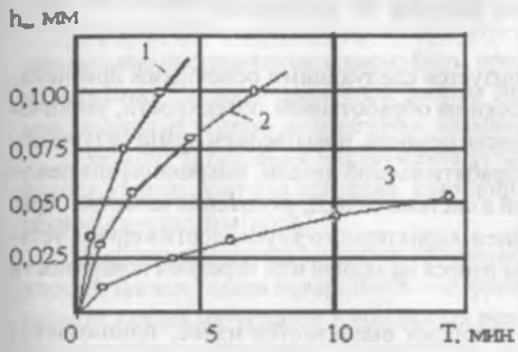


Рис.5.3 Изменение величины площадки износа h_3(мм) в зависимости от времени резания Т(мин) при обработке стали вольфрамокобальтовым инструментом в условиях диффузионного износа [16]; 1 - v = 220м/мин, 2 - v = 162м/мин, 3 - v = 85м/мин.

обработке стали твердосплавным инструментом в диапазоне более высоких скоростей резания.

Окислительный износ. Под влиянием интенсивной пластической деформации, совершающейся с огромными скоростями, свойства металла в зоне пластической деформации существенно изменяются. В частности, в результате резкого увеличения числа вакансий чрезвычайно сильно возрастает диффузионная подвижность атомов в кристаллической решетке. Это делает возможным проникновение кислорода воздуха к контактным поверхностям у лезвия инструмента через переходную пластически деформируемую область. При температурах резания 700-800°С кислород вступает в химическую реакцию с кобальтовой фазой твердого сплава и карбидами вольфрама и титана, причем наиболее сильно окисляется кобальт. Вследствие значительной пористости металлокерамических твердых сплавов окислительным процессам подвергаются не только сами контактные поверхности инструмента, но и зерна твердого сплава, лежащие на некоторой глубине от этих поверхностей. Твердость продуктов окисления в 40-60 раз ниже твердости твердых сплавов. В результате значительного размягчения кобальтовой фазы нарушается монолитность сплава и ослабляются связи между зернами карбидов вольфрама и титана и цементирующей связкой. Это создает благоприятные условия для вырывания карбидных зерен силами трения, действующими на передней и задней поверхностях инструмента, и изнашивания этих поверхностей.

Склонность твердых сплавов к окислению определяется их химическим составом. Однокарбидные сплавы окисляются сильнее, чем двухкарбидные. С увеличением содержания кобальта в твердом сплаве интенсивность и скорость окисления возрастают. Развитию окислительных явлений в значительной степени препятствует применение при резании инертных газов: аргона, гелия и азота. В суммарном механизме изнашивания инструмента окислительные процессы имеют существенное значение только в интервале температур 700-900 С.

5.2. Развитие износа во времени.

Затупление резца характеризуется следующими основными признаками: появлением блестящей полоски на обработанной поверхности, увеличением усилий и мощности в процессе резания, повышением температуры режущей части резца, стружки и обрабатываемой детали, выкрашивания режущего лезвия, появления вибраций в системе СПИД, ухудшения качества обработанной поверхности, появлением характерного звука, достижением установленной допустимой величины износа на задней или передней поверхности инструмента.

За основной признак, по которому оценивается износ, принимается ширина площадки изнашивания задней поверхности, а как дополнительный признак - величина изнашивания перед-ней поверхности (глубина и ширина лунки).

Графическое изображение развития нароста во времени называется кривой износа.

Характерные кривые износа задней (а) и передней поверхности (б) представлены на рис.5.4.

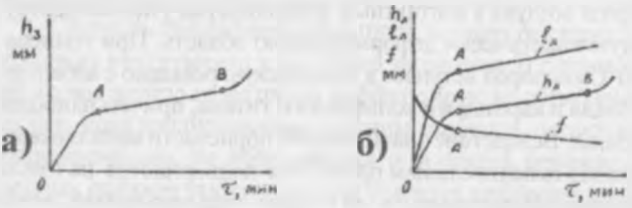


Рис. 5.4. Кривые зависимости износа резца от времени его работы: а) по задней поверхности; б) по передней поверхности.

Кривая износа по задней поверхности состоит из трех более или менее отчетливо выраженных участков. Участок ОА кривой с интенсивным нарастанием ширины площадки износа соответствует периоду приработки инструмента. При дальнейшей работе нарастание износа замедляется, так как это связано с уменьшением контактных касательных напряжений на площадке износа по мере увеличения ее размеров. Участок АВ кривой соответствует периоду нормального изнашивания инструмента. По достижении некоторой величины линейный износ задней поверхности вследствие роста температуры вновь начинает резко расти и кривая износа идет круто вверх. Участок кривой за точкой В соответствует периоду катастрофического изнашивания инструмента. В этом периоде износ нарастает настолько быстро, что если не прекратить дальнейшую работу, то это может привести к чрезмерно большому износу задней поверхности, при котором резко сократится число переточек, допускае-

мых инструментом, и увеличится время, затрачиваемое на переточку.

При эксплуатации инструмента наступает такой момент, когда дальнейшее резание инструментом должно быть прекращено, а инструмент отправлен на переточку. Время непрерывной работы инструмента при постоянных режимах резания от заточки до переточки называется стойкостью инструмента.

Момент затупления инструмента устанавливают с помощью критерия износа. Используют два критерия: критерий оптимального износа и критерий технологического износа.

В обоих критериях за основу принимают линейный износ задней поверхности, так как задняя поверхность инструмента изнашивается всегда, при обработке любых материалов и при любых режимах резания, и измерение ширины площадки износа значительно проще, чем глубины лунки износа.

Под оптимальным износом понимают такой, при котором суммарный период стойкости инструмента достигает максимальной величины Тсум » iT, где i - число переточек, допускаемых инструментом до его полной амортизации, Т - период стойкости.

Критерий оптимального износа широко применяют в лабораторных условиях при установлении стойкостных зависимостей для инструментов, предназначенных для черновой и получистовой обработки.

В случае использования критерия технологического износа, инструмент считается затупившимся, когда линейный износ задней поверхности достигает значения, равного технологическому износу. Под технологическим износом понимают такой, при котором работу инструмента прекращают по технологическим ограничениям, как то: резкое увеличение шероховатости обработанной поверхности, потеря инструментом необходимого размера, возникновение вибраций в системе СПИД и т.п. Критерий технологического износа используют, в основном, при исследовании и эксплуатации инструмента, предназначенного для чистовой обработки.

Допустимые величины износа токарных резцов даются в нормативах. Предельные ориентировочные значения для резцов из быстрорежущей стали при обработке: стали и ковкого чугуна с охлаждением $h_з$ = 1,5-2 мм, без охлаждения $h_з$ = 0,3-0,5 мм, серого чугуна $h_з$ = 1,5-4,0 мм. Для резцов из твердого сплава при обработке: стали и цветных металлов $h_з$ = 0,8-2,0 мм, чугуна $h_з$ = 0,8-1,7 мм. При чистовой обработке величина износа допускается приблизительно в два раза меньше, чем при черновой.

Обычно величину износа измеряют с помощью микроскопа или с помощью лупы Бринелля. При исследованиях влияния различных факторов процесса резания на интенсивность изнашивания инструмента пользуются современными методами: метод радиоактивных изотопов и метод микрорентгеноспектрального анализа.

При применении метода радиоактивных изотопов пластинки - образцы твердого сплава или быстрорежущей стали предварительно облучают в атом-

ных реакторах или на ускорителях элементарных частиц. В результате такой обработки часть вольфрама, содержащегося в твердом сплаве или быстрорежущей стали, становится радиоактивным изотопом вольфрама, испускающим β - лучи, с периодом полураспада 24 ч. Продукты износа режущего инструмента содержат меченые атомы изотопа вольфрама. Определенное количество стружки помещают в контейнер с датчиками, фиксирующими уровень радиоактивности. По общему числу импульсов счетчиков с учетом степени распада за время между активацией пластинок - образцов в атомном реакторе и моментом начала измерения расчетным способом находят общую массу продуктов износа на срезанной стружке. Продукты износа, остающиеся на обработанной поверхности, фиксируются с помощью высокочувствительной фотопленки, которую соответствующим способом прикладывают к обработанной поверхности. Потемневшие места на проявленной фотопленке или так называемые авторадиограммы укажут наличие и распределение изотопов на обработанной поверхности. Однако, контактный способ съемки авторадиограмм обладает низкой разрешающей способностью, достигающей 20-100 мкм только при плотном контакте пленки с исследуемым образцом. С увеличением зазора разрешающая способность авторадиограмм резко снижается и размеры почернений на пленке не могут дать даже приближенной оценки размеров частиц износа. Это, прежде всего, объясняется тем, что излучение, испускаемое радиоактивным веществом, рассеивается во всех направлениях, поэтому каждому, даже исчезающе малому участку, соответствует диффузная область почернения эмульсии.

В последнее время все чаще стали применять, при исследованиях процессов резания металлов, растровые электронные микроскопы совместно с рентгеноспектральным микроанализатором (микрозонд). Эта аппаратура имеет характеристики: гарантированное разрешение (60-150) $\overset{\circ}{A}$, электронно-оптическое увеличение 5...200000; локальность электронного пучка по поверхности и по глубине исследования 1 мкм. Этот метод основан на использовании пучка быстрых электронов, с помощью которого можно обследовать поверхности режущего лезвия, продукты износа инструментального материала на прирезцовой стороне стружки, а также на поверхности резания и обработанной поверхности.

На электронном растровом микроскопе с микрозондом исследуется рельеф образца с количественным и качественным анализом на химические элементы, содержащихся в поверхностном слое образца.

При интерпретации электронных растровых микрофотографий необходимо учитывать, что они не являются просто изображением образца, а представляют результат физического взаимодействия электронного пучка (зонда) с поверхностным слоем образца. Топографический контраст, в основном, обус-

ловлен изменением регистрируемой интенсивности электронного излучения при изменении угла наклона локального участка поверхности к зонду. Изображения могут быть сформированы либо отраженными электронами, либо вторичными. Пучок вторичных электронов несет реальное изображение, образованное всеми типами ионов, вылетающих с бомбардируемой поверхности образца. Пучок разделяется в масс-спектрометре на отдельные элементарные изображения, каждое из которых соответствует ионам отдельных элементов. Регулируя настройку масс-спектрометра, можно последовательно наблюдать и фиксировать на пленку картину распределения искомого химического элемента на сканированной поверхности образца.

5.3. Стойкость режущего инструмента

Стойкость любого инструмента зависит от физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрических параметров режущего инструмента, режима резания и применяемой смазочно-охлаждающей технологической среды. Наибольшее влияние на стойкость инструмента оказывает скорость резания. Стойкостные и скоростные зависимости в настоящее время устанавливают исключительно экспериментально, используя метод однофакторного эксперимента.

Связь между скоростью резания и периодом стойкости может быть монотонной, выраженной непрерывно падающей кривой, близкой к гиперболе, или немонотонной, выраженной кривой с двумя перегибами (рис.5.5). Если зависимость T от v монотонна или на горбообразной кривой практический интерес представляют только нисходящие или восходящие ветви кривой аб, бв или вг отдельно, то зависимость периода стойкости от скорости резания удобно описать степенной функцией:

$$T = \frac{C}{v^m} \qquad (5.1)$$

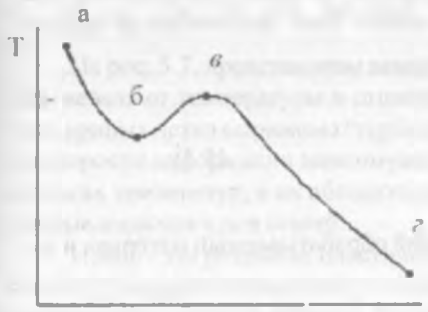


Рис. 5.5. Общая зависимость периода стойкости T инструмента от скорости резания v

Рис. 5.6. Зависимость между скоростью резания v и периодом стойкости T при точении стали твердосплавным резцом.

На основании линейной логарифмической аппроксимации показатель m равен тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс, проведенной через опытные точки, нанесенные в двойной логарифмической сетке (рис. 5.6). Если зависимость между периодом стойкости и скоростью или каким-либо другим фактором немонотонна и необходимо описать всю кривую, то искомую зависимость аппроксимируют через ряды Фурье.

При установлении влияния скорости резания, а также подачи и глубины при точении на стойкость резца проводят три серии опытов, получают три частных зависимости, которые объединяют в общую зависимость:

$$T = \frac{C}{v^m S^p t^q} \qquad (5.2)$$

Установленная зависимость имеет универсальный характер и справедлива не только для точения, но и для любого другого вида работ (сверления, торцевого фрезерования, протягивания и т.д.).

На основании вышеизложенного скорость резания, допускаемая резцом, при наружном продольном точении может быть подсчитана по формуле:

$$V = \frac{C_v}{T^m S^y t^x} K_v, \text{ м/мин} \qquad (5.3)$$

где C_v-коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал и условия его обработки,

x_v, y_v - показатели степеней,

K_v - общий поправочный коэффициент на измененные условия обработки по отношению к тем, для которых дается значение коэффициента C_v.

5.4. Физическая природа стойкости

В процессе резания необходимо учитывать температурно-скоростной фактор, так как скорость резания влияет на температуру резания, а она, в свою очередь, - на скорость деформации. При рассмотрении вопросов, связанных с износом и стойкостью режущего инструмента, это положение должно относиться не только к обрабатываемым, но и к инструментальным материалам.

Скорость резания определяет скорость деформирования в зоне стружкообразования как обрабатываемого, так и инструментального материалов. С увеличением скорости резания скорость деформирования срезаемого слоя резко возрастает. Поскольку процесс образования стружки заключается в последовательном сдвиге ее элементов, нагрузка на рабочие поверхности режущего инструмента имеет циклический характер, причем частота цикла также увеличивается с ростом скорости резания. В тоже время известно, что механические свойства металлов зависят не только от температуры, но и от скорости деформации.

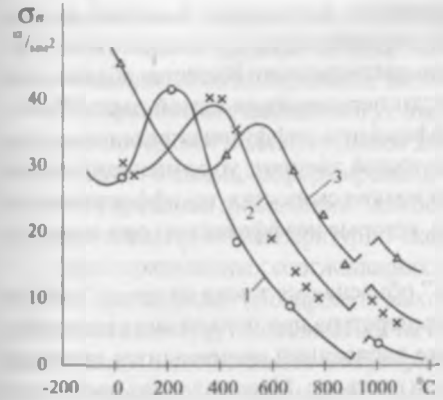


Рис. 5.7. Зависимость предела прочности при растяжении железа от температуры и относительной скорости деформации:

1 - ε = 8,55/10-⁴с-¹,

2 – ε = 0,51с–¹,

3 – ε = 150с–¹.

На рис. 5.7. представлены зависимости предела прочности при растяжении железа от температуры и относительной скорости деформации. На всех трех кривых четко выражены "горбы синеломкости". Видно, что с увеличением скорости деформации максимумы прочности сдвигаются в сторону более высоких температур, а их абсолютная величина уменьшается. Аналогичные данные имеются и для сталей.

Износ - это результат пластических деформаций и разрушения тонких слоев трущихся поверхностей, что связано с механическими свойствами изнашиваемых объемов металла. Современные представления о прочности и

пластичности базируются на теории дислокаций. При этом, большая роль отводится растворенным в металле атомам примесей.

Беспорядочно рассеянные по объему растворенные атомы не могут обусловить упрочнение твердого раствора в процессе деформации.

При определенных условиях, исходя из принципа минимальной энергии, растворенные в металле примесные атомы будут концентрироваться вокруг дислокаций, образуя так называемые "атмосферы Коттрелла" и препятствуя, тормозя движение этих дислокаций. Поэтому в условиях образования вокруг дислокаций "атмосфер Коттрелла" растут критические напряжения, необходимые для перемещения дислокаций. При этом, для образования "атмосфер Коттрелла" необходимы лишь очень малые количества растворенного элемента. Поскольку в сильно деформированных металлах максимальная плотность дислокаций составляет примерно 10^{12}см$^{-2}$, то для получения концентрации, при которой на один атомный промежуток вдоль дислокации приходится один растворенный атом, достаточно, чтобы содержание растворенных атомов составляло всего 0,1%.

В процессе ползучести для данной скорости ползучести существует такая температура, при которой подвижность растворенных атомов достаточна для того, чтобы удерживать дислокации, и сплавы оказываются прочными. При более высоких температурах подвижность атомов слишком велика для того, чтобы в достаточной степени удерживать дислокации, и металл разупрочняется. Максимальная прочность будет наблюдаться, очевидно, в случае, когда скорость передвигающихся атомов растворенного вещества вблизи центра дислокации станет равной скорости перемещения самой дислокации. Наиболее благоприятное значение коэффициента диффузии определяется самой скоростью ползучести. Так, легирующий элемент, упрочняющий сплав при высоких скоростях ползучести, при низких скоростях по эффективности может оказаться хуже других элементов, которые неэффективны при высоких скоростях ползучести.

С помощью "атмосфер Коттрелла" объясняется также наличие "горбов синеломкости" на кривых прочность-температура при испытании углеродистых сталей. В этом случае блокирование дислокаций производится атомами азота и углерода, находящимися в твердом растворе. Максимальная прочность при указанной скорости деформации имеет место при температурах, при которых скорость диффузионного перемещения растворенных атомов азота и углерода, примерно, равна скорости движения дислокаций. При более высокой температуре подвижность растворенных атомов превышает скорость движения дислокаций, и они не оказывают сколько-нибудь заметного сопротивления этому перемещению. Наоборот, при более низкой температуре подвижность растворенных атомов недостаточна, они не успевают перемещаться вместе с дислокациями. Это приводит к отрыву дислокаций от "атмосфер Коттрелла" и более или менее свободному их перемещению в металле. Таким образом, существует определенное сочетание скорости деформирования и

температуры, при котором прочность стали имеет максимальное значение. С увеличением скорости деформации блокирование дислокаций "атмосферами Коттрелла" происходит при более высоких температурах, так что максимум прочности сдвигается в область более высоких температур.

С помощью деформационного старения (увеличение плотности дислокаций в процессе пластической деформации и последующего их блокирования растворенными атомами) в настоящее время объясняются многие явления, наблюдаемые при механических испытаниях металлов: образование "зуба" и площадки текучести, физический предел усталости и др. Причина этих явлений объясняется пластическими деформациями поверхностных слоев толщиной порядка размера зерна в псевдоупругой области. Более раннее течение поверхностных слоев обуславливается рядом причин: способностью закрепления приповерхностных источников дислокаций, которые имеют одну опорную точку закрепления, наличием концентратов напряжений и др. В результате такой пластической деформации и за счет процессов динамического деформационного старения поверхностный слой из ослабленного превращается в упрочненный. При дальнейшем деформировании он является барьером для выхода дислокаций из объема металла на поверхность. Барьерный эффект поверхностного слоя должен проявляться лишь в определенном диапазоне скоростей деформирования, поскольку он является динамическим эффектом и связан с кинетикой протекания пластической деформации по сечению образца.

Значительное влияние на механические свойства металлов могут оказывать находящиеся на поверхности металлические и окисные пленки.

Поверхностные пленки могут вызвать упрочнение металла за счет подавления поверхностных источников дислокаций, а также за счет растворения части пленки в сильно деформированных поверхностных слоях и последующего блокирования дислокаций "атмосферами Коттрелла". При этом результат будет зависеть от температурно-скоростных условий деформирования.

При определенных соотношениях модулей упругости пленки и основного металла пленка может блокировать выход дислокаций на поверхность, в связи с чем дислокации будут скапливаться на границе металл-пленка, что приводит к образованию в этой области микротрещин и разрушению металла при меньших деформациях. С изменением температуры соотношение между модулями упругости пленки и основного металла меняется, так что "барьерный эффект" пленки так же, как и упрочненного поверхностного слоя, проявляется при определенных температурно-скоростных условиях деформирования.

На основании изложенного можно заключить, что износ и стойкость режущего инструмента, являющиеся результатом пластических деформаций и разрушения рабочих поверхностей, обусловленные механическими свойствами инструментального материала, должны зависеть при прочих равных условиях от температурно-скоростных факторов нагружения активных участков режущего инструмента и наличия на изнашиваемых участках пленок окислов.

Глава 6

Влияние смазочно-охлаждающих технологических сред на процесс резания.

6.1. Физико-химические явления взаимодействия со средой при резании.

Одним из важнейших факторов, влияющим на процесс резания металлов является смазочно-охлаждающая технологическая среда (в дальнейшем для упрощения изложения будет использован термин СОЖ, подразумевающий широкий спектр смазочно-охлаждающих сред - жидкие, твердые, газообразные).

Применение СОЖ при резании является одним из эффективных средств повышения качества обработанных поверхностей. Обеспечивая возникновение разделительных пленок, СОЖ снижают трение, облегчая процесс образования стружки, уменьшают температуру резания и улучшают шероховатость и качество обработки, а также во многих случаях обуславливают повышение стойкости режущего инструмента. Однако, в ряде случаев СОЖ снижают стойкость инструмента, причем, иногда весьма значительно.

Смазочно-охлаждающая технологическая среда является органическим элементом комплекса средств, обеспечивающего эффективную эксплуатацию металлообрабатывающего оборудования и освоение новых прогрессивных методов и технологических процессов обработки металлов.

Практический опыт показывает, что в результате рационального использования СОЖ достигается увеличение стойкости режущих инструментов в 1,3-5 и более раз, повышение точности обработанных деталей и эксплуатационных свойств обработанных поверхностей, увеличение производительности труда в 1,1-2 раза.

Особое значение применение СОЖ и газовых сред приобретает в условиях автоматизированного производства, а также при обработке резанием жаропрочных и нержавеющих сталей. Поэтому исключительно большое внимание уделяют разработке новых видов жидкостей и газовых сред и технических средств их подачи в зону резания.

При резании большая часть механической энергии превращается в теплоту. Субмикрообъемы, где возникают температурные вспышки, разогреваются, по крайней мере, до температуры плавления обрабатываемого металла.

Интенсивнейшая пластическая деформация отделяемого слоя создает глубокие изменения, которые претерпевает кристаллическая ионная решетка металла: она деформируется - изменяются ее параметры, чему соответствует накопление избыточной внутренней энергии; в результате разогревания возрастает амплитуда колебаний ионов относительно центрального их

положения, что приводит к увеличению вероятности удаления их из узлов решетки и появлению большого числа вакансий и дислоцированных атомов: в огромной степени возрастает количество других дефектов кристаллической решетки, прежде всего, дислокаций (до 10^{12} на $см^2$ поверхности); изменяется энергетический спектр свободных электронов в сторону повышения их энергетических уровней; изменяется энергетическое состояние электронов, находящихся на электронных орбитах атомов и ионов - они возбуждаются, их связи с ядром атома ослабляются до такой степени, что пластически деформируемые металлические поверхности излучают поток электронов, причем, наиболее интенсивно в момент разрыва металлических связей, а также при соударении макро- и микрообъемов металлических тел.

Бомбардировка электронами, покинувшими металлическую поверхность, молекул внешней среды может в существенной степени способствовать их ионизации или образованию радикалов-частиц, весьма активных в химическом отношении. Металлические поверхности, возникающие при резании, являются мощными катализаторами ряда других процессов, совершающихся в окружающей среде.

Образующиеся при резании поверхности на стружке, обрабатываемой детали и инструменте, а также частицы внешней среды чрезвычайно сильно активированы, и именно поэтому они весьма активно взаимодействуют друг с другом. Происходящие при этом реакции и их скорость обусловлены законами неравновесной термодинамики и могут приводить к образованию соединений, существование которых невозможно в обычных условиях.

К настоящему времени установлен ряд фактов, на основании которых можно утверждать, что за время подвижного контакта на границах фрикционных пар инструмент-деталь успевает осуществляться в той или иной мере обширный круг физико-химических взаимодействий. Все они, в первую очередь, связаны со специфическим энергетическим состоянием трущихся поверхностей и ближайших к ним частиц внешней среды.

Среди компонентов внешней среды роль кислорода особенно существенна. В реакции с кислородом вступают контактные поверхности как стружки и обработанной поверхности детали, так и инструмента. В местах, легко доступных для внешней среды, образуются пленки окислов. Такими местами являются участки контактных площадок, примыкающих к их периметру. На внутренних участках контактных площадок возникают островки относительно тонких окисных пленок, зоны твердого раствора кислорода в кристаллической решетке и зоны с хемосорбированным и физически адсорбированным кислородом. Структуры, появившиеся на инструменте в результате реакции с кислородом, в процессе резания непрерывно разрушаются и вновь регенерируют.

Как процессы образования нароста и налипов, так и реакции взаимодействия металлических поверхностей с кислородом–явления преимущественно адгезионно-диффузионные, но конкурирующие друг с другом Следователь-

но, результат взаимодействия определится в конечном итоге тем, какое из двух адгезионно-диффузионных явлений реализуется быстрее.

Выделяют следующие основные физико-химические воздействия СОЖ и газовых сред, за счет которых повышается обрабатываемость металлов резанием:

1) Уменьшение трения рабочих поверхностей инструмента о стружку и обрабатываемую поверхность заготовки - смазывающее действие.

2) Понижение температуры нагрева рабочих поверхностей инструмента - охлаждающее действие.

3) Облегчение процесса резания за счет уменьшения величины работы и усилий, необходимых для пластической деформации и разрушения срезаемого слоя - диспергирующее (разрушающее) действие.

4) Удаление стружки и частиц износа из зоны резания - смывающее действие.

5) Химическая защита образующейся в процессе резания обработанной поверхности детали от вредного воздействия атмосферы воздуха, обеспечивающая повышение эксплуатационных характеристик.

Для эффективного применения СОЖ в производственных условиях недостаточно только вышеназванных высоких технологических свойств. Должны быть также обеспечены необходимые сопутствующие эксплуатационные свойства, такие как легкость приготовления в условиях предприятия-потребителя, стабильность, отсутствие корродирующего действия на изготовляемые детали и оборудование, консервация обрабатываемых деталей на межоперационный период, отсутствие растворяющего действия на окрасочное покрытие станка и разъедающего на изоляцию обмоток электрооборудования, бактериологическая устойчивость, морозоустойчивость, удовлетворительные санитарно-гигиенические свойства, легкость разложения перед сбрасыванием в сточные воды др. Важность выполнения этих требований к СОЖ непрерывно возрастает, причем, эта задача оказывается не менее трудной, чем придание СОЖ высоких технологических свойств.

Проникновение СОЖ в зону контакта рабочих поверхностей инструмента и поверхностью обрабатываемой заготовки происходит:

1) Через зазоры молекулярного порядка между стружкой и передней поверхностью инструмента под влиянием сил химического взаимодействия.

Проникновение СОЖ в зону резания пособствуют периодические процессы срыва и образования нароста. В момент отрыва частиц нароста на мгновение образуется вакуум, в который затягивается СОЖ.

Помимо этого, в процессе трения на контактных поверхностях образуется большое число капилляров, способствующих проникновению СОЖ

2) Непосредственно через зону резания, благодаря наличию ультрамикроскопических трещин в зоне стружкообразования.

Смазывающее действие жидкостей и газовых сред выражается в образовании на соприкасающихся в процессе резания поверхностях смазочной пленки, которая вследствие высокого молекулярного сродства с материалом инструмента или обрабатываемой заготовкой не вытесняется большим давлением.

Считают, что при толщине жидкостной прослойки не менее 0,1 мкм получается жидкостное трение. При смазочной прослойке менее 0,1 мкм происходит граничное трение. При еще более тонкой прослойке (толщиной в одну молекулу) происходит так называемая адсорбционная смазка.

Формирование смазочных пленок происходит в результате процессов адсорбции поверхностно-активных составляющих СОЖ. Молекулы поверхностно-активных веществ (ПАВ) построены ассиметрично и состоят из полярной и неполярной частей, полярные группы их образуют на поверхностях металла прочно связанные ориентированные слои. К полярным относятся группы, содержащие серу, фосфор, галогены и группу ОН, СООН, NH_2, SOOH и др. Неполярная часть состоит из какой-либо углеводородной группы C_nH_{2n} и C_nH_{2n-1}.

Образовавшаяся пленка снижает силы трения и температуру вследствие замены сил молекулярного воздействия в несколько сот раз меньшими силами по теории Вандер-Ваальса. Например, 50%-ная эмульсия снизила износ при трении образцов из ЭН481 по ВК8, Т5К10 и Т15К6 в 11-55 раз.

Наиболее эффективное воздействие смазывающей жидкости на снижение явлений схватывания наблюдается при малых скоростях резания.

Образования высоких температур в зоне контакта при больших скоростях резания приводит к десорбции смазки и к повышению коэффициента трения. В этом случае смазывающее действие осуществляется уже не жидкостью, а парами. Вступая в химическое взаимодействие с материалом поверхностных слоев инструмента и заготовки, они образуют тонкие пленки химических соединений, играющие роль твердой смазки. Например, при взаимодействии хлора и серы с металлом образуются пленки хлоридов и сульфидов, сохраняющие смазывающее действие до 400° С и 800°С соответственно. Взаимодействие жирных кислот с металлом приводит к образованию металлических мыл, сохраняющих свои смазывающие свойства до 200°С.

Охлаждающая способность СОЖ определяется их теплофизическими параметрами: величинами теплопроводности, теплоемкости и скрытой теплотой парообразования. Жидкость, обладая способностью смачивать металлы, поглощает и отводит тепло, понижая тем самым температуру контактных поверхностей и стружки.

Эффективность также зависит от способа подачи СОЖ в зону резания. Например, охлаждение высоконапорной струей более эффективно, чем охлаждение обычным поливом.

Облегчение процесса резания вследствие физико-химического действия СОЖ осуществляется по трем основным направлениям, имеющим свои отличные друг от друга физические механизмы воздействия.

Прежде всего внешняя среда может растворять в себе обрабатываемый материал. Этот процесс широко применяется при химическом фрезеровании и химическом полировании.

При обработке резанием наиболее широко используется второй механизм воздействия внешней среды, заключающийся в адсорбционном эффекте снижения прочности или эффекте Ребиндера.

Если вводимая в зону резания внешняя среда обеспечивает относительно слабое уменьшение поверхностной энергии, то достигается поверхностный пластифицирующий эффект, т.е. облегчение и локализация пластической деформации в тонком поверхностном слое. Это объясняется тем, что поверхностно-активная внешняя среда облегчает выход на поверхность дислокаций, движение которых и составляет сущность пластической деформации. Если же в зону обработки вводится сильно поверхностно-активная среда, увеличивается хрупкость твердого тела, что облегчает процесс его разрушения.

Физический смысл данной группы явлений заключается в следующем В ходе разрушения твердого тела обнажаются и перестраиваются его внутренние связи. Эти связи ослабляются и их разрыв облегчается в том случае, если их частично удается отвлечь на взаимодействие с атомами легко подвижной внешней среды.

Проявлению эффекта Ребиндера препятствуют пленки окислов. Они блокируют выход дислокаций на поверхность, в результате чего дислокации скапливаются под пленкой, и это может повлечь появление микротрещин. Но такое действие окисных пленок проявляется не одинаково в различных температурно-скоростных условиях, в связи с чем есть температурно-скоростные условия резания, когда при положительном экранирующем эффекте окисных пленок может появиться и положительный эффект Ребиндера.

В особо жестких условиях резания воздействие сильно поверхностно-активной среды на обрабатываемый материал становится сравнимым с воздействием на инструментальный режущий материал и получаемая общая эффективность существенно снижается, что требует специального выбора инструментального режущего материала.

Смывающее действие СОЖ направлено на обеспечение непрерывного удаления из зоны обработки стружки, продуктов износа инструмента. Наилучшим смывающим действием обладают такие маловязкие жидкости, как керосин, содовые и мыльные растворы. Они образуют тончайшие пленки, разделяющие мелкие частицы стружки, абразива и препятствуют их слипанию. Смывающее действие СОЖ имеет существенное значение при обработке резанием заготовок из чугуна, когда образуются мелкие стружки, а также при абразивной обработке для предотвращения налипания исключительно мелкой стружки на инструмент и обработанную поверхность.

Очевидными средствами повышения смывающего действия СОЖ являются увеличение количества СОЖ, подаваемой в зону резания в единицу времени, и увеличение скорости потока.

Повышение эксплуатационных характеристик деталей за счет применения специальных сред обусловлено их защитными и упрочняющими действиями. Защитное действие наиболее полно наблюдается при применении газообразных сред, например, аргона. Чистая металлическая поверхность заготовки, образующаяся в зоне резания, быстро адсорбирует молекулы окружающей газовой среды, обычно воздуха, вследствие чего понижает свою прочность. Образование специальных газовых сред играет существенную защитную роль, повышая, например, прочность при переменных нагрузках титановых сплавов. При подборе специальных сред можно получить упрочнение поверхностного слоя в результате тонкого внутреннего диспергирования кристаллической решетки поверхности в поверхностно-активной среде.

6.2. Виды СОЖ

Современные СОЖ - это сложные многокомпонентные системы.

Наиболее распространенные группы СОЖ: масляные жидкости, водные эмульсии минеральных масел, синтетические СОЖ.

В отдельных случаях в качестве СОЖ используют также консистентные смазки или пасты с графитом, дисульфидом молибдена и другими наполнителями.

Масляные СОЖ состоят из минерального масла, являющегося базовым, к которому добавлены антифрикционные, антиизносные и антизадирные присадки, ингибиторы коррозии, антиоксиданты, антипенные и антитуманные присадки.

Минеральное масло в масляных СОЖ занимает 60-95%. Обычно это высокоочищенные нафтеновые или парафиновые масла.

Водные эмульсии минеральных масел (обычно 1-10%) приготовляют из эмульсолов, в состав которых входят базовые минеральные масла, эмульгаторы, вещества-связки, ингибиторы коррозии, бактерициды, антипенные присадки, а в ряде случаев также антиизносные и антизадирные присадки. Доля минерального масла в эмульсоле обычно составляет 70-85%, остальное - эмульгаторы совместно с другими добавками.

Синтетические СОЖ делят на два типа: водные (обычно 1-10%-ные) растворы олигомеров и ПАВ и водные (обычно 1-2%-ные) растворы ингибиторов коррозии типа неорганических солей. По универсальности, продолжительности сохранения эксплуатационных свойств синтетические СОЖ, как правило, превосходят эмульсии. Синтетические СОЖ аналогично эмульсиям приготовляют на месте применения из концентратов. В состав последних вхо-

дят водорастворимые низкомолекулярные полимеры или ПАВ, ингибиторы коррозии, бактерициды, антипенные присадки, антиизносные и антизадирные присадки. Содержание суммы компонентов в концентрате порядка 50-70%, остальное - вода.

Газовая среда значительно влияет на процессы резания металлов. В качестве газовых технологических сред используют азот, аргон, углекислый газ, кислород, сжатый воздух для распыления жидкостей, пары поверхностно-активных веществ. Однако, охлаждение газообразными веществами имеет ограниченное применение.

Глава 7

Силы резания

7.1. Определение сил резания.

В процессе резания на лезвие инструмента действуют силы сопротивления данного металла пластической деформации стружкообразования. Общая сила, прилагаемая к резцу для осуществления процесса резания, должна быть такой величины, чтобы преодолеть общую силу сопротивления данного металла резанию.

При определении расходуемой на резание мощности, расчетах на прочность и жесткость резца и отдельных деталей и узлов станка силу резания R раскладывают на три координатные оси Z, Y, X, получив составляющие P_z, P_y, P_x (рис 10.1.). Ось Z направлена вертикально, оси Y и X расположены в горизонтальной плоскости, соответственно перпендикулярно и параллельно оси детали. Силу P_z называют окружной силой или главной составляющей силы резания, силу P_y - радиальной силой, силу P_x - осевой силой или силой подачи.

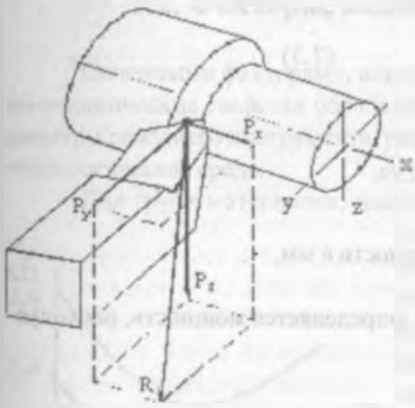


Рис. 7.1. Схема действия сил резания при точении.

Сила P_z, действуя на резец, изгибает его в вертикальной плоскости, а ее реакция также в вертикальном направлении изгибает деталь. Сила P_y стремится оттолкнуть резец от детали в направлении, перпендикулярном к ее оси, а реакция силы P_y изгибает деталь в горизонтальной плоскости. Сила P_x противодействует продвижению суппорта станка вдоль оси детали. По ее величине рассчитывают на прочность механизм подачи станка. Сила P_z изгибает резец в горизонтальной плоскости. Реакция силы P_x сдвигает деталь вдоль ее оси. Величина силы P_z главным образом определяется нормальной силой, действующей на передней поверхности резца. Силы P_y и P_x зависят от величины и направления силы трения. Поэтому соотношение между силами P_z, P_y и P_x изменяется при изменении материала обрабатываемой детали, геометрических параметров резца и режима резания.

Исследованиями установлено, что между силами резания при обычных условиях резания при $\varphi = 45°$, $\lambda = 0°$, $\gamma = 15°$ и отношении $\frac{t}{S} > 10$

существуют следующие приближенные соотношения: $P_z : P_y : P_x = 1 : 0{,}45 : 0{,}35$.

Величина равнодействующей силы резания R может быть определена из выражения:

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2} = \sqrt{P_z^2 + (0{,}45P_z)^2 + (0{,}35P_z)^2} = 1{,}14P_z \qquad (7.1)$$

Реакция окружной силы создает момент сопротивления резанию, называемый крутящим моментом резания:

$$M = \frac{PzD}{2000}, \text{ кгс} \cdot \text{м} \qquad (7.2)$$

Для того, чтобы осуществлялся процесс резания, крутящий момент $M_{ст}$, развиваемый станком при определенном числе оборотов шпинделя, должен быть больше крутящего момента резания, т.е. $M_{ст} > M$.

Эффективная мощность станка определяется по окружной силе резания:

$$N_э = \frac{P_z v}{102 \cdot 60} \text{ кВт}, \qquad (7.3)$$

где $v = \frac{\pi Dn}{1000}$ м/мин - скорость резания,

D - диаметр обрабатываемой поверхности в мм,

n - число оборотов детали в мин.

С помощью осевой силы резания P_x определяется мощность, расходуемая на движение подачи:

$$Nx = \frac{P_x S}{102 \cdot 60} \text{ кВт}.$$

Если предположить, что силы P_z и P_x будут даже равны друг другу, то при применяемых режимах резания составляющая мощности N_x всегда во много раз меньше составляющей N_z. Поэтому эффективную мощность станка рассчитывают только по окружной силе P_z.

Мощность, потребляемая электродвигателем привода главного движения станка, больше эффективной мощности на величину потерь, имеющих место в передачах от электродвигателя до шпинделя. Эти потери определяются коэффициентами полезного действия механизмов, передающих движение.

Теоретически выведенные уравнения предназначены лишь для качественного анализа зависимости силы резания от режимных, геометрических и физических параметров и не используются в инженерной практике. Связь между изменением факторов процесса резания и составляющими силы реза-

ния находят экспериментально. Приборы, предназначенные для измерения составляющих силы резания, называют динамометрами. Принцип действия всех динамометров основан на измерении упругой деформации измерительных элементов динамометров, пропорциональной значению измеряемой составляющей силы резания. Динамометры имеющие лишь один измерительный элемент, используемый обычно для измерения вертикальной составляющей силы резания P_z, называются однокомпонентными. Динамометры, имеющие два взаимно перпендикулярно расположенных измерительных элемента, например, для одновременного измерения вертикальной P_z и горизонтальной P_x составляющих, называются двухкомпонентными. Динамометры, имеющие три взаимно перпендикулярно расположенных измерительных элемента для одновременного измерения всех трех составляющих P_z, P_y и P_x, называются трехкомпонентными.

По принципу действия различают динамометры: упругомеханические, гидравлические и упругоэлектрические.

7.2. Факторы, влияющие на силы резания.

Основными факторами, влияющими на силы резания, являются физико-механические свойства обрабатываемого материала, геометрические параметры режущего инструмента, режимы резания и смазочно-охлаждающая технологическая среда.

Для групп материалов, однородных по своему химическому составу, увеличение напряжений сдвига при увеличении прочности, как правило, значительно опережает уменьшение коэффициента усадки стружки. Поэтому составляющие силы резания растут при увеличении предела прочности при растяжении или твердости по Бринеллю. При резании пластичных материалов расчет составляющих сил резания ведут по $\sigma/_b$ или НВ; при резании хрупких материалов за основу берется твердость НВ.

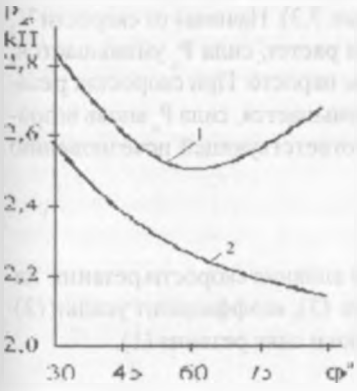


Рис. 7.2. Влияние главного угла в плане на силу P_z при точении стали (v = 40м/мин; S = 0,48мм/об; t = 2мм); 1 - r = 2мм , 2 - r = 0.

Уменьшение величины переднего угла увеличивает коэффициент усадки стружки и работу стружкообразования. Это приводит к увеличению всех составляющих сил резания. Однако, это влияние на составляющие силы резания неодинаково.

Влияние главного угла в плане φ на

силу резания P_z показано на рис.7.2. Увеличение угла φ при постоянных t и s вызывает уменьшение отношения b/a, что должно привести к непрерывному уменьшению силы P_z. Это подтверждается экспериментом (кривая 2) рис.7.2. При точении резцом с переходным лезвием, начиная со значения угла φ=60, сила P_z не уменьшается, а вновь возрастает. Это объясняется тем, что возрастает роль переходного дугового лезвия с радиусом r, на котором условия деформирования и срезания стружки значительно тяжелее, чем на главном лезвии. Продольные слои стружки, перемещаясь на передней поверхности в направлениях, перпендикулярных к переходному лезвию, мешают друг другу, увеличивают степень деформации срезаемого слоя, что, в конечном итоге, приводит к увеличению силы P_z. С увеличением радиуса закругления r возрастает и сила P_y, а сила P_x уменьшается

Изменение глубины резания t и подачи s влияет на изменения всех трех составляющих силы резания P_z, P_y, P_x. Чем больше глубина и подача, тем больше площадь поперечного сечения срезаемого слоя и объем деформируемого металла, тем больше сопротивление стружкообразованию и силы резания. Однако, влияние глубины резания и подачи на силы резания различно. Многочисленными экспериментами показано, что глубина резания на составляющие силы резания влияет сильнее, чем подача.

Изменение скорости резания влияет на составляющие силы резания так же, как оно влияет на коэффициент усадки стружки. При резании материалов, не образующих нарост, составляющие силы резания монотонно убывают при увеличении скорости резания. При резании материалов, образующих нарост, кривая 1 так же, как и кривая 2, немонотонна (рис.7.3). Начиная от скорости V_1 до скорости V_2, при которых высота нароста растет, сила P_z уменьшается, достигая минимума при максимально развитом нарасте. При скоростях резания от V_2 до V_3, при которых высота нароста уменьшается, сила P_z вновь возрастает. При скоростях резания, больших V_3, соответствующей исчезновению нароста, сила P_z непрерывно уменьшается.

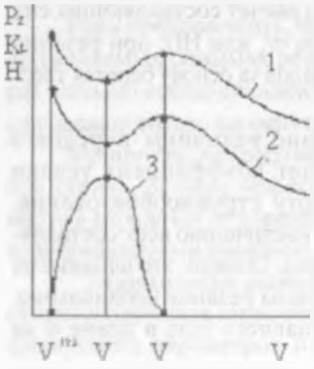


Рис. 7.3. Схема влияния скорости резания на высоту нароста (3), коэффициент усадки (2) стружки и силу резания (1).

Смазочно-охлаждающие технологические средства, применяемые при резании металлов, уменьшают трение, облегчают процесс стружкообразования и, следовательно, уменьшают силы резания, действующие на

резец. При этом, в большей степени снижаются горизонтальные проекции силы резания, в основном зависящие от силы трения.

Влияние различных факторов на силы резания достаточно сложно. Поэтому для расчетов необходимо иметь обобщенные формулы, в которых составляющие силы резания связаны со всеми факторами одновременно. Практика применения обобщенных формул показала, что параметры режима резания (V, S, t) наиболее удобно учитывать непосредственно, а остальные факторы - косвенно. В формулу вводят только те поправочные коэффициенты, которые учитывают влияние достаточно сильно действующих на силы факторов и определение которых в производственных условиях не связано со значительными трудностями. Так, например, формула для расчета главной составляющей силы резания имеет вид:

$$P_z = C_P t^{X_P} S^{Y_P} V^{Z_P} K_P \qquad (7.4)$$

где: K_p - обобщенный поправочный коэффициент, равный произведению поправочных коэффициентов, каждый из которых выражает влияние условий резания на величину силы P_z, не вошедшие в коэффициент C_p;

X_p, Y_p, Z_p - показатели степеней, учитывающие влияние параметров режима резания (t, S, v) на силу резания.

Все коэффициенты и показатели степеней определяются по табличным данным в справочниках по режимам обработки.

Глава 8

Точение

8.1. Основные виды точения и классификация резцов

Точение является основным способом обработки резанием наружных, внутренних цилиндрических, конических и фасонных, а также торцевых поверхностей тел вращения.

Точение осуществляется на токарных станках различных типов (универсальных, специальных, карусельных, револьверных, а также на металлорежущих станках с числовым программным управлением).

По своему характеру и технологическому назначению точение разделяется на: черновое точение, в процессе которого срезается большая часть припуска, получистовое точение, чистовое точение, тонкое или окончательное формообразующее точение.

Черновое или обдирочное точение проводят с целью уменьшения пространственных отклонений и погрешностей поковок, штамповок и отливок. После чернового точения точность заготовок соответствует 12-16 квалитетам, шероховатость обработанной поверхности R_a= 100-25 мкм. Получистовое точение обеспечивает точность по 11-13 квалитетам, шероховатость обработанной поверхности R_a= 50-12,5 мкм. Чистовую обработку проводят как окончательную или промежуточную под последующую отделку с целью получения 10-11 квалитетов точности и шероховатости R_a=12,5-0,63 мкм. Тонкое точение позволяет получить точность 6-7 квалитетов и шероховатости отработанной поверхности R_a= 1,25-0,32 мкм при использовании обычных резцов и при использовании алмазных резцов соответственно 5-й квалитет точности и шероховатость R_a= 0,04-0,016 мкм.

Процесс резания металла при точении осуществляется токарными резцами. Резец, закрепленный в резцедержателе суппорта станка, совершает продольные или поперечные поступательные движения подачи, а деталь, закрепленная в шпинделе станка, вращается. Основными технологическими операциями токарной обработки являются: обточка, обрезка, подрезка торцов, проточ-

Рис.8.1. Формы головок резца

ка наружных канавок, фасонная обточка, расточка внутренних поверхностей и проточка канавок, снятие фасок, нарезание наружной и внутренней резьб резцом и другие операции.

При точении наружные цилиндрические и конические поверхности обрабатывают проходными резцами, внутренние цилиндрические и конические поверхности растачивают расточными резцами, торцевые плоскости обрабатывают подрезными резцами, наружные и внутренние резьбы нарезают резьбовыми резцами, разрезку заготовок на части производят отрезными резцами.

Токарные резцы подразделяют по форме головки и направлению подачи, изогнутости головки, конструкции, сечению стержня, назначению, материалу рабочей части и т.д.

По форме головки и направлению подачи резцы подразделяют на правые и левые. Правыми (рис.8.1,а) называют такие резцы, у которых при наложении на них сверху ладони правой руки главное режущее лезвие оказывается расположенной на стороне большого пальца; левыми - такие резцы, у которых главное режущее лезвие также оказывается расположенным на стороне большого пальца, но уже при наложении ладони левой руки. Правые резцы работают с движением подачи справа налево, т.е. от задней бабки к шпинделю станка, и, наоборот, левые резцы имеют направление движения подачи слева направо - от шпинделя к задней бабке станка.

Резцы могут быть отогнутые вправо или влево (рис.8.1,б), изогнутые (рис.8.1,в), вверх или вниз и оттянутые (рис.8.1,г), вправо или влево. У изогнутых резцов ось резца изогнута в боковой проекции. У резцов с оттянутой головкой ширина головки обычно меньше ширины тела резца.

По конструкции различают: цельные резцы, когда головка и тело резца выполнены из одного материала; составные, когда головка, например, из быстрорежущей стали приварена встык к державке резца из малоуглеродистой стали; с припаянной пластинкой твердого сплава или быстрорежущей стали; резца с механическим креплением режущих пластинок из твердого сплава, минералокерамики и сверхтвердых материалов.

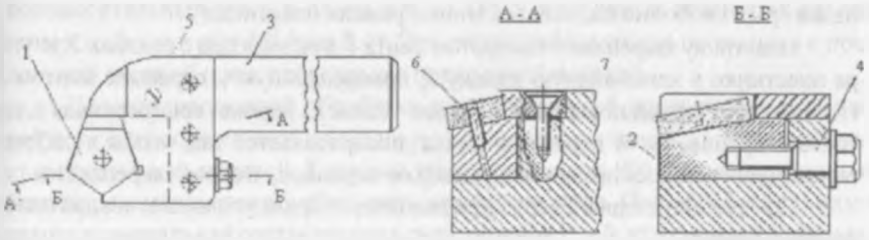


Рис.8.2. Токарный проходной резец с механическим креплением неперетачиваемой многогранной пластинки

В настоящее время обработка деталей на токарных станках ведется преимущественно резцами, режущая часть которых оснащена стандартными пластинками из твердых сплавов. Имеется две группы твердосплавных пластин. Пластины одной группы предназначены для оснащения резцов, которые после достижения установленного износа подвергаются переточке. Пластины другой группы, имеющие форму с несколькими рабочими вершинами, после износа лезвия на одной вершине, поворотом устанавливают в новое рабочее положение и обработку производят лезвием следующей вершины. Пластинки этой группы называются многогранными неперетачиваемыми пластинками.

Резцы со сменными многогранными твердосплавными пластинками наиболее широко используются на станках с числовым программным управлением. Конструкции резцов отличаются типом, формой, видом узла крепления пластинки и державки, формой используемых пластинок.

Ассортимент сменных многогранных пластинок, используемых в резцах весьма разнообразен: правильные многогранники, ромбы, круги, прямоугольники и параллелограммы, а также пластинки специальных форм для обработки канавок и галтелей, для обрезки и др.

Твердосплавные пластинки прикрепляют к державкам резцов пайкой с помощью припоев из латуни или красной меди. Материал державки и твердые сплавы имеют различные значения температурного коэффициента расширения. Поэтому после пайки, в процессе охлаждения, твердосплавная пластинка и державка резца начинают испытывать касательные напряжения вдоль паянного шва, что может вызвать появление микротрещин в пластинке. Механическое крепление надежно удерживает пластины в специальных гнездах, не вызывая опасных для хрупкого твердого сплава внутренних напряжений. Для различных условий обработки разработано большое количество вариантов конструкций механического крепления твердосплавных пластинок.

Твердосплавная пластинка *1* (рис.8.2), механически прикрепляемая к державке резца, должна иметь точно обработанную нижнюю опорную плоскость. Резец состоит из державки *3*, столбика *2* с впрессованным штифтом *6*, на который свободно надевается многогранная пластинка *1*.

Пластинку закрепляют поворотом винта *4*, втягивающего столбик *2* до упора пластинки в клиновидную планку *5*, прикрепленную к державке винтом *7*. После износа задней поверхности лезвия одной из вершин многогранная пластинка открепляется от державки резца, поворачивается так, чтобы в рабочем положении оказалось лезвие следующей ее вершины, и снова закрепляется.

По сечению стержня державки различают прямоугольные, квадратные и круглые резцы.

По назначению различают проходные, подрезные, отрезные, расточные, галтельные, фасонные и резьбовые резцы.

Проходные прямые (рис.8.3) и отогнутые (рис.8.4) резцы применяют для обработки наружных цилиндрических и конических поверхностей. Значение

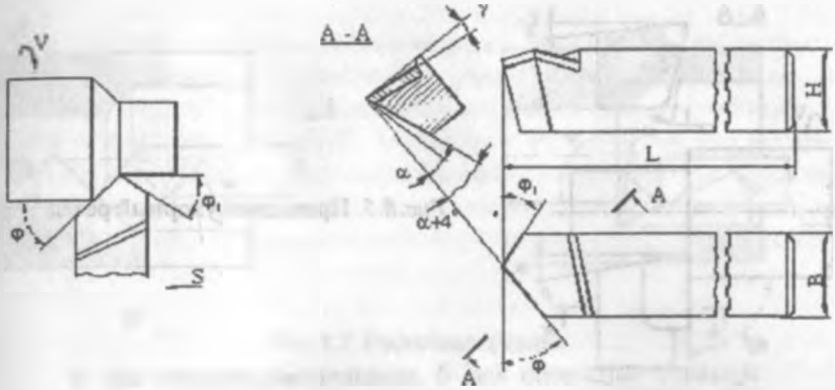


Рис.8.3. Токарный проходной прямой резец

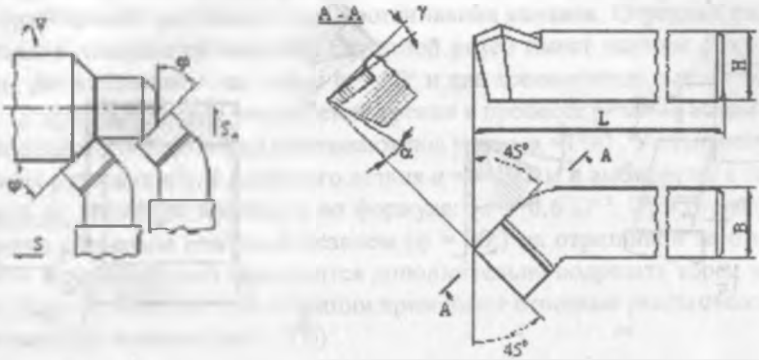


Рис.8.4. Токарный проходной отогнутый резец

геометрических и конструктивных элементов этих резцов выбирают по нормалям и ГОСТ, исходя из условий обработки.

Для прямых резцов (рис.8.3) обычно главный угол в плане $\varphi = 45\text{-}60^{\circ}$, а вспомогательный уголь в плане $\varphi_1 = 10\text{-}15^{\circ}$. У проходных отогнутых резцов углы в плане $\varphi = \varphi_1 = 45^{\circ}$ (рис.8.4). Эти резцы работают как проходные с продольной подачей и как подрезные с поперечной подачей.

Для одновременной обработки цилиндрической поверхности и торцевой плоскости применяют проходные упорные резцы (рис.8.5). Резец работает с продольной подачей. Главный угол в плане $\varphi = 90^{\circ}$. Таким проходным резцом рекомендуется обрабатывать нежесткие валы. При обработке такими резцами радиальная составляющая сила резания $P_y = 0$, что снижает деформацию заготовки. Подрезные резцы применяют для подрезания торцов заготовок. Они работают с поперечным движением подачи инструмента по направлению к центру (рис.8.6,а) или от центра (рис.8.6.,б) заготовки.

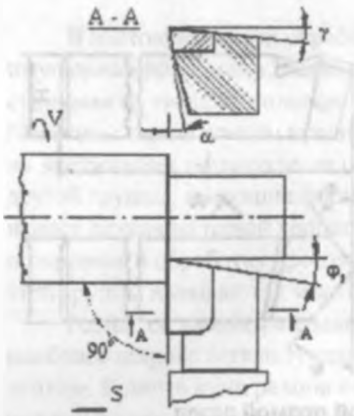


Рис.8.5. Проходной упорный резец

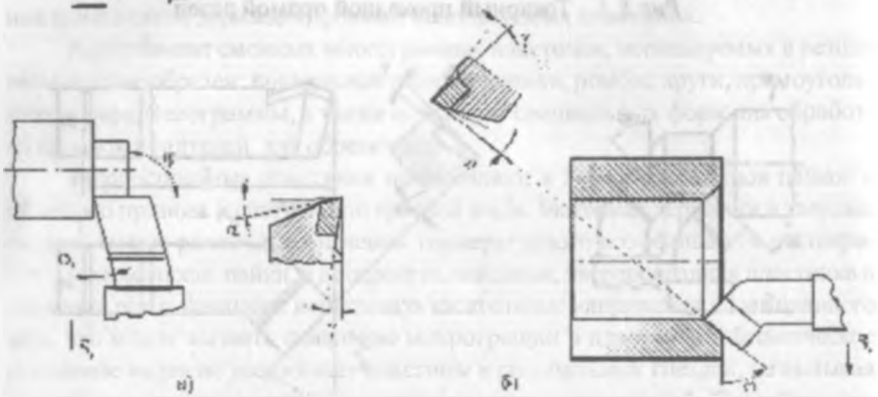
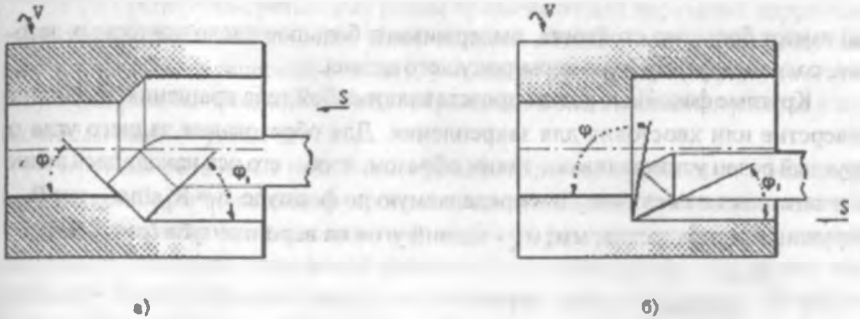


Рис.8.6. Токарные подрезные резцы:
а - с движением подачи к центру заготовки,
б - с движением подачи от центра заготовки

Расточные резцы применяют для растачивания отверстий, предварительно просверленных или полученных литьем или штамповкой. Применяют два типа расточных резцов: проходные - для сквозного растачивания (рис.8.7,а) и упорные - для глухого растачивания (рис.8.7,б).

Резцы различаются формой лезвия. У проходных расточных резцов главный угол в плане $\varphi = 45\text{-}60°$, а у упорных - главный угол в плане несколько больше 90°. Крепежная часть расточных резцов имеет конусную форму с диаметром, увеличивающимся от лезвия к зажимной части, которую делают квадратной или прямоугольной. Расточные резцы работают при больших вылетах из резцедержателя, что не позволяет стержневому резцу снимать стружку с большой площадью поперечного сечения. При растачивании глубоких отверстий применяют расточные резцы, закрепленные в специальных оправках



а) б)

Рис.8.7. Расточные резцы:
а - для сквозного растачивания, б - для глухого растачивания

Отрезные резцы применяют для разрезания заготовок на части, отрезания обработанной заготовки и для протачивания канавок. Отрезные резцы работают с поперечной подачей. Отрезной резец имеет главное режущее лезвие, расположенное под углом $\varphi = 90°$ и две вспомогательные с углами $\varphi_1 = 1...2°$ (рис.8.8,а). Для уменьшения трения в процессе резания вспомогательные задние поверхности затачивают под углом $\varphi_1 = 1°30'$. У стандартных отрезных резцов ширина режущего лезвия $a = 3\text{-}10$ мм и выбирается в зависимости от диаметра заготовки по формуле: $a = 0{,}6\ D^{0.5}$. При отрезании заготовки с прямым режущим лезвием ($\varphi = 90°$) на отрезанной заготовке остается шейка, поэтому приходится дополнительно подрезать торец заготовки. Для исключения этой операции применяют отрезные резцы с наклонным режущим лезвием (рис.8.8,б).

Фасонные резцы применяют для обработки коротких фасонных поверхностей с длиной образующей длин до 30-40 мм. Форма режущего лезвия фасонного резца соответствует профилю детали. Фасонные резцы применяют в крупносерийном массовом производстве. Точно рассчитанные и изготовленные фасонные резцы обеспечивают высокую производительность, малые отклонения формы и размеров изготовляемых деталей. По конструкции фасонные резцы подразделяют на: круглые и призматические, а по направлению движения подачи - на радиальные и тангенциальные. Круглые призматические фасонные рез-

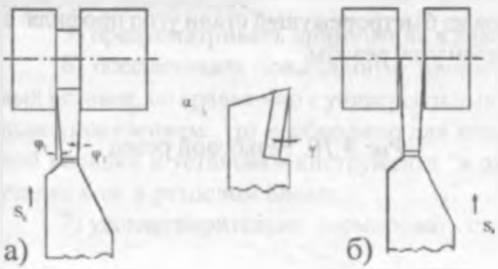


Рис.8.8. Отрезные резцы:
а - с прямым режущим лезвием,
б - с наклонным режущим

цы имеют большую стойкость, выдерживают большое число повторных заточек, сохраняя форму и размеры режущего лезвия.

Круглые фасонные резцы представляют собой тела вращения, имеющие отверстие или хвостовик для закрепления. Для образования заднего угла α круглый резец устанавливают таким образом, чтобы его ось находилась выше оси заготовки на величину h, определяемую по формуле $h = R_н \sin\alpha_в$, где $R_н$ - наружный радиус резца, мм; $\alpha_в$ - задний угол на вершине зуба (рис.8.9,а).

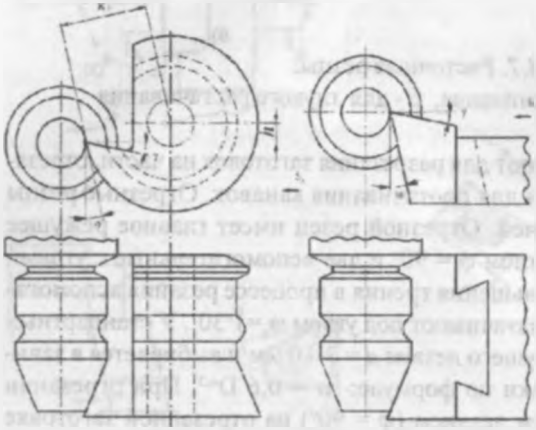


Рис.8.9. Фасонные резцы: а-круглый, б - призматический радиальный

Призматические фасонные резцы, работающие с радиальным движением подачи, устанавливают по отношению к заготовке с наклоном под углом α, который является задним углом резца. Вершину резца устанавливают строго по центру заготовки.Резьбовые резцы (рис.8.10) служат для нарезания наружной и внутренней резьбы любого профиля: прямоугольного, треугольного, трапецеидального. Форма режущих лезвий резьбовых резцов соответствует профилю и размерам поперечного сечения нарезаемых резьб. Резьбовые резцы подразделяют на стержневые, круглые и призматические. Угол профиля (угол при вершине в плане) ε у твердосплавных резьбовых резцов затачивают на 30' меньше, чем профиль резьбы, так как нарезание резьбы при высоких скоростях резания приводит к некоторому разваливанию ее профиля. У резцов из быстрорежущей стали угол профиля ε равен углу резьбы.

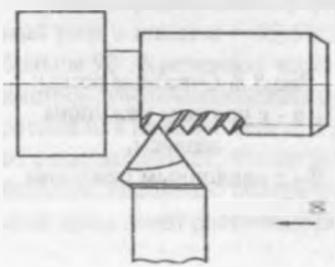


Рис.8.10. Резьбовой резец

Призматические резьбовые резцы применяют для нарезания наружных треугольных резьб с небольшим углом подъема витков. Такой резец представляет собой призматический столбик, имеющий в сечении профиль соответствующей резьбы. Столбик (резец) закрепляют в специальной державке с постоянным задним углом $\alpha = 15°$.

Круглые резьбовые резцы или гребенки широко применяют в условиях крупносерийного и массового производства. Резьбовые гребенки представляют собой объединение нескольких резьбовых резцов с профилем, соответствующим профилю нарезаемой резьбы. Первые два резца, срезанные под углом $\varphi = 25\text{-}30°$, образуют режущую (заборную) часть, остальные - калибрующую часть. Гребенка обеспечивает более равномерную нагрузку между резцами (витками гребенки) и требует использования меньшего количества проходов при нарезании резьбы, что существенно повышает производительность процесса.

8.2. Резцы для станков с числовым программным управлением

Резцы для станков с ЧПУ имеют определенные типовые конструкции. Все они являются сборными и оснащаются многогранными пластинками из твердого сплава, минералокерамики или сверхтвердых материалов. Резцы для станков с ЧПУ должны отвечать следующим требованиям:

1) максимально использовать неперетачиваемые пластины, механически закрепленные на корпусе инструмента, что обеспечивает постоянство его конструктивных и геометрических параметров в процессе эксплуатации;

2) использовать наиболее рациональные формы пластин, обеспечивающих универсальность инструмента, т.е. позволять обрабатывать одним резцом максимальное число поверхностей детали;

3) позволять систематизацию основных присоединительных размеров инструмента: резцы с различными углами в плане должны иметь одни и те же основные координаты, что создает удобство для программирования технологических операций;

4) допускать возможность работы всех инструментов в прямом и перевернутом положениях;

5) предусматривать применение в левом исполнении;

6) обеспечивать повышенную точность инструмента, особенно резцовых вставок, по сравнению с универсальным инструментом для станков с ручным управлением: это необходимо для повышения точности предварительной наладки и установки инструмента "в размер" после его закрепления на станке или в резцовом блоке;

7) удовлетворительно формировать стружку и отводить ее по канавкам,

образованным в процессе прессования и спекания твердого сплава или выточенным алмазным кругом на передних поверхностях пластин.

В комплект инструмента для токарных станков с ЧПУ обычно входят следующие резцы (рис.8.11).

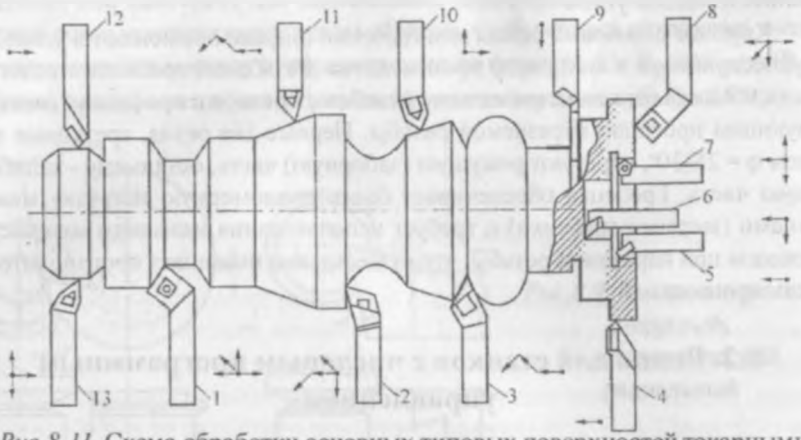


Рис.8.11. Схема обработки основных типовых поверхностей токарными резцами со сменными многогранными пластинами на станке с ЧПУ:

1 - резцы проходные отогнутые правые с $\varphi = 45°$ для патронной обработки деталей типа фланцев, которые обеспечивают наружную обточку, проточку торцов, проточки выточек, снятие фасок;

2 - резцы контурные с параллелограммными пластинами с $\varphi = 93...95°$, которые позволяют производить обточку деталей по цилиндру и конусу, протачивать обратный конус, обрабатывать радиусные поверхности, галтели и протачивать торцы движением от центра детали к наружному диаметру;

3 - резцы контурные с параллелограммными пластинами с $\varphi = 63°$, которые позволяют производить обработку полусферических поверхностей и конусов;

4 - резцы резьбовые с ромбическими пластинами, закрепленные сверху при помощи прихвата. Резцы позволяют нарезать резьбы с шагом от 2 до 6 мм. Угол профиля обеспечивается формой пластины;

5 - резцы резьбовые для нарезания внутренних резьб. Позволяют нарезать резьбы с шагом до 2 мм с близким подходом к торцу;

6 - резцы с ромбическими пластинами с $\varphi = 95°$ для растачивания сквозных отверстий и проточки канавок;

7 - резцы расточные с $\varphi = 92°$, позволяющие растачивать отверстия диаметром от 22 мм и более;

8 - резцы проходные с $\varphi = 45°$ и квадратными пластинами, левые для

наружной обточки, проточки торцов деталей, проточки выточек, снятие фасок;

9 - резцы для проточки наружных прямых канавок шириной от 1 до 6 мм с глубиной, равной ширине. Пластины специальной формы закрепляются с помощью прихватов;

10 - резцы контурные с пластиной трехгранной правильной формы с $\varphi = 93°$, которые позволяют протачивать цилиндрические и фасонные поверхности. Достоинство их в том, что в них используются три рабочие вершины по сравнению с двумя у резцов с параллелограммными пластинами. Однако при этом жест-кость крепления пластин снижается;

11 - резцы контурные с пластиной трехгранной формы с $\varphi = 63°$;

12 - резьбовые резцы для нарезания наружных резьб с шагом до 2 мм. Режущая прямоугольная пластина закрепляется на державке с помощью прихвата. Профиль вершины резца обеспечивается заточкой пластин под углом, равным углу профиля резьбы;

13 - резцы проходные упорные с трехгранной пластиной неправильной формы с φ=93-95°, которые позволяют протачивать ступенчатые поверхности, фаски, торцы движением от наружного диаметра к центру детали.

На станках с ЧПУ применяют три исполнения резцов: 1) полномерные, 2) резцы-вставки, 3) укороченные с регулированными элементами.

Полномерные резцы всех исполнений достаточно широко используют в производстве на станках со съемными инструментальными блоками (в них инструмент настраивается вне станка) или с суппортами (рис.8.12,а).

Резцы-вставки, как и полномерные резцы, конструктивно могут быть выполнены с пластиной любой формы. Наличие винта в торце вставки позволяет достаточно просто отрегулировать вылет резца (рис.8.12,б).

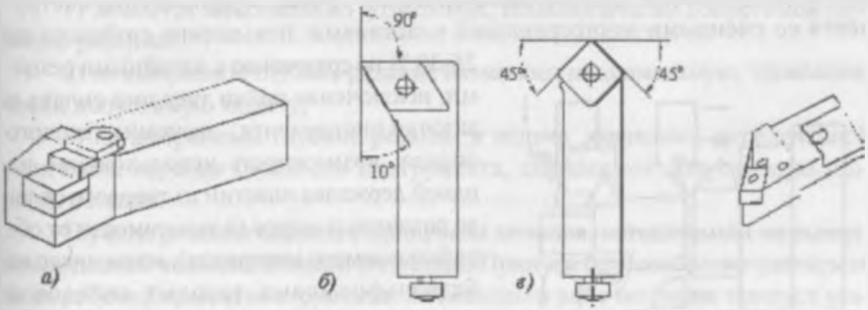


Рис.8.12. Токарные резцы: а - полномерный проходной, б - резец-вставка с регулировочным винтом, в - укороченный резец-вставка.

Унифицированные укороченные резцы-вставки закрепляют на оправках в самых разнообразных сочетаниях. Существует несколько конструктивных исполнений резцовых вставок с различными углами в плане, параметрами

пластин и методами их закрепления на корпусах: призматические без регулировочных винтов, с винтами для поперечного и осевого регулирования и др.

Для подналадки расточных резцов с точностью 0,05-0,01 мм на диаметр применяют резцы-вставки с микрометрическим регулированием вылета (рис.8.13). Такую вставку устанавливают в гнездо расточной оправки.

Державка *6* с закрепленным резцом *5* перемещается во время "наладки на размер" во втулке *8* при вращении лимба *7*. Шпонка *4* предотвращает поворот державки. Для устранения зазоров в сопряжениях имеется комплект тарельчатых пружин *3*, размещенный в выточке втулки *8*. Пружины упираются в буртик втулки *1*, ввернутой в державку, и стремятся сдвинуть ее вниз. Винт *2* служит для грубой наладки резца на размер. Тонкая наладка достигается поворотом лимба с ценой деления 0,01 мм. На торце втулки *8* имеется нониус, позволяющий отсчитывать перемещения резца с точностью 1 мкм. При изменении размера более, чем на 0,5 мм, используют винт *2*.

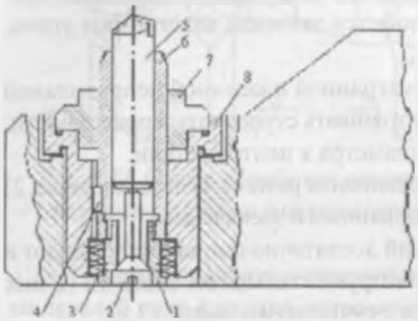


Рис.8.13. Микрометрическая вставка в расточную оправку.

В практике стремятся ограничить номенклатуру резцов, используя для разных видов точения державки с единой формой пластины (рис.8.14).

При правильной организации инструментального производства достигается значительный технико-экономический эффект от применения инструмента со сменными многогранными пластинами: повышение стойкости на 25-30 % по сравнению с напайными резцами, исключение пайки твердого сплава и заточки инструмента, экономия твердого сплава, возможность использования на одной державке пластин из твердого сплава различных марок (в зависимости от обрабатываемого материала), в том числе из безвольфрамовых твердых сплавов и

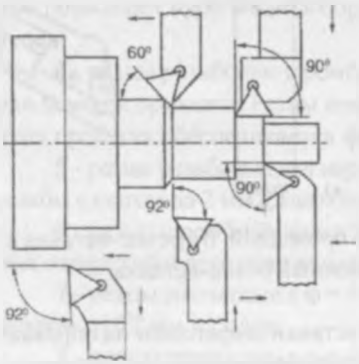


Рис.8.14. Схема применения резцов с пластинами треугольной формы.

многогранных пластин с износостойкими покрытиями, постоянство рабочей высоты при повороте или смене пластины, постоянство длины режущего лезвия, постоянство координат рабочей вершины и режущих лезвий относительно опорных поверхностей.

8.3. Последовательность выбора режимов резания

Совокупность значений глубины резания, подачи, скорости резания и периода стойкости инструмента составляет режим резания. Режимы резания будут рациональны, если при выполнении всех требований, предъявляемых к качеству обрабатываемой детали, они обеспечивают при минимальной себестоимости операции максимально возможную для данной себестоимости производительность. Параметры режима резания взаимосвязаны и поэтому нельзя произвольно изменять хотя бы одного из них, не изменяя соответствующим образом всех прочих. При выборе и назначении режимов необходимо производить соответствующее согласование значений всех параметров с учетом возможности их реализации на используемом металлорежущем станке.

Сформулированы основные положения последовательности назначения элементов режима резания. Для повышения производительности, при заданном периоде стойкости инструмента, необходимо работать с возможно большей площадью сечения срезаемого слоя $t \times S$ и соответствующей этому сечению скорости резания. При выбранной площади сечения срезаемого слоя необходимо увеличивать глубину резания за счет уменьшения подачи.

Таким образом, при назначении режима резания:

1) задаются максимально возможной, технологически допустимой глубиной резания;

2) по выбранной глубине резания назначают максимальную, технологически допустимую подачу;

3) по выбранным глубине резания и подаче, задавшись определенной величиной периода стойкости инструмента, определяют допускаемую скорость резания.

Глубина резания связана с припуском металла, оставляемым на выполнение данной технологической операции. Припуск целесообразно удалять за один рабочий проход инструмента. За несколько рабочих ходов припуск удаляют при повышенных требованиях к точности размеров и качеству обработанной поверхности и при недостаточной мощности станка.

При черновой обработке, в зависимости от размеров и способа изготовления заготовки, припуск может быть более 7 мм. При превышении некоторых критических значений глубины резания могут возникнуть вибрации всей технологической системы СПИД (станок - приспособление - инструмент - деталь), поэтому, при припуске более 7 мм его срезают за два или более прохо-

дов, причем глубина резания на каждом проходе может быть одинакова или ее последовательно уменьшают.

При получистовой обработке припуск изменяется в пределах 0,5-5 мм. При чистовой обработке припуск составляет не более 0,5 мм.

Для повышения производительности механической обработки целесообразно назначать максимально допустимую подачу. Максимально допустимая подача, как правило, ограничивается: эффективной мощностью или крутящим моментом станка, прочностью слабого звена механизма подачи станка, жесткостью обрабатываемой заготовки, прочностью и жесткостью инструмента, шероховатостью обработанной поверхности.

При черновой обработке подачу выбирают в пределах S =0,4-0,7 мм/об., но при этом она обязательно проверяется по прочности деталей механизма подачи станка, а иногда по прочности и жесткости заготовки.

При получистовой обработке подачу назначают в пределах
S = 0,1-0,4 мм/об.

При чистовой обработке подача определяется в зависимости от заданной точности и шероховатости обработанной поверхности. В этом случае подачу рассчитывают по формуле:

$$S = C_s R_z^{\ y} r_B^{\ u} / t^x \varphi^r \varphi_1^{\ z}, \qquad (8.1)$$

где: C_s - коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, R_z -параметр шероховатости обработанной поверхности; r_B - радиус закрепления при вершине резца; *x, y, z, u* - показатели степеней.

Рассчитанную или выбранную подачу корректируют по паспортным данным станка согласно условию $S \le S_{паспортное}$.

Выбрав, таким образом, глубину резания и подачу, определяют скорость резания по уравнению:

$$v = \frac{C_v}{T^m t^x \cdot S^{y_v} (HB/200)^n} K_v, \qquad (8.2)$$

где: C_v - коэффициент, учитывающий характер и условия обработки; T - стойкость резца, которая назначается согласно рекомендациям справочных материалов в зависимости от характера выполняемой операции и инструментального материала; H_B-твердость обрабатываемого материала, которая берется отношением HB/200 для того, чтобы члены уравнения (8.2) имели сопоставимые по порядку числовые значения, поскольку отношение HB/200 мало отличается от единицы; K_v - поправочный коэффициент на условия обработки; m-показатель относительной стойкости; x_v, y_v, n_v - показатели степеней.

По рассчитанной скорости резания $V_{расч}$, для заданного диаметра обрабатываемой заготовки D, определяют частоту вращения шпинделя станка по уравнению $n = 1000\ v/\pi D$, *об/мин*.

ных процессов, в том числе и при автоматизированном управлении процессом резания и в проектировании его технологической подготовки.

При оптимизации процесса обработки резанием выделяют следующие основные разделы, соответствующие традиционной классификации моделей в математическом программировании: 1) линейное программирование, когда целевая функция (или критерий оптимизации) линейна, а множество, на котором ищется экстремум целевой функции, задается системой линейных равенств неравенств; 2) нелинейное программирование, когда целевая функция и ограничения нелинейны; 3) целочисленное программирование, когда на переменные накладываются условия целочисленности.

Математическая постановка задачи выбора оптимальных управляемых параметров процесса резания как задачи линейного программирования состоит:

$$\text{найти} \quad \min \sum_{i=1}^{n} c_i x \tag{8.5}$$

при выполнении ограничений $x_i \geq 0, \left(i = \overline{1,n}\right)$ (8.6)

$$\sum_{i=1}^{n} a_{ij} x_i \geq b_j, \left(j = \overline{1,m}\right) \tag{8.7}$$

где: n - число управляемых параметров или переменных, m - число ограничений задачи, a_{ij} и b_j - константы.

Рассмотрим задачу оптимизации процесса резания на примере расчета режима резания продольного точения, приняв в качестве критерия оптимальности основное технологическое время обработки, которое должно быть минимальным.

Для того, чтобы $t_o = \frac{L}{nS}$ было минимальным, необходимо иметь произведение nS максимальным. Поэтому в качестве оценочной может быть принята функция

$$f = nS = max \tag{8.8}$$

Ограничения представляют собой степенные функции с коэффициентами управляемых параметров процесса:

1) режущая способность резца

$$V = \frac{C_v K_v}{T^m t^{X_v} S^{y_v}} = \frac{\pi D n}{1000} \quad \text{отсюда} \quad nS^{y_v} = \frac{318 C_v K_v}{D T^m t^{X_v}} \tag{8.9}$$

2) эффективная мощность станка

$N_e = \frac{P_z V}{6120} \le N_{ecm}$, выразив скорость резания через D и n, получим:

$$\frac{C_p K_p t^{X_p} S^{Y_p} \pi D n}{6120 \cdot 1000} \le N_{ecm}, \text{ отсюда } nS^{Y_p} = \frac{195 \cdot 10^4 N_{ecm}}{C_p K_p D t^{X_p}} \qquad (8.10)$$

3) допускаемая высота шероховатостей обработанной

поверхности $R_z = \frac{C_R t^{X_R} S^{Y_R} \varphi^{Z_R} \varphi_1^{Z_R}}{r_R^{q_R}} \le R_{zdop}$ отсюда $S^{Y_R} \le \frac{R_{zdop} r^{q_R}}{C_t t^{X_R} (\varphi\varphi_1)^{Z_R}}$ (8.11)

4) максимальная сила, допускаемая прочностью звена механизма подач станка $P_x = C_{p_x} K_{p_x} t^{X_{p_x}} S^{Y_{p_x}} \le P_{max}$ отсюда

$$S^{y_{p_x}} \le \frac{P_{max}}{C_{p_x} K_{p_x} t^{X_{p_x}}} \qquad (8.12)$$

5) минимальная подача станка $S \ge S_{cm\,min}$ (8.13);

6) максимальная подача станка $S \le S_{cm\,max}$ (8.14);

7) минимальное число оборотов шпинделя станка

$n \ge n_{cm\,min}$ (8.15);

8) максимальное число оборотов шпинделя станка

$n \le n_{cm\,max}$ (8.16);

Чтобы систему ограничений и оценочную функцию преобразовать в задачу линейного программирования, необходимо прологарифмировать правые и левые части (12.8)-(12.16). В результате получим:

$f = \ln\eta + \ln S = \max$; $\ln\eta + Y_v \ln S = \ln \frac{318 C_v K_v}{D T^m t^{X_v}}$;

$\ln\eta + y_p \ln S \le \frac{195 \cdot 10^4 N_{max}}{C_{p_z} K_{p_z} D t^{X_{p_z}}}$; $Y_R \ln S \le \ln \frac{R^{z_{dop}} r^{q_2}}{C_R t^{X_R} (\varphi\varphi_1)^{Z_R}}$;

$$Y_R \ln S \le \ln \frac{P_{max}}{C_{p_x} K_{p_x} t^{X_{p_x}}}$$

$$\ln S \le \ln S_{cm\,min}$$

$$\ln S \le \ln S_{cm\,max}$$

$$\ln n \le \ln n_{cm\,min}$$

$$\ln n \le \ln n_{cm\,max}$$

Обозначив $\ln n = x_1$, $\ln S = x_2$ и правые части выражений через $в$ с соответствующими индексами, получим математическую модель оптимального режима резания:

$$f = X_1 + x_2 = \max \qquad (8.17)$$

$$\begin{aligned}
&x_1 + y_v x_2 = в_1 \\
&x_1 + y_p x_2 \le в_2 \\
&y_R x_2 \le в_3 \\
&y_{p_x} x_2 \le в_4 \\
&x_2 \ge в_5 \\
&x_2 \le в_6 \\
&x_1 \ge в_7 \\
&x_1 \le в_8
\end{aligned} \qquad (8.18)$$

Проектирование реальных операций обработки резанием необходимо проводить последовательно в следующие несколько этапов: назначение инструмента (материала режущей части и геометрических параметров), разбиение общего припуска на каждый рабочий ход и назначение технологических требований для каждого из этих рабочих ходов, определение оптимальных режимов для каждого рабочего хода с помощью решения ряда задач линейного программирования.

Геометрическая интерпретация математической модели оптимального режима резания показана на рис.8.15. В координатной системе x_1, x_2 линии I-VIII соответственно изображают уравнения ограничивающих зависимостей. При пересечении они дают число точек i, определяемое числом сочетаний из восьми элементов по двум с вычетом четырех точек за счет невозможности пересечения параллельных прямых $i = C^2_8 - 4$.

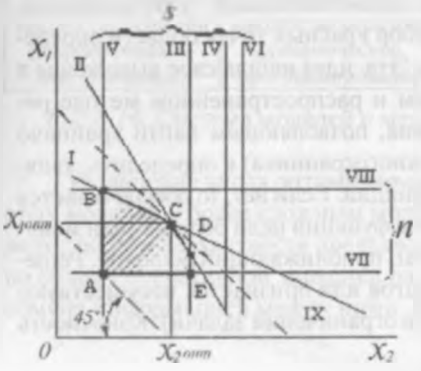


Рис.8.15. Допустимая область назначения оптимизируемых параметров при обработке резанием.

В числе этих точек имеются такие, которые удовлетворяют всем уравнениям поставленных ограничений. Штрихо-

вой линией IX, наклоненной к оси абсцисс под углом 45°, изображена оценочная функция, подлежащая оптимизации. Если система ограничений не противоречива, то область возможных решений системы в координатах x_1, x_2, очерчена выпуклым многогранником. Координаты вершин многогранника являются корнями совместного решения уравнений системы, а точки, лежащие внутри многогранника, удовлетворяют всем ограничениям. Чтобы найти оптимальное решение среди многих решений системы ограничений, необходимо среди точек многогранника найти такие, для которых линейная форма оценочной функции будет иметь максимальное значение. Пусть, например, многогранником решений является заштрихованный многогранник *ABCDE*. Он ограничен линиями минимального числа оборотов шпинделя и минимальной подачи, линией подачи, допускаемой высотой шероховатостей обработанной поверхности, линиями режущей способности резца и эффективной мощности станка. Перемещая прямую IX от начала координат параллельно самой себе до точки А многогранника, линейная форма оценочной функции будет иметь минимальное значение. При дальнейшем перемещении линейная форма будет расти и достигнет максимума в точке С, координаты которой $x_{1\,опт}$ и $x_{2\,опт}$, таким образом, будут соответствовать оптимальному решению системы

При решении задачи с помощью ЭВМ, прежде всего, определяют координаты x_1 и x_2 всех точек пересечения прямых по формулам для корней системы уравнений. Далее выясняют, какие из значений x_1 и x_2 удовлетворяют всем уравнениям ограничений системы. В заключение определяют координаты многогранника, для которой их сумма имеет максимальную величину:

$$x_{1\,опт} + x_{2\,опт} = \max$$

Так как $x_{1\,опт} = \ln n_{опт}$, $x_{2\,опт} = \ln S_{опт}$

то $n_{опт} = e^{x_{1\,опт}}$, $S_{опт} = e^{x_{2\,опт}}$

Чаще всего нахождение экстремума задачи линейного программирования предусматривает направленный перебор красных точек области определения задачи или вершин многогранника. Эта идея нашла свое выражение в симплекс-методе, наиболее обработанном и распространенном методе решения задач линейного программирования, позволяющем найти крайнюю точку допустимой области (или вершину многогранника) и определить, является ли она точкой экстремума целевой функции. Если нет, то обеспечивается переход в соседнюю вершину, где значение функции цели больше (или меньше) предыдущего. Тем самым делается шаг, приближающий решение. Решение задач находится за конечное число шагов или признается несуществующим (например, в случае несовместимости ограничений задачи). Конечность

метода поиска экстремума для задачи линейного программирования является важной его особенностью, так как методы решения более сложных задач, например, нелинейного программирования не являются конечными, а, следовательно, могут давать только приближенные решения.

На практике не все зависимости, входящие в модель процесса, можно представить в виде (8.8)-(8.16). И если хотя бы одна из функций отлична от степенной, то модель относится уже к модели нелинейного программирования. В частности, если методами регрессионного анализа мы получаем полином второго порядка для одной из функций (8.8)-(8.16), то получим задачу нелинейного программирования.

В математическом отношении оптимальное проектирование, в основном, сводится к задачам нелинейного программирования. Этот класс задач значительно шире, но и сложнее задач линейного программирования. Методы их решения относятся к поисковым (итерационным) методам.

Рис.8.16. Система моделей и методов оптимизации процесса резания

Увеличение числа оптимизируемых параметров и переход от более простых моделей к более сложным моделям оптимизации процесса резания наряду с ростом адекватности предъявляет все более высокие требования к ЭВМ по объему оперативной внешней памяти на магнитных носителях, скорости обмена информацией между ними, по числу операций в единицу времени.

Таблица 8.1

Применение ЭВМ для задач управления процессом резания

Тип задачи	Число переменных (размерность задачи)	Объем оперативной памяти, Кбайт									
		микро ЭВМ		мини-ЭВМ					ЕС ЭВМ		
		32	56	32	64	124	248	512	512	1024	более 1024
Расчет режимов по нормативам											
Линейное программирование	До 2										
	До10										
	До 30										
Нелинейное программирование	До 2										
	До 10										
	До 30										
Диагностирование в режиме реального времени	2										
	Свыше 2										
Оптимальное управление	До 2 фазовых координат и 10 переменных										
	Свыше 2 фазовых координат и 10 переменных										
Стохастическое программирование	До 5										
	Свыше 5										
Стохастическое оптимальное управление	До 2 фазовых координат и 5 переменных										
	Свыше 2 фазовых координат и до 5 переменных										

Предлагается [11] такая примерная схема применения ЭВМ различных классов для решения различных задач управления (табл.8.1):

На микро ЭВМ индивидуального пользования с объемом оперативной памяти до 64 Кбайт производится назначение режимов резания с использованием нормативных материалов, т.е. расчеты по формулам, а также выбор оптимальных режимов резания по модели линейного программирования, содержащей не более трех переменных.

Задачи оптимизации процесса резания, решаемые как задачи нелинейного программирования (с числом переменных не более 10), а также задачи диагностирования, решаемые в режиме реального времени, могут быть решены на мини ЭВМ с объемом оперативной памяти не менее 512 Кбайт.

Задачи оптимального управления процессом резания или задачи нелинейного программирования с числом управляемых переменных более 10, а также задачи стохастического программирования и стохастического оптимального управления желательно решать на машинах единой серии с объемом оперативной памяти не менее 512 Кбайт с высоким быстродействием.

Глава 9

Сверление

9.1. Назначение и основные типы сверл

Сверление - основной и широко распространенный в машиностроении технологический процесс обработки отверстий. Сверление используют для получения глухих и сквозных отверстий в сплошном материале обрабатываемых заготовок. Просверленные отверстия, как правило, не имеют абсолютно правильной цилиндрической формы. В поперечном сечении они имеют форму овала, а в продольном - небольшую конусность.

Диаметры полученных отверстий всегда больше диаметра сверла, которым они просверлены. Разность диаметров сверла и просверленного им отверстия, которая составляет около 1 % диаметра сверла, называют разбивкой отверстия. Причиной разбивки отверстий являются несимметричная заточка сверл и несоосность сверла и шпинделя сверлильного станка.

Сверление отверстий без дальнейшей их обработки используют обычно для болтовых соединений либо для последующего нарезания резьбы

По конструктивным признакам сверла делят на перовые (рис.9.1), спиральные (рис.9.2), для глубокого сверления (рис.9.3), центровочные (рис.9.4) и специальные (рис.9.5).

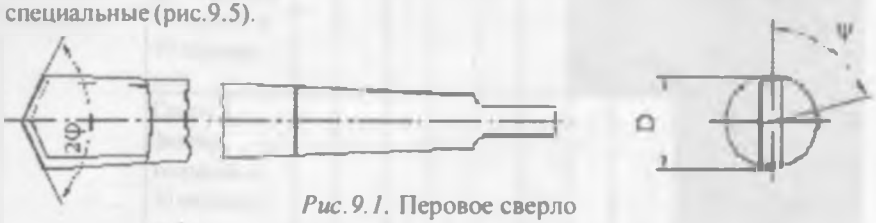


Рис.9.1. Перовое сверло

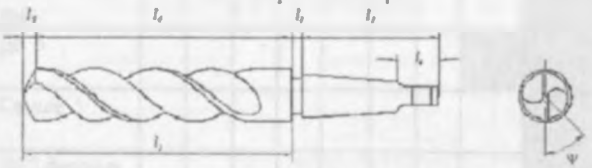


Рис.9.2. Спиральное сверло

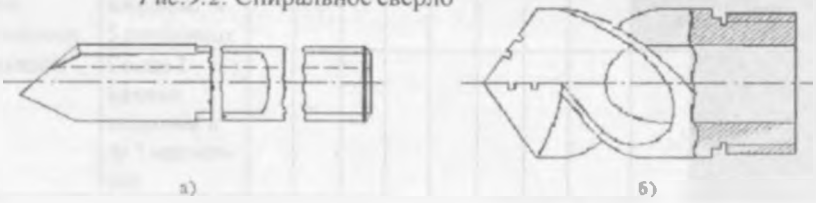


Рис.9.3 Сверла для глубокого сверления

Рис.9.4. Центровочное сверло

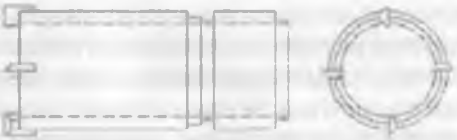


Рис.9.5. Кольцевое сверло

Перовые сверла просты по конструкции, но вследствие малой производительности, низкой точности получаемых отверстий, плохих условий отвода стружки их применяют редко.

Центровочные сверла применяют для образования центровых отверстий диаметром от 1-10 мм в деталях.

Для глубокого сверления (l >10D) применяют специальные сверла. Глубокие отверстия с осью, имеющей малое отклонение от прямолинейности, получают сверлами однокромочного резания с вершиной, смещенной относительно оси (ружейное сверло) (рис.9.3,а). Такое смещение в процессе сверления образует встречный конус. Это, а также то, что сверло опирается направляющими пластинами на боковую поверхность отверстия, обеспечивает малое отклонение от прямолинейности его оси. По отверстию в рабочей части сверла подается смазочно-охлаждающая технологическая среда, которая на обратном пути, по наружной канавке сверла, удаляет стружку. Применяют также однокромочные и двухкромочные сверла, в которых стружка удаляется по центральному отверстию (рис.9.3,б).

Сквозные отверстия диаметром 80-200 мм и более получают сверлами кольцевого сверления (рис.9.5). Такими сверлами вырезается только кольцевая полость, а в центре отверстия остается стержень, пригодный для использования в качестве заготовки.

Наибольшее распространение имеют спиральные (винтовые) сверла. На рис.9.2 показана конструкция спирального сверла с коническим хвостовиком. Сверло состоит из рабочей части l_1, шейки l_2 и хвостовика l_3 с лапкой l_4. Рабочая часть делится на две части: режущей l_5 и направляющей l_6. На режущей части расположены режущие лезвия сверла. На направляющей части имеются две направляющие фаски С (ленточки), которыми сверло центрируется в отверстии, и две спиральные стружечные канавки, служащие для транспортировки стружки из отверстия.

На рис.9.6 показано место перехода режущей части сверла в направляющую. Передняя поверхность 1 представляет собой линейчатую винтовую поверхность, плавно сопрягающуюся с криволинейной винтовой поверхностью нерабочей части стружечной канавки. Задняя поверхность 2 может быть ко-

нической, линейчатой винтовой поверхностью или плоскостью. Наибольшее распространение нашли сверла, у которых задняя поверхность является частью конической поверхности с осью, перекрещивающейся с осью сверла под некоторым углом. Вспомогательная задняя поверхность 3 (фаска) представляет собой часть конической поверхности с очень малой конусностью, ось которой совпадает с осью сверла. Для уменьшения трения между сверлом и стенкой отверстия спинка сверла 7 занижена относительно фаски. Главное лезвие 4 сверла с достаточной точностью можно считать прямой линией. В результате пересечения задних поверхностей образуется лезвие 5, называемое поперечным лезвием или перемычкой. Если задние поверхности сверла очерчены коническими поверхностями, то поперечное лезвие представляет собой ли-

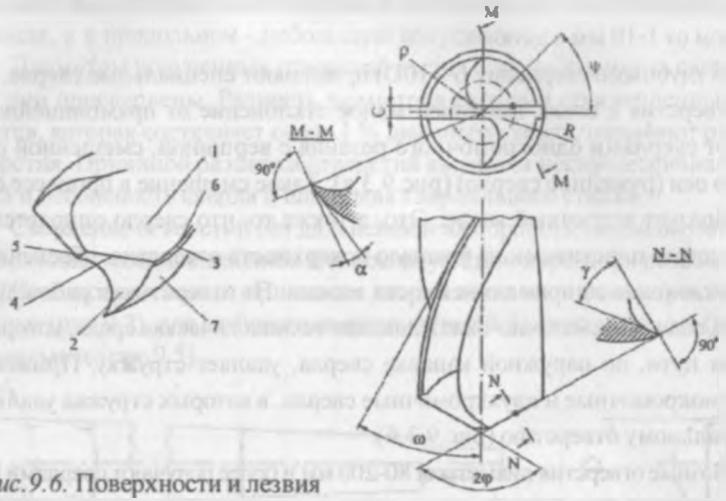


Рис.9.6. Поверхности и лезвия рабочей части спирального сверла

Рис.9.7. Геометрические параметры спирального сверла

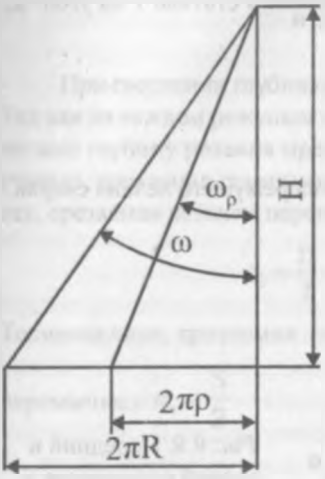
нию двоякой кривизны. Вспомогательное лезвие 6 является конической винтовой линией с очень малой конусностью. Таким образом, сверло имеет по две передние, задние и вспомогательные задние поверхности, два главных и вспомогательных лезвия и поперечное лезвие.

На рис.9.7 показаны геометрические параметры спирального сверла. Главные лезвия перекрещиваются под углом 2φ, называемым двойным углом в плане. Двойной угол в плане есть угол между проекциями главных лезвий на плоскость, проходящую через ось сверла, параллельно главным лезвиям. У стандартных сверл величина двойного угла в плане равна 120°. У сверл специальных, проектируемых для определенной операции, величина угла 2φ зависит от твердости и прочности материала обрабатываемой детали. В таких случаях угол 2φ может колебаться в пределах 90-140°.

Для исключения возможности защемления сверла в отверстии, направляющую часть делают с обратной конусностью, составляющей 0,04-0,1 мм на 100 мм длины сверла.

Угол Ψ называют углом наклона перемычки. Это угол между проекциями главного лезвия и перемычки на плоскость, перпендикулярную к оси сверла. Величина угла у = 50-55°.

Угол ω называют углом наклона винтовой канавки. Это угол между касательной к винтовой линии канавки и осью сверла. Вследствие известных свойств винтовой поверхности угол наклона винтовой канавки переменен в различных точках главного лезвия. На рис.9.8 изображены развернутые на плоскость винтовые линии, соответствующие периферийной точке главного лезвия с радиусом R и точке главного лезвия, лежащей на цилиндре радиуса ρ. Шаг указанных винтовых линий канавки равен Н. Решая два треугольника, получим



$$\operatorname{tg}\omega = \frac{2\pi R}{H}; \qquad \operatorname{tg}\omega_\rho = \frac{2\pi\rho}{H};$$

Поделив второе выражение на первое:

$$\operatorname{tg}\omega_\rho = \frac{\rho}{R}\operatorname{tg}\omega \qquad (13.1)$$

Рис.9.8. Развертка винтовых линий канавки на плоскости

Для различных материалов угол ω принимается в пределах 15-45°.

Передний угол γ сверла измеряют в плоскости, нормальной к главному лезвию Это есть угол между плоскостью, касательной к передней поверхности, и плоскостью, проходящей через главное лезвие параллельно оси сверла. Так как передний угол образуется в результате пересечения передней поверхности нормальной плоскостью NN, его величина определяется параметрами винтовой поверхности:

$$\operatorname{tg}\gamma \cong \frac{\rho_x}{R}\cdot\frac{\operatorname{tg}\omega}{\sin\varphi} \qquad (9.2)$$

Из формулы следует, что так же, как и угол наклона винтовой канавки, передний угол сверла по длине главного лезвия переменный, уменьшается в точках лезвия, приближающихся к перемычке. На чертежах сверл передний угол не обозначается, так как форма передней поверхности полностью характеризуется шагом Н и углом наклона ωр винтовой канавки.

Угол α является задним углом сверла (рис.9.7). Задним углом называют

угол между плоскостью, касательной к задней поверхности, и плоскостью, перпендикулярной к оси сверла. Задние углы сверла также переменные. Но если передний угол по мере приближения к перемычке уменьшается, то задний угол, наоборот, возрастает. На чертеже сверла задний угол задают в периферийной точке главного лезвия, так как в этой точке его легко измерить.

В процессе резания, в результате вращательного и поступательного движения сверла, образуется винтовая поверхность резания. Поэтому действительные (кинематические) углы γ, α изменяются (рис.13.9). Передний угол увеличивается, а задний угол уменьшается и будут равны:

$$\gamma_g = \gamma + \mu; \quad \alpha_g = \alpha - \mu$$

На рис.9.9 показаны линия 1 - развертка траектории резания в статике ($S = 0$); 2-траектория резания в кинематике ($S \neq 0$). Плоскость резания в кинематике 2 повернута относительно плоскости резания в статике 1 на угол μ, который равен

$$\operatorname{tg}\mu = \frac{S}{\pi D}, \text{ где}$$

S - подача сверла,

D - диаметр, на котором расположена данная точка режущего лезвия сверла.

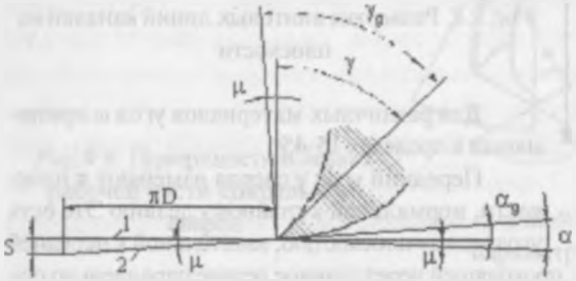
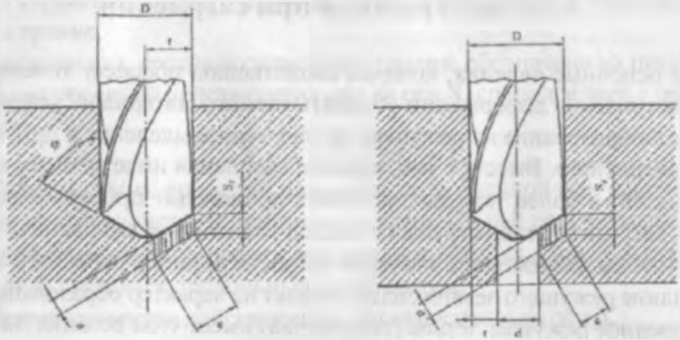


Рис.9.9. Передний и задний углы сверла в процессе резания

9.2. Элементы процесса резания при сверлении

Сверление, так же как и точение, характеризуется одной принципиальной кинематической схемой, основанной на сочетании двух равномерных движений: вращательного и поступательного. Вращательное движение, совершаемое инструментом или деталью, является движением резания. Поступательное движение инструмента является движением подачи. Скорость этого движения в минуту называют минутной подачей $S_м$ и измеряют в мм/мин. Кроме минутной подачи различают подачу S на оборот сверла или детали, определяемую по формуле $S = S_м/n$ мм/об, и подачу на зуб инструмента $S_z = S/z$, где $z = 2$.



а) б)

Рис.9.10. Размеры срезаемого слоя при сверлении (а) и при рассверливании (б)

При сверлении глубина резания равна половине диаметра сверла t = D/2. Так как на каждом режущем зубе имеется несколько режущих лезвий, то можно всю глубину резания представить как $t = t_2 + t_п$, где t_2 - глубина резания участка, срезаемая главными режущими лезвиями; $t_п$ - глубина резания участка, срезаемая лезвием перемычки:

$$t_2 = \frac{D}{2} - \frac{C}{2\sin\psi}; \qquad t_п = \frac{C}{2\sin\psi}$$

Толщина слоя, срезаемая главным лезвием, равна $a_2 = \frac{S}{2}\sin\varphi$, а лезвием перемычки - $a_п = \frac{S}{2}$

Ширина слоя, срезаемого главным лезвием $b_2 = \frac{\sqrt{D^2 - C^2} - C\,\mathrm{ctg}\psi}{2\sin\varphi}$

Ширина слоя, срезаемая лезвием перемычки $b_п = t_п = \frac{C}{2\sin\psi}$

Ширина слоя, срезаемая каждым зубом сверла -

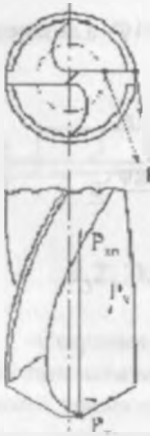
$$b = b_2 + b_п = \frac{\sqrt{D^2 - C^2} - C\,\mathrm{ctg}\psi}{2\sin\varphi} + \frac{C}{2\sin\psi}$$

Площадь поперечного сечения слоя, срезаемая за один оборот, как и при точении, равна произведению глубины резания на подачу: $f = tS = SD/2$. Следовательно, площадь среза, приходящаяся на один зуб сверла, $f_1 = f/2 = SD/4$.

9.3. Силы резания при сверлении

Все основные явления, которые свойственны процессу точения (упругие и пластические деформации обрабатываемого материала, усадка стружки, наростообразование на режущем лезвие, тепловыделение и др.), присущи также и сверлению. Вместе с тем, процесс сверления имеет ряд характерных особенностей: в более тяжелых условиях происходит процесс образования стружки, затруднен отвод стружки и подвод смазочно-охлаждающей технологической среды. Переменное значение скорости резания, переднего и заднего угла по длине режущего лезвия сильно влияет на характер образования стружки. Поперечное режущее лезвие (перемычка) имеет угол резания более 90°, а скорость резания у перемычки почти равна нулю, поэтому у перемычки происходит фактически не резание, а смятие материала, что вызывает повышенный износ сверла. Направляющие ленточки, не имея заднего угла, создают при сверлении значительное трение о поверхность обработанного отверстия.

Спиральное сверло является многолезвийным режущим инструментом, так как совершает работу резания двумя главными, двумя вспомогательными и одной поперечной лезвиями. При резании возникают давление сходящей стружки на переднюю поверхность и давление обрабатываемого материала на заднюю поверхность, трение стружки о переднюю поверхность и трение задней поверхности о поверхность резания, а также трение о стенки отверстия ленточек, расположенных на цилиндрической поверхности сверла, образуются также осевое давление и крутящий момент от поперечной перемычки сверла.



На каждом из лезвий действует сила резания, которую можно разложить на три взаимно перпендикулярные составляющие (рис.9.11). Силу резания, действующую на главном лезвии, разложим на силу P_τ, касательную к окружности, на которой расположена точка лезвия, на силу P_y, проходящую через ось сверла, и на силу P_x, параллельную оси сверла. На другом главном лезвии действует аналогичная система сил. Сила резания, действующая на половину перемычки, также может быть разложена на три составляющие силы. Однако

Рис. 9.11. Силы, действующие на лезвиях спирального сверла

вследствие относительно малого влияния, оказываемого на силовые характеристики при сверлении двух составляющих, кроме составляющей P_{τ_n}, их во внимание не принимают. Вспомогательные лезвия в срезании стружки существенного значения не имеют. Однако вследствие того, что на фасках сверла

вспомогательный задний угол равен нулю, между ними и стенкой отверстия имеется трение.

Касательная, составляющая силы трения, обозначена на рисунке силой $P_{z\phi}$. Сумма проекций действующих сил на ось X, совпадающей с осью сверла составит:

$$\Sigma x = 2P_x + 2P_{z\phi} = P_o$$

Данную сумму проекций называют осевой силой при сверлении. Осевая сила противодействует движению подачи. По ней рассчитывают на прочность детали механизма подачи сверлильного станка. При больших вылетах осевая сила вызывает продольный изгиб сверла.

Сумма моментов действующих сил относительно оси X составит: $\Sigma M_x = 2P_{z\phi}R + 2P_z\frac{R}{2} = M_{кр}$

Данную сумму моментов называют крутящим моментом сопротивления резанию при сверлении. Для осуществления процесса резания крутящий момент станка должен быть больше крутящего момента резания, т.е. $M_{кр} > M_{кр}$. Так как мощность, расходуемая на осуществление движения подачи, очень мала, то эффективную мощность станка (мощность, расходуемая на резание) определяют только по крутящему моменту резания:

$$N_e = \frac{Mn}{975}\ кВт \qquad (9.3)$$

По крутящему моменту резания рассчитывают на прочность и жесткость шпиндель и детали механизма главного движения станка.

Силы P_y, действующие на обоих главных лезвиях сверла и направленных навстречу друг другу, теоретически должны уравновешиваться. Однако вследствие неточности заточки сверла (неодинаковой величины углов в плане φ и длин главных лезвий) силы P_y не равны. Поэтому появляется равнодействующая сила ΔP_y, направленная в сторону большей силы. Под действием равнодействующей происходит "разбивание" отверстия (увеличение диаметра отверстия по сравнению с диаметром сверла). "Разбивание" отверстия вызывает другую макрогеометрическую погрешность - увод сверла от геометрической оси отверстия, так как сверло перестает своими фасками центрироваться в отверстии. "Разбивание" и увод отверстия от геометрической оси всегда присущи сверлению с двухлезвийными спиральными сверлами.

Влияние геометрических и конструктивных элементов сверла на силовые характеристики процесса резания различно. Основное влияние на осевую силу и крутящий момент оказывают угол наклона винтовой канавки, двойной угол в плане сверла и угол наклона перемычки. Увеличение угла наклона винтовой канавки уменьшает как осевую силу, так и крутящий момент, причем осевая сила уменьшается интенсивнее. Экспериментально установленное влияние угла ω на осевую силу и крутящий момент связано с тем, что увеличение

угла ω вызывает увеличение переднего угла сверла, что снижает силу резания на главном лезвии и ее составляющие.

Влияние двойного угла в плане 2φ на P_0 и $M_{кр}$ при сверлении аналогично влиянию угла φ на силы P_z и P_y при точении. При увеличении угла 2φ отношение *b/a* - ширины срезаемого слоя к толщине уменьшается. Это должно уменьшить силу P_z на главном лезвии и, как следствие, величину крутящего момента. Так же, как и при точении увеличение угла 2φ при сверлении приводит к увеличению угла между главным лезвием и направлением движения подачи, что увеличивает осевую составляющую силы резания на главных лезвиях и осевую силу.

Угол наклона перемычки на осевую силу и крутящий момент влияет наиболее сложно. С одной стороны, увеличение угла Ψ вызывает уменьшение длины перемычки, что должно несколько уменьшить крутящий момент и более значительно осевую силу. С другой стороны, при увеличении угла Ψ увеличивается длина главных лезвий и их участков с малой величиной статического переднего угла. Последнее должно привести к увеличению как крутящего момента, так и осевой силы. Такое противоположное влияние угла Ψ приводит к тому, что при его увеличении осевая сила непрерывно растет, а крутящий момент вначале уменьшается, а затем возрастает. Минимум крутящего момента соответствует углу Ψ = 50-55°.

Так как оптимальные геометрические параметры сверла при обработке определенной группы материалов изменяются в весьма узких пределах, то в формулах для определения P_0 и $M_{кр}$ поправочными силовыми коэффициентами учитывают только механические свойства обрабатываемого материала и применяемую смазочно-охлаждающую технологическую среду:

$$P_0 = C_P D^{x} S^{y} K_p \qquad (9.4)$$

$$M_{кр} = C_M D^{z} K_p \qquad (9.5)$$

где $K_p = K_м K_ж$

Величины постоянных C_p, $C_м$, $K_м$, $K_ж$ и показателей степени находятся в справочниках режимов резания при сверлении.

9.4. Характер изнашивания спиральных сверл

Износ сверл происходит в результате трения задних поверхностей о поверхность резания, стружки о переднюю поверхность, направляющих ленточек об обработанную поверхность и смятия поперечного лезвия.

Спиральные сверла при обработке сталей изнашиваются по передним и задним поверхностям (рис.9.12). Изнашивание перемычки считается ненормаль-

Рис.9.12. Характер износа сверла

ным, оно происходит или в результате неправильной заточки сверла , или из-за недостаточной твердости инструментального материала после термообработки. Износ задней поверхности вдоль главного лезвия неравномерен.

Ширина площадки износа непрерывно возрастает по мере удаления от перемычки сверла. Лунка износа вдоль всего главного лезвия не образуется. Она возникает у уголка сверла в том месте, где главное лезвие переходит во вспомогательное. Изнашиванию также подвергается вспомогательная задняя поверхность, на которой появляются штрихи износа у уголка сверла. С увеличением глубины отверстия интенсивность изнашивания возрастает вследствие ухудшения теплоотвода и увеличения сил трения.

Наиболее опасный износ - по уголкам и ленточке, так как при большом износе для восстановления сверла требуется стачивать значительную его часть

Наибольшее влияние на величину износа на задней грани $h_з$ оказывает скорость резания и значительно меньшее подача. Поэтому выгоднее работать с большей подачей и меньшей скоростью резания.

Допустимая скорость резания при сверлении рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{C_v D^{q_v}}{T^m S^{y_v}} K_v \qquad (9.6)$$

где D - диаметр сверла, T - период стойкости сверла,

m - показатель стойкости,

C_v, q_v, y_v - показатели степени;

K_v - поправочный коэффициент.

Период стойкости при сверлении выбирают в зависимости от диаметра сверла. Для быстрорежущих сверл период стойкости колеблется в пределах 6-16 мин (для диаметра до 5 мм) и 100-210 мин (для диаметров 60-80 мм).

Большое влияние на допустимую скорость резания при сверлении оказывают свойства инструментального материала. Сверла из быстрорежущей стали допускают скорость резания в два раза большую, чем сверла изготовленные из инструментальных углеродистых или легированных сталей. При работе сверлами, оснащенных пластинками из твердых сплавов, скорость резания может быть в два-три раза больше, чем при работе сверлами из быстрорежущей стали.

При сверлении отверстий длиной свыше трех диаметров необходимо вводить поправочный коэффициент, уменьшающий допустимую скорость резания.

Применение смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) уменьшает температуру в зоне резания и силы резания, повышает стойкость сверл или допустимую скорость резания (при заданной стойкости).

Особенно эффективно влияние СОТС при обработке пластичных металлов и при глубоком сверлении. Применение СОТС при сверлении сталей дает возможность повысить скорость резания на 15-25 %.

Для облегчения работы сверла и особенно при резании труднообрабатываемых материалов инструмент подвергается специальной заточке, целью которой является создание более благоприятных углов у поперечного лезвия и ее укорочение.

Таким образом, можно значительно повысить их стойкость или увеличить допустимую скорость резания (при постоянной стойкости). Это достигается двойной заточкой сверл, подточкой перемычки, подточкой цилиндрической ленточки и другими мерами.

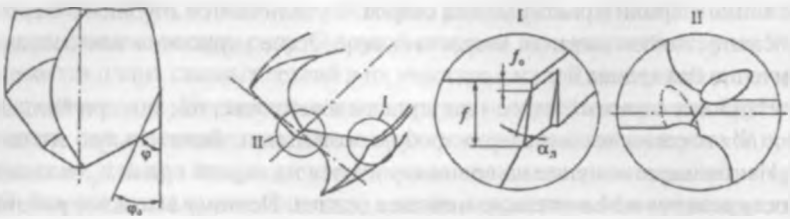


Рис.9.13. Двойная заточка сверл

Рис.9.14. Подточка сверл по ленточке (I) и перемычке (II)

На рис.9.13 показана двойная заточка сверла. Основной угол $2\varphi = 116$-$118°$ и второй угол обычно $2\varphi_0 = 70°$. Двойная заточка увеличивает ширину стружки, вследствие чего улучшаются условия отвода тепла от режущих лезвий.

Подточку ленточки (рис.9.14,I) проводят, чтобы уменьшить площадь взаимного соприкосновения и, следовательно, трение поверхности ленточки шириной f с цилиндрической поверхностью просверливаемых отверстий. После подточки на длине равной $\approx 0{,}2$ D остается узкая полоска $f_л$ шириной примерно 0,1-0,3 мм, остальная часть ленточки стачивается по плоскости под углом $\alpha_л = 3$-$8°$. Подточка ленточек на обоих зубьях сверл способствует повышению их стойкости в два-три раза.

Подточка перемычки производится с целью уменьшения осевой силы сопротивления металла врезанию сверла (рис.9.14,II). На каждом зубе стачивается небольшая длина главного режущего лезвия и часть спинки соседнего зуба. В результате укорачивается перемычка и таким образом можно уменьшить осевую силу примерно на 70 %.

9.5. Назначение режимов резания при сверлении

Рациональный режим резания определяется, исходя из технологических условий обработки отверстия, т.е. с учетом получения требуемой его точности и чистоты поверхности, а также последовательности обработки данного отверстия различными инструментами, и сводится к определению такой подачи и такой скорости резания, при которых процесс резания будет наиболее производительным и экономичным.

Глубину резания при сверлении отверстия в сплошном материале будет равна t=D/2 мм. При рассверливании глубина резания определяется припуском на обработку и технологическими требованиями. При черновой обработке отверстия глубину резания берут равной припуску, который снимают за один проход. При точной обработке отверстия весь припуск целесообразно снять в два или несколько проходов, при этом на каждом последующем проходе глубина резания должна быть меньшей.

Максимально допустимая подача выбирается по соответствующим справочникам в зависимости от обрабатываемого материала, материала инструмента, вида и условий обработки или определяется по формуле:

$$S = C_S D^{x_s} \cdot K_s, \text{мм / об}$$

где C_s - коэффициент, характеризующий механические свойства обрабатываемого материала и технологические факторы; D^{x_s} - диаметр сверла, мм; K_s - поправочный коэффициент, учитывающий длину отверстия.

Для рассверливания принимается подача в 1,5-2 раза больше, чем при сверлении.

Найденная подача корректируется по паспорту станка и принимается фактическая подача $S_ф$, ближайшая меньшая к подсчитанной: $S_ф \le S$.

Допустимая скорость резания определяется по приведенной выше формуле (9.6) с учетом поправочного коэффициента при заданном периоде стойкости и известных диаметре и фактической подаче. По найденной скорости резания определяется частота вращения инструмента $n = 1000V/\pi D$, об/мин. Производится корректировка по паспорту станка и принимается фактическое число оборотов $n_ф$, ближайшее меньшее к подсчитанному: $n_ф \le n$.

По найденному фактическому числу оборотов инструмента подсчитывается фактическая скорость резания

$V_ф = \pi D n_ф / 1000$, м/мин.

Затем выбранные основные элементы режима резания проверяются на прочности наиболее слабого звена механизма главного движения и механизма подачи станка: $P_{ст} > P_o$; $M > M_{кр}$.

Глава 10

Фрезерование

10.1. Общие положения фрезерования

Фрезерование - широко распространенный и высокопроизводительный процесс механической обработки резанием. Фрезерованием получают: горизонтальные, вертикальные, наклонные плоскости, канавки и пазы профильного сечения, фасонные поверхности различных профилей, поверхность тела вращения. Фрезерование осуществляется многолезвийным режущим инструментом - фрезой. Фреза представляет собой тело вращения, по периферии которого или на торце расположены режущие элементы - зубья фрезы.

Особенностью фрезерования является его прерывистость. Каждый режущий зуб фрезы в процессе резания находится в контакте с заготовкой только в течение некоторой части оборота до следующего врезания. Вследствие этого фрезерование характеризуется неравномерностью процесса резания, что влечет возникновение вибраций, интенсификацию изнашивания зубьев и другие отрицательные явления.

Процесс фрезерования основан на сочетании двух одновременно действующих движений - вращательного и поступательного. Главным движением является вращение инструмента вокруг оси, а движением подачи - поступательное перемещение заготовки, закрепленной на столе станка.

Скорость V, м/мин, точек наружного диаметра D фрезы является скоростью резания. При этом, $V = \frac{\pi D n}{1000}$, где n - частота вращения шпинделя, об/мин; D - наружный диаметр фрезы, мм.

Равномерное, поступательное перемещение заготовки относительно фрезы количественно задается значением подачи, которое при фрезеровании может определяться величинами S_z, мм/зуб; $S_o = S_z Z$, мм/об, где Z - число зубьев фрезы; $S_{мин} = S_o n$, где n - частота вращения фрезы, об/мин.

Значениями подачи на зуб S_z пользуются при расчете режимов резания и теоретических исследованиях при фрезеровании. В производственных условиях пользуются минутной подачей $S_{мин}$. Это связано с тем, что у большинства фрезерных станков отсутствует кинематическая связь между вращением шпинделя и механизмом подачи, имеющим свой привод.

10.2. Основные типы фрез и их назначение

При фрезеровании используется широкая номенклатура стандартных и специальных фрез. Фрезы разных типов различаются по внешнему виду, размерам и конструкции и предназначены для обработки поверхностей определенных форм и размеров.

Цилиндрические фрезы (рис.10.1,а) предназначены для установки на горизонтально-фрезерных станках для обработки плоских поверхностей. Такие фрезы изготовляют с левыми и правыми винтовыми канавками. Цилиндрические фрезы имеют центральное базовое отверстие со шпоночной канавкой. Надетые на оправку станка цилиндрические фрезы зажимаются между кольцами с помощью затяжной гайки.

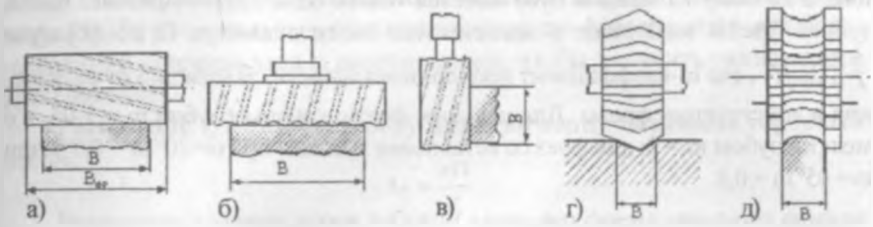


Рис.10.1. Основные типы фрез

Торцевые фрезы (рис.10.1,б) предназначены для обработки плоских поверхностей, лежащих как в одной, так и в разных по высоте плоскостях. Стандартные торцевые фрезы имеют диаметры D = 60-600 мм. Торцевыми фрезами больших диаметров можно за один проход обработать заготовки шириной до 500 мм.

Концевые фрезы (рис.10.1,в) применяют для обработки пазов, уступов, криволинейных контуров по разметке и копиру. Концевые фрезы имеют режущие лезвия по цилиндрической части (обычно расположенные по винтовой линии) и на торце. Концевые фрезы предназначены, в основном, для работы на вертикально-фрезерных станках, но могут быть использованы и на горизонтально-фрезерных станках.

Угловые фрезы (рис.10.1,г) предназначены для фрезерования профильных угловых канавок, как правило, в инструментальном производстве.

Фасонные фрезы (рис.10.1,д) предназначены для обработки сложно-фасонных поверхностей. Профиль фасонной фрезы должен соответствовать профилю обрабатываемой детали.

При фрезеровании применяют дисковые фрезы диаметром D = 60-110 мм. Режущие зубья дисковых фрез выполняются на цилиндрической внешней поверхности, а также на одной (односторонние) или на обеих (двусторонние) торцевых поверхностях. Предназначаются дисковые фрезы для фрезерования канавок различного назначения шириной B = 6-16 мм.

Широко применяют также прорезные (шлицевые), отрезные, шпоночные и резьбовые фрезы.

10.3. Геометрические параметры фрез

Рассматривая геометрические параметры цилиндрической и торцевой фрезы, можно считать, что эти определения справедливы для фрез остальных разновидностей.

Цилиндрическая фреза (рис.10.2) работает в условиях свободного резания, а поэтому на каждом зубе имеется только одно главное лезвие. Число зубьев фрезы выбирают в зависимости от ее диаметра D по формуле $Z = m\sqrt{D}$, где m-коэффициент пропорциональности, зависящий от назначения и конструкции фрезы. Для цельных фрез с крупным зубом m = 1,05, а с мелким зубом m = 2; для фрез со вставными зубьями при ω=20° m = 0,9 и при ω = 45° m = 0,8.

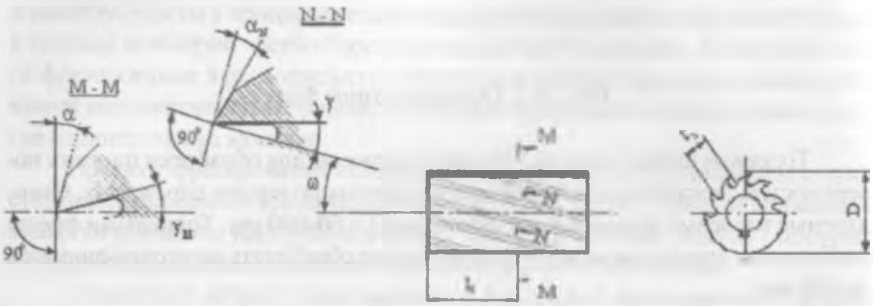


Рис.10.2. Геометрические параметры цилиндрической фрезы

Для свободного размещения стружки во впадине стружечной канавки при фрезеровании стали с глубиной резания t и подачей на зуб S_z максимальное число зубьев фрезы определяется по формуле

$$Z = \frac{0{,}2D}{t^{0{,}5}_{max} S_z^{0{,}5}_{max}}$$

Из формулы следует , что при увеличении глубины резания и подачи число зубьев фрезы должно быть уменьшено. Число зубьев фрез лежит в пределах 6-14.

Для более плавного входа зубьев фрезы в срезаемый слой и выхода из него, а также для увеличения числа одновременно работающих зубьев фрезы имеют винтовую стружечную канавку. Следовательно, главные лезвия являются винтовыми линиями и угол ω их наклона к оси фрезы называют углом наклона винтовой канавки.

В зависимости от направления вращения на станке фрезы называют леворежущими и праворежущими. Если при взгляде на торец фрезы она враща-

ется по часовой стрелке, то ее называют леворежущей, а если против часовой стрелки - праворежущей. Поэтому желательно, чтобы в процессе резания сила, действующая на фрезу параллельно ее оси, была всегда направлена на шпиндель станка, обладающий значительно большей жесткостью, чем противоположная опора фрезерной оправки. Поэтому у леворежущих фрез винтовая канавка по направлению должна быть правой, а у праворежущих фрез - левой.

У стандартных фрез угол наклона винтовой канавки находится в пределах 25-35°; у специальных, предназначенных для фрезерования детали определенной ширины, угол ω рассчитывают, чтобы получить равномерное фрезерование.

Расстояние $t_т$ между двумя зубьями по торцу называют торцевым шагом:

$$t_T = \frac{\pi D}{Z}$$

Расстояние t_0 между двумя зубьями вдоль оси фрезы называют осевым шагом. Связь между осевым и торцевым шагами выражается формулой:

$$t_0 = t_T \operatorname{ctg}\omega$$

Для удобства заточки и контроля фрезы ее передний угол измеряют в плоскости NN, перпендикулярный к лезвию Передним углом γ называют угол между плоскостью, касательной к передней поверхности, и нормалью к плоскости, касательной к цилиндрической поверхности. Его величина зависит от прочности и твердости материала обрабатываемой детали.

Задний угол α измеряют в плоскости ММ, перпендикулярной к оси фрезы. Задним углом называют угол между плоскостями, касательными к задней поверхности зуба и цилиндрической поверхности.

Величина торцевого переднего угла $\gamma_м$ и нормального заднего угла α_N определяют по формулам:

$$\operatorname{tg}\gamma_M = \frac{\operatorname{tg}\gamma}{\cos\omega}; \qquad \operatorname{tg}\alpha_N = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\cos\omega}$$

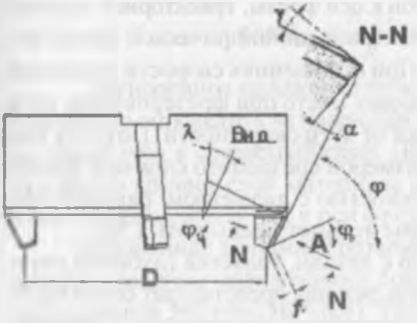


Рис.10.3. Геометрические параметры торцевой фрезы

Торцевая фреза (рис.10.3) представляет собой корпус, в который вставлены зубья фрезы. Каждый зуб оснащен пластинкой твердого сплава. Диаметр фрезы зависит от ширины В фрезеруемой детали и равен D = (1,4-1,5)B. Число зубьев фрезы при фрезеровании стали берется Z = (0,04-0,06)D, если

D<200 мм, и Z = (0,04-0,06) D + 2 если D>200 мм. При фрезеровании чугуна независимо от диаметра фрезы Z = (0,08-0,1) D.

Малое число зубьев торцевых фрез, которое значительно меньше, чем у цилиндрических фрез, определяется требованием уменьшить мощность, расходуемую на фрезерование.

Каждый зуб торцевой фрезы представляет собой резец, который работает почти так, как строгальный резец. Отличие состоит только в том, что строгальный резец совершает прямолинейное движению, а зуб фрезы циклоидальное. Поэтому форма и параметры зуба фрезы мало отличаются от формы и геометрических параметров резца.

Главное лезвие зуба фрезы наклонено относительно плоскости, перпендикулярной к оси, под главным углом в плане φ.

Вспомогательное лезвие образует с той же плоскостью вспомогательный угол в плане φ_1.

Прямолинейное переходное лезвие длиной f_φ = 1,5-2 мм имеет переходный угол в плане $\varphi_\varphi = \varphi/2$.

Передний и задний углы, так же как и у резца, измеряют в главной секущей плоскости NN.

Для того, чтобы в соприкосновение со срезаемым слоем первой не вступала вершина зуба, главное лезвие наклоняют под положительным углом λ.

Расчеты показывают, что при отношениях скорости подачи к скорости резания, которые имеют место при фрезеровании, можно считать, что действительные рабочие углы γ_p, α_p равны углам заточки γ, α и λ_p равен углу наклона ω винтовой канавки фрезы.

10.4. Элементы процесса резания при фрезеровании

В результате сочетания вращательного и поступательного движений, совершаемых в плоскости, перпендикулярной к оси фрезы, траекторией относительного рабочего движения любой точки лезвия цилиндрической фрезы является удлиненная циклоида (трахоида). При отношениях скорости движения детали к скорости вращения фрезы, имеющих место при фрезеровании, дуга трахоиды по форме очень мало отличается от дуги окружности. Поэтому для упрощения математического описания размеров срезаемого слоя при фрезеровании трахоиду можно заменить окружностью с диаметром, равным диаметру фрезы. Ошибка от указанной замены не будет превышать 1 %.

Размер t слоя материала, удаляемого с детали, является глубиной резания. При сделанном допущении поверхность резания представляет собой часть кругового цилиндра. При фрезеровании возможны два варианта сочетания направлений вращения фрезы и перемещения детали. Если вектора скорости резания и подачи направлены в противоположные стороны (вариант I), то

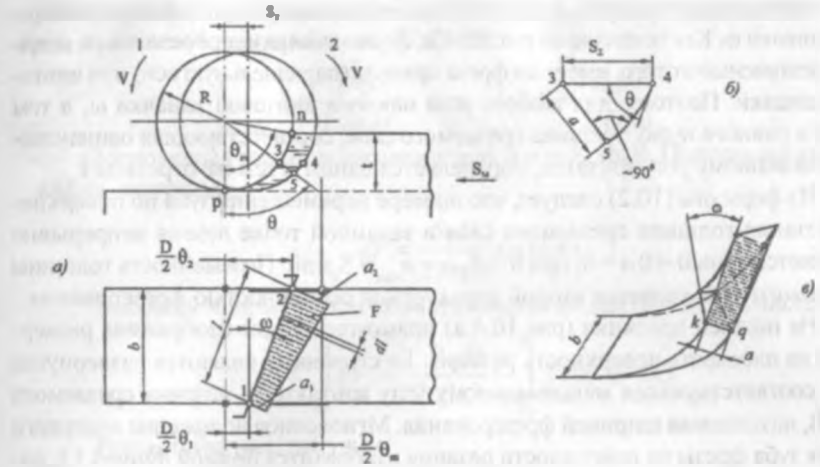


Рис.10.4. Элементы резания при фрезеровании цилиндрической фрезой.

такое фрезерование называют встречным, а если в одну стороны (вариант II), то попутным.

Зуб фрезы вступает в работу в точке р и выходит из соприкосновения со срезаемым слоем в точке n (рис.10.4,а). Таким образом, за один оборот фрезы зуб совершает два цикла: рабочий, соответствующий дуге pn, и холостой, соответствующий дуге np. Циклическая прерывистость процесса резания является основной характерной особенностью фрезерования.

Центральный угол θ_m, соответствующий началу и концу рабочего цикла зуба фрезы, называют максимальным углом контакта. Его величину можно определить по формуле

$$\cos\Theta_m = \frac{R-l}{R} = 1-\frac{2l}{D} \qquad (10.1)$$

Мгновенное положение точки лезвия зуба фрезы на поверхности резания можно определить мгновенным углом контакта θ, отсчитываемым от точки входа зуба в срезаемый слой. При перемещении по поверхности резания зуб фрезы срезает слой материала переменной толщины. В сечении плоскостью, перпендикулярной к оси фрезы, срезаемый слой имеет форму запятой.

Мгновенная толщина срезаемого слоя *a*, определяемая как расстояние между соседними положениями поверхности резания, может быть найдена из треугольника 345 (рис.10.4,б,в). Указанный треугольник с некоторым приближением можно считать прямоугольным с гипотенузой, равной подаче на зуб S_z, а угол, расположенный против катета *a*, равен мгновенному углу контакта θ. Из треугольника получим $a = S_z \sin\Theta$ (10.2)

Мгновенная толщина срезаемого слоя не зависит от угла наклона винтовой канавки ω. Как показано на рис.10.4,в, форма поверхности резания не меняется независимо от того, имеет ли фреза прямую (параллельную оси) или винтовую канавки. Поэтому, для любого угла наклона винтовой канавки ω, в том числе и равного нулю, толщина срезаемого слоя, соответствующая одинаковому мгновенному углу контакта, определяется одним и тем же отрезком k_q.

Из формулы (10.2) следует, что по мере перемещения зуба по поверхности резания толщина срезаемого слоя в заданной точке лезвия непрерывно изменяется. При $\theta = 0$ $a = 0$; при $\theta = \theta_m$ $a = a_{max} = S_z \sin\theta$. Переменность толщины срезаемого слоя является второй характерной особенностью фрезерования.

На нижней проекции (рис.10.4,а) прямоугольником изображена развернутая на плоскость поверхность резания. Ее сторонами являются развернутая дуга, соответствующая максимальному углу контакта, и ширина срезаемого слоя B, называемая шириной фрезерования. Мгновенное положение винтового лезвия зуба фрезы на поверхности резания изобразится прямой линией 12, наклонной к оси фрезы под углом наклона винтовой канавки ω. Вследствие наклонного расположения лезвия мгновенные углы контакта θ_1 и θ_2, так же как и соответствующие им дуги контакта крайних точек 1 и 2 лезвия, будут неодинаковы. Из рисунка видно, что $\theta_2 > \theta_1$, а поэтому и толщина срезаемого слоя в точке 2 $a_2 = S_z \sin\theta_2$ будет больше толщины срезаемого слоя в точке 1 $a_1 = S_z \sin\theta_1$. Во всех остальных точках лезвия толщины срезаемого слоя будут больше a_1 и меньше a_2. Переменность толщины срезаемого слоя в каждой точке лезвия зуба фрезы является третьей характерной особенностью фрезерования.

Участок лезвия *l*, находящийся в работе, является рабочей длиной лезвия. Рабочая длина лезвия определяется значениями мгновенных углов контакта крайних точек 1 и 2 лезвия

$$l = \frac{D(\Theta_2 - \Theta_1)}{2\sin\omega}$$

Из формулы видно, что по мере продвижения зуба по поверхности резания рабочая длина лезвия изменяется от нуля до некоторого максимума и опять до нуля. Максимально возможная для заданной ширины фрезерования рабочая длина лезвия

$$l_{max} = \frac{B}{\cos\omega}$$

Переменность рабочей длины лезвия является чертвертой характерной особенностью фрезерования.

Площадь сечения срезаемого слоя F_1 очевидно, равна площади эпюры, изображенной на рис.10.4,а. Выделим в ней площадь dF, соответствующую элементарной длине лезвия d*l*, т.е. $dF = a\,dl$, где *a* - мгновенная толщина срезаемого слоя, принимаемая неизменной в пределах длины d*l*. Произвольно выб-

раннюю разность мгновенных углов контакта $\theta_2 - \theta_1$ в формуле для определения l можно обозначить через θ. Тогда

$$l = \frac{D\Theta}{2\sin\omega} \quad \text{и} \quad dl = \frac{Dd\Theta}{2\sin\omega}$$

Мгновенная толщина срезаемого слоя $a = S_z \sin\theta$. Подставляя эти выражения, получим

$$dF = \frac{S_z D}{2\sin\omega}\sin\Theta d\Theta$$

Площадь эпюры найдем суммированием элементарных площадей dF, т.е.

$$F = \int_{\theta_1}^{\theta_2} dF = \frac{S_z D}{2\sin\omega}\int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin\Theta\, d\Theta$$

Решая интеграл, получим

$$F = \frac{S_z D}{2\sin\omega}(\cos\Theta_1 - \cos\Theta_2)$$

Из этого выражения следует, что площадь сечения срезаемого слоя также является переменной.

Так как одновременно в работе может находиться больше одного зуба, то суммарная площадь сечения срезаемого слоя

$$F = \frac{S_z D}{2\sin\omega}\sum_{1}^{Z_0}(\cos\Theta_1 - \cos\Theta_2)$$

где Z_0 - число зубьев фрезы, находящихся в работе.

Число зубьев фрезы Z_0, одновременно участвующих в работе, можно определить по формуле

$$Z_0 = \frac{\Theta}{360} + \frac{B\,tg\omega}{\pi D}$$

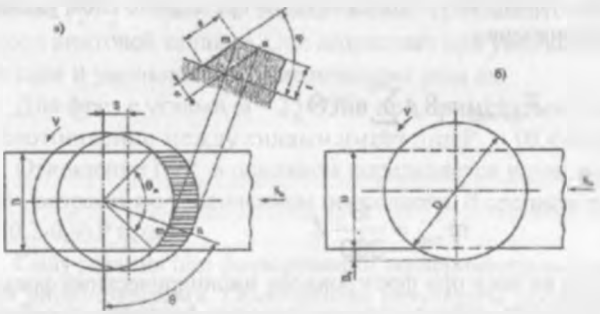


Рис. 10.5. Установка торцевой фрезы относительно детали, элементы резания и размеры срезаемого слоя

Торцевое фрезерование в отличии от цилиндрического является процессом несвободного резания. В зависимости от установки фрезы относительно обрабатываемой детали фрезерование может быть симметричным (рис.10.5,а) и несимметричным (рис.10.5,б).

В обоих случаях толщина срезаемого слоя в момент входа зуба фрезы в срезаемый слой не равна нулю. Максимальный угол контакта $\theta_м$ зависит от ширины фрезерования В и при симметричном фрезеровании может быть определен с помощью формулы

$$\sin(\frac{\Theta_м}{2}) = \frac{B}{D} \qquad (10.3)$$

При торцевом фрезеровании форма сечения слоя, срезаемого с поверхности резания, так же как и при работе строгального резца, представляет собой параллелограмм с толщиной *а* и шириной *в*. Отличие состоит в том, что толщина является переменной и определяется положением зуба на поверхности резания. Из рис.10.5,а следует, что мгновенная толщина срезаемого слоя $a = mn \sin\varphi$. По аналогии с фрезерованием цилиндрическими фрезами отрезок mn равен $S_z \sin\theta$ и тогда

$$a = S_z \sin\varphi \sin\Theta \qquad (10.4)$$

Площадь слоя металла, срезаемого одним зубом фрезы,

$F = S_z t \sin\theta$, а максимальная суммарная площадь $F_{сум}$, срезаемая зубьями фрезы, находящимися в работе, определяется по формуле

$$F_{сум\ max} = S_z t \sum_{1}^{m_{max}} \sin\Theta$$

Максимальное число зубьев фрезы, находящихся в работе

$$Z_0\ max = \frac{\Theta_м}{360} Z + 1$$

При выходе впереди идущего зуба из соприкосновения со срезаемым слоем число зубьев в работе в течение некоторого времени становится меньше на единицу. Поэтому суммарная площадь сечения срезаемого слоя уменьшится до минимального значения

$$F_{сум\ min} = S_z t \sum_{1}^{m_{min}} \sin\Theta,$$

где

$$m_{min} = \frac{\Theta}{360} Z$$

В результате этого,так же как и при фрезеровании цилиндрическими фрезами, силовая и тепловая нагрузки, действующие на торцевую фрезу, при ее работе периодически будут изменяться от максимального до минимального значения.

10.5. Силы резания при фрезеровании

Силы, действующие при фрезеровании, также как при обработке металлов прочими видами инструментов, определяются деформациями, возникающими при срезании с заготовки стружки каждым зубом фрезы, а также разрушением кристаллической структуры металлов при образовании новых поверхностей на стружке и заготовке.

На рис.10.6 изображены силы, с которыми зуб цилиндрической фрезы действует на срезаемый слой. Реакция силы резания P разложена на три составляющие P_z, P_y и P_x, направленные, соответственно, по касательной к окружности фрезы, по нормали к ней и вдоль оси фрезы. Окружная сила P_z (главная составляющая силы резания) создает крутящий момент, преодолевающий момент сопротивления резанию. Так как при движении зуба фрезы по поверхности резания площадь сечения срезаемого слоя изменяется, то изменяются и все составляющие силы резания, а также крутящий момент и эффективная мощность.

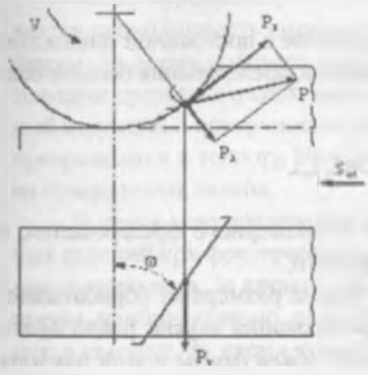


*Рис.10.6.*Схема сил на зубе цилиндрической фрезы

Поэтому при расчете режима резания оперируют со средним крутящим моментом и эффективной мощностью, определяемыми по средней окружной силе:

$$M_{ср} = \frac{P_z D}{2000}, \qquad N_{e\,ср} = \frac{P_z V}{6120}$$

Соотношения между силами P_z, P_x и P_y неодинаковы и зависят от геометрических параметров фрезы и режима резания. Отношение P_x/P_z зависит от толщины слоя, срезаемого зубьями фрезы, и угла наклона винтовой канавки. Оно возрастает при уменьшении толщины срезаемого слоя и уменьшается с увеличением угла ω.

Для фрез с углами ω = 25-35° и при применяемых подачах на зуб среднее соотношение между силами имеет вид $P_x = (0{,}4\text{-}0{,}6)\ P_z$.

Отношение P_y/P_z в основном определяется углом наклона винтовой канавки, возрастая с увеличением последнего. В среднем это отношение равно $P_y = (0{,}2\text{-}0{,}4)\ P_z \operatorname{tg} \omega$.

Силу резания при фрезеровании экспериментально измеряют специальными динамометрами. Обобщенные результаты экспериментальных исследований главной составляющей силы резания выражается формулой

$$P_z = \frac{C_p t^x S_z^y Z_p B}{D^n} \qquad (10.5)$$

где t - глубина фрезерования, S_z - подача на зуб, Z_p -число зубьев фрезы, одновременно находящихся в работе, B - ширина фрезерования, D - диаметр фрезы.

Крутящий момент на шпинделе станка равен

$$M_{кр} = C_M t^x S_z^y Z_p B D^{n+1} \qquad (10.6)$$

Числовые значения коэффициентов C_p и $C_м$, а также показатели степени берутся по справочникам нормативов режимов резания при фрезеровании. Значения скорости резания и переднего угла зубьев фрезы учитывают, умножая число, полученное по уравнениям (10.5) и (10.6) на поправочные коэффициенты K_p и Kγ.

Недостатком фрезерования является переменность во время работы фрезы окружной силы и крутящего момента. Первопричиной силовой неравномерности является непостоянство суммарной площади сечения срезаемого слоя.

Равномерное фрезерование или фрезерование с постоянной площадью поперечного среза F можно достичь, когда ширина фрезерования больше осевого шага фрезы в целое число раз

$$\frac{B}{t_0} = K; \qquad K = 1,2,3,\cdots$$

Выражение носит название уравнения равномерного фрезерования, а число K называют коэффициентом равномерности.

Так как ширина фрезерования всегда задана размерами обрабатываемой детали, то уравнение равномерного фрезерования можно реализовать соответствующим подбором диаметра, числа зубьев фрезы и угла наклона винтовой канавки.

Подставив значение осевого шага $t_0 = t\,\mathrm{ctg}\omega = \frac{\pi D}{Z}\mathrm{ctg}\omega$, получим

$$K = \frac{B \bullet Z}{\pi D\,\mathrm{ctg}\omega} \qquad (10.7)$$

Наиболее просто равномерное фрезерование осуществить, конструируя фрезу, у которой угол наклона винтовой канавки определяется выражением

$$\mathrm{ctg}\omega \frac{B_z}{\pi D K} \qquad (10.8)$$

Коэффициент равномерности может быть любым числом, но таким, при ... ω ≤45°. Не рекомендуется делать фрезы с большими углами наклона винтовой канавки вследствие резкого снижения их стойкости.

Равномерное фрезерование теоретически обеспечивает постоянство окружной силы и крутящего момента. Практически окружная сила всегда будет несколько колебаться из-за неравномерности окружного шага зубьев, неконцентричности зубьев относительно оси фрезы и биения фрезерной оправки. Однако при равномерном фрезеровании колебания силы и момента будут минимальными.

В отличие от фрезерования цилиндрическими фрезами осуществить равномерное торцевое фрезерование невозможно. При любых условиях суммарная окружная сила и крутящий момент во время работы фрезы будут переменными. Однако можно подобрать такие условия, при которых неравномерность фрезерования будет наименьшей.

10.6. Характер изнашивания фрез

Выше отмечалось, что отличительной особенностью фрезерования является периодичность смены рабочих и холостых циклов каждого из зубьев фрезы. За время рабочего цикла затрачивается энергия, пропорциональная толщине срезаемого слоя, силе трения между поверхностями лезвия, сходящей стружкой и поверхностью резания. Примерно 95 % затраченной энергии превращается в теплоту. Наиболее высокое значение температуры достигает на поверхности лезвия.

В связи с периодичностью рабочих и холостых циклов развитие тепловых явлений при фрезеровании имеет несколько иной характер, чем при точении и сверлении. За время рабочего цикла лезвие каждого зуба фрезы нагревается, приблизительно, до 400°С, что, примерно, в два раза ниже, чем на резцах и сверлах. За время холостого цикла лезвие зуба фрезы охлаждается, а теплота, полученная за рабочий цикл, отводится вглубь массы фрезы и в окружающую среду. Даже с учетом роста температуры в период рабочего цикла значение температуры невелико, чтобы существенно повысить интенсивность изнашивания фрез.

Существенную роль в условиях циклического температурного нагружения лезвий зубьев фрезы играет среда, в которой происходит их перемещение во время холостого цикла. При фрезеровании всухую колебания температуры лезвий во время рабочих и холостых циклов незначительны, так как воздушная среда слабо способствует отводу тепла. Полив фрезы охлаждающей жидкостью позволяет более интенсивно охлаждать лезвия фрез.

Цилиндрические, концевые и дисковые фрезы изнашиваются только по задней поверхности. Площадка износа задней поверхности расположена вдоль рабочего участка лезвия (рис.10.7,а), постепенно увеличиваясь по ширине от

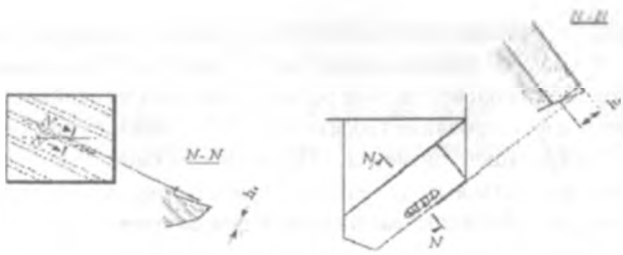


Рис. 10.7. Схема износа цилиндрической фрезы (а), торцевой фрезы (б).

входящей точки лезвия к выходящей. Допустимые величины износов h_3 задней поверхности цилиндрических фрез из быстрорежущих сталей: при черновой обработке сталей равны 0,4-0,6 мм, а при чистовой обработке 0,15-0,25 мм и при черновой обработке чугуна равны 0,5-0,8 мм, а при чистовой обработке 0,2-0,3 мм.

Изнашивание торцевых фрез подобно изнашиванию резцов (рис.10.7,б). Фрезы из быстрорежущих сталей и с пластинками твердых сплавов при обработке сталей и чугуна изнашиваются по задней и передней поверхностям. Фрезы из быстрорежущих сталей при обработке чугуна изнашиваются только по задней поверхности. Допустимые износы фрез h_3: фрез из быстрорежущих сталей при черновой обработке сталей и чугунаравны 1,5-2 мм, а при чистовой обработке-0,3-0,5 мм; фрез с пластинками твердых сплавов при обработке сталей - 1-1,2 мм и при обработке чугуна - 1,5-2 мм.

Разрушение режущего лезвия может быть хрупким и пластичным. Хрупкое разрушение происходит под действием наибольших растягивающих напряжений и является следствием зарождения и развития трещин. При этом происходит разрушение режущего лезвия в виде выкрашивания или сколов. Выкрашивание проявляется в отделении мелких частиц вблизи главного лезвия и чаще всего связано с поверхностными дефектами инструментального материала, неоднородностью микроструктуры и остаточными напряжениями.

Сколы представляют собой отделение сравнительно крупных объемов инструментального материала, превышающих объем клина в пределах контакта передней поверхности со стружкой. Сколы зависят от величины переднего угла и угла заострения.

Быстрорежущие стали, обладающие более высокой прочностью и ударной вязкостью, меньше подвержены хрупкому разрушению, чем твердые сплавы.

При прерывистом резании, которое характерно фрезерованию, не менее важное значение имеют термические напряжения, особенно для инструментов, оснащенных пластинками твердых сплавов.

При торцевом фрезеровании на контактных поверхностях зубьев в период резания возникают термические напряжения. Во время холостого цикла зубьев вследствие теплопроводности вентиляционного эффекта температура

контактных поверхностей снижается до трети температуры рабочего цикла. В результате этого поверхностные слои твердого сплава оказываются менее нагретыми, нежели внутренние, и на контактных поверхностях зубьев сжимающие напряжения заменяются растягивающими. Изменение знака напряжений после определенного числа циклов вызывает появление усталостных трещин. Появление трещин связано с определенными критическими скоростью и температурой резания, а также с физико-механическими свойствами твердых сплавов.

10.7. Порядок назначения режимов резания при фрезеровании

Порядок назначения режимов резания при фрезеровании не отличается от порядка назначения режимов резания при других видах обработки.

В зависимости от припуска на обработку выбирают глубину резания. Необходимо стремиться производить фрезерование за один проход, учитывая мощность станка и жесткость системы СПИД. При припуске на обработку более 5 мм, а также при повышенных требованиях к точности обработки и шероховатости поверхности припуск снимают за два и более проходов, оставляя на последний проход припуск в 1-1,5 мм.

После назначения глубины резания следующим шагом является выбор подачи. Подачу выбирают максимально возможной. Ее величина ограничивается такими факторами как: шероховатостью обработанной поверхности, прочностью зуба фрезы, прочностью механизма подачи станка, жесткостью системы СПИД, прочностными свойствами обрабатываемого материала. При черновом фрезеровании цилиндрическими фрезами из быстрорежущей стали при обработке стали выбирают подачу на зуб S_z = 0,06-0,6 мм/зуб, при обработке чугуна S_z = 0,04-0,6 мм/зуб. При ферезровании заготовок из жаропрочных и титановых сплавов S_z = 0,05-0,2 мм/зуб.

По выбранной величине S_z определяют минутную подачу $S_м = S_z Zn$, где Z - число зубьев фрезы и n - частота вращения фрезы, и затем проводят корректировку $S_м$ по паспорту станка и принимается ближайшая меньшая к подсчитанной: $S_{мр} \le S_м$. По выбранной $S_{мр}$ подсчитывается фактическая подача на зуб.

Скорость резания выбирают по картам режимов резания при фрезеровании или расчитывают по формуле

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m t^x S^y_z B^u Z^p} K, \qquad (10.9)$$

где: C_v - коэффициент, характеризующий материал заготовки и условия

обработки; T - период стойкости фрезы, который обычно находится в пределах 60-180 мин; t - глубина резания; S_z - подача на зуб; B - ширина фрезерования; Z - число зубьев фрезы; q,m, x, y, u, p- показатели степеней; K - общий поправочный коэффициент, учитывающий изменения условий обработки. Значения коэффициентов и показателей степеней выбирают из справочников.

По полученной скорости резания V определяют частоту вращения фрезы $n = \frac{1000V}{\pi D}$ и ее корректируют по паспорту станка и выбирается фактическое, ближайшее меньшее к подсчитанному: $n_ф \le n$. По $n_ф$ проводится перерасчет скорости резания.

Далее производится расчет мощности резания N_p и сравнение с мощностью станка $N_p < N_{ст}$.

Глава 11

Шлифование

11.1. Особенности шлифования

Шлифованием называют процесс обработки металлов резанием с помощью абразивного инструмента на шлифовальных станках.

Абразивные режущие инструменты состоят из большого числа произвольно расположенных и скрепленных связкой зерен абразивных материалов. Абразивные инструменты являются пористыми телами, в которых пористость выражена в виде охватывающей весь объем инструмента системы пор и микротрещин. Абразивные инструменты имеют развитый микрорельеф рабочих и свободных поверхностей. Шлифование абразивными инструментами выполняют на скоростях, превышающих скорости обработки металлов лезвийными инструментами в 10 раз и более. Шлифование является процессом массового скоростного микрорезания материала обрабатываемой заготовки большим числом абразивных зерен, отличающихся непостоянством углов резания, часто невыгодно ориентированных относительно плоскости резания.

Особенностью шлифования является срезание каждым абразивным зерном как режущим зубом небольшого слоя металла, в результате чего на поверхности детали остается царапина ограниченной длины и весьма малой площади поперечного сечения. Обработанная шлифованием поверхность детали образована совокупностью множества царапин - следов резания всех абразивных зерен, расположенных на режущей поверхности абразивного инструмента. Еще одной характерной особенностью шлифования является то, что в зоне работы отдельных абразивных зерен развиваются высокие контактные температуры, часто превышающие температуру плавления стали, а поверхностные слои обрабатываемой заготовки, поглощающие большую долю образующейся теплоты, в течение тысячных долей секунды нагреваются до 150-1500°С, а затем столь же быстро охлаждаются до 20-350°С. Общее количество теплоты, образующейся при шлифовании, намного превышает теплообразование при обработке лезвийными инструментами.

Шлифование применяется для завершающей чистовой обработки деталей, позволяя получать поверхности с шероховатостью R = 0,08-0,32 мкм и точностью размеров по 6-7 квалитетам.

11.2. Характеристики шлифовальных кругов и виды шлифования

Наиболее распространенными абразивными инструментами являются шлифовальные круги, которые состоят из абразивных зерен и связки. Шлифо-

вальные круги характеризуются качеством материала абразивных зерен, зернистостью, материалом связки, твердостью, структурой, формой и размерами.

Характеристика абразивного материала дана в главе 2.9.

Зернистость дробленных абразивных материалов классифицируется и определяется размерами основной фракции шлифовальных зерен и отмечается соответствующим номером. Каждый номер зернистости имеет размерную характеристику зерна в мкм.

Абразивные зерна делятся на 4 группы: шлифзерна - от № 200 до № 16 (размеры зерен от 2000 до 160 мкм); шлифпорошки - от № 12 до № 3; микропорошки - от М63 до М14; тонкие микропорошки - от М10 до М1. Размеры зерен определяются размером ячейки сита, через которое оно проходит. Размеры зерен микропорошков определяются микроскопическим или фотоэлектрическим методом измерения.

Алмазные зерна делятся на две группы: шлифпорошки (от 630/500 до 50/40) и микропорошки (от 60/40 до 1/0). Зерна эльбора делятся на три группы: шлифзерна зернистостью от ЛО 315/250 до ЛО 200/160; шлифпорошки от ЛО 160/125 до ЛО 50/40; микропорошки от ЛМ 40/28 до ЛМ 5/3.

Зернистость алмазов и эльбора обозначается дробью, в числителе которой наибольший, а в знаменателе - наименьший размер зерен основной фракции в мкм.

Связки применяются в основном неорганические, органические и металлические. Из неорганических связок самой распространенной является керамическая, которая состоит из огнеупорной глины, полевого шпата, кварца, талька и мела. Круги на керамической имеют равномерную твердость, зерна получаются более открытые и поэтому работают с большой производительностью. Кроме того, такие круги не чувствительны к действию воды, масла и высокой температуры, что особенно важно. Основным недостатком таких кругов является их большая хрупкость.

Органические связки: вулканитовая, бакелитовая и глифталитовая - придают кругам большую прочность и упругость, вследствие чего шлифовальные круги на такой связке допускают значительные окружные скорости. Недостатками кругов на этих связках являются большая чувствительность к высоким температурам, их легкая засаливаемость (что требует частой правки) и высокая стоимость изготовления.

Металлические связки, которые состоят из металлической основы (алюминий, олово, медь) и наполнителя (карбид кремния, электрокорунд), применяют в алмазных и эльборовых кругах.

Под твердостью шлифовального круга понимается сопротивляемость связки вырыванию абразивных зерен из массы связки под действием внешних сил. Связка должна удерживать абразивные зерна до тех пор, пока они остры и способны резать, а также давать им возможность удаляться с поверхности шлифовального круга при затуплении.

Твердость шлифовального круга определяют вдавливанием шарика, сверлением лунки, пескоструйной обработкой. Шлифовальные круги имеют следующие категории твердости и обозначаются: М1, М2, М3, СМ1, СМ2, С1, С2, СТ1, СТ2, СТ3, Т1, Т2, ВТ1, ВТ2, ЧТ1, ЧТ2. Буквы означают: М - мягкий, СМ - среднемягкий, С - средний, СТ - среднетвердый, Т - твердый, ВТ - весьма твердый, ЧТ - чрезвычайно твердый. Цифры 1, 2 и 3 после букв характеризуют твердость в порядке ее возрастания.

Шлифовальные круги по твердости выбирают на основе общеизвестных положений. Твердые материалы необходимо обрабатывать мягкими кругами (М, СМ, С). При обработке вязких материалов (цветных металлов, мягких сталей) также необходимо выбирать мягкие круги (М, СМ), но более крупнозернистые. При шлифовании фасонных поверхностей следует применять более твердые круги для сохранения фасонного профиля шлифовального круга.

В зависимости от количественного соотношения в единице объема абразивных зерен, связки и пор шлифовальный инструмент имеет различные структуры. Различают 13 номеров структур - 0 до 12. Нулевая структура имеет наибольшую плотность (объем абразивных зерен равен 62 %). С повышением номера структуры объем абразивных зерен уменьшается и у высокопористых кругов объем пор может достигать 75 %. Высокая пористость дает шлифовальным инструментам лучшие условия для охлаждения и для отвода стружки и абразивного шлама.

Важной характеристикой алмазных инструментов, определяющих их производительность и стоимость, является концентрация (содержание) алмазов. За 100% концентрацию принято содержание 4,39 карата алмазов в 1 см^3 алмазоносного слоя (или 0,878 м^2 в 1 мм^1), что занимает около 25 % его объема. Инструмент выпускают с концентрацией в пределах от 25 до 200 %.

Различают следующие виды шлифования: наружное круглое шлифование, внутреннее круглое шлифование, плоское шлифование, специальное шлифование (зубошлифование, резьбошлифование и др.).

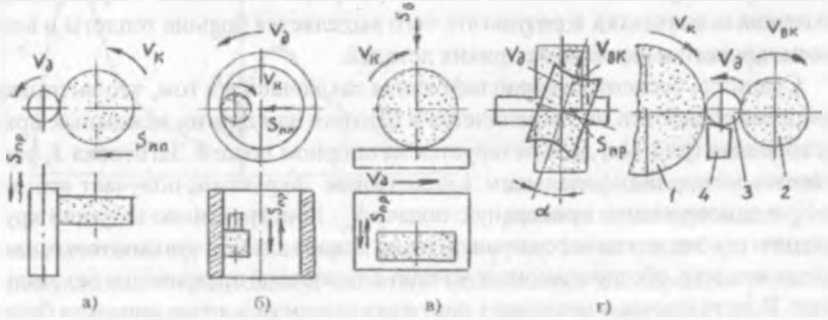


Рис. 11.1. Схемы шлифования

При наружном круглом шлифовании шлифующий круг и обрабатываемая деталь вращаются в одну сторону (рис.11.1,а). Шлифовальный круг совершает главное движение $V_к$, а деталь - круговую подачу $V_д$. Кроме того, обрабатываемая деталь имеет продольное перемещение параллельно оси вращения круга $S_{пр}$. В конце каждого одинарного или двойного прохода шлифовальный круг получает поперечное перемещение на глубину резания $S_{поп}$. По этой схеме обрабатывают относительно длинные детали.

Наружным круглым шлифованием можно обрабатывать конические поверхности. Различают также врезное шлифование. Движение подачи при врезном шлифовании обеспечивается только в одном направлении - перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали. Ширина обрабатываемой поверхности, как правило, должна быть меньше ширины абразивного инструмента.

При круглом внутреннем шлифовании (рис.11.1,б) шлифовальный круг и деталь имеют вращательное движение вокруг параллельных осей соответственно $V_к$ и $V_д$. Движения продольной подачи $S_{пр}$ и поперечной подачи $S_{поп}$ происходят так же, как при наружном круглом шлифовании, и приложены обычно к шлифовальному кругу. При круглом внутреннем шлифовании возможна также обработка внутренних конических поверхностей.

При плоском шлифовании периферией круга (рис.11.1,в) обеспечивается наиболее высокая точность обработки, лучшие показатели качества обработанной поверхности, возможна обработка деталей малой жесткости. При плоском шлифовании возвратно-поступательное продольное движение $V_д$ и прерывистое движение поперечной подачи $S_{поп}$ совершает заготовка или шлифовальный круг Движение подачи круга $S_к$ на величину глубины резания осуществляется в крайнем положении стола станка по мере обработки всей плоскости шлифования. Если шлифуемая поверхность уже ширины круга, то вертикальное движение подачи осуществляется на каждый двойной ход стола.

Применяется также плоское шлифование не периферией круга, а торцом шлифовального круга. При плоском торцевом шлифовании одновременно участвуют в резании намного больше режущих элементов - зерен (большая площадь контакта), в результате чего выделяется больше теплоты и возможны прижоги и коробление тонких деталей.

Сущность бесцентрового шлифования заключается в том, что заготовка в процессе обработки не закрепляется в центрах или других зажимных приспособлениях (рис.11.1,г), а базируется на опорном ноже *4*. Заготовка *3*, располагаясь между шлифовальным *1* и ведущим *2* кругами, получает вращение $V_д$ и одновременно продольную подачу $S_{пр}$. Конструктивно ведущий круг выполнен так же, как шлифовальный, но на основе вязких, вулканитовых связующих веществ, обеспечивающих контакт с заготовкой практически без скольжения В этом случае мгновенная окружная скорость в точке контакта будет одинаковой для заготовки и ведущего круга. Для обеспечения перемещения заготовки вдоль оси шлифовального круга у ведущего круга предусмотрен

наклон в вертикальной плоскости на 0-8° к оси шлифовального круга. Учитывая это, а также одинаковые окружные скорости ведущего круга и детали в месте контакта, разложим вектор угловой скорости ведущего круга на составляющие относительно детали: вертикальную - вектор угловой скорости детали и горизонтальную - вектор скорости перемещения детали вдоль своей оси. Тогда окружная скорость детали $V_д = V_в cosaK$, а скорость продольного перемещения детали или продольная подача $S_{пр} = V_в sinaK$. В этих определениях: а - угол наклона оси ведущего круга, а K - коэффициент проскальзывания. Шлифование с осевым перемещением детали называется шлифованием на проход.

При а = *0* (продольная подача $S_{пр} = 0$) производят обработку методом врезного шлифования

Для того, чтобы контакт ведущего круга с деталью был по линии, а не в точке (при повороте оси ведущего круга), ведущий круг подвергается правке (см.рис.11.1,г) однополостного гиперболоида вращения.

11.3. Элементы процесса шлифования

Стружкообразование при шлифовании принципиально не отличается от стружкообразования лезвийными инструментами. Однако, если у лезвийных инструментов форма, размеры и расположение режущих лезвий определены и задаются значениями угловых и линейных геометрических параметров, то абразивные зерна, как режущие зубья, имеют неправильную геометрическую форму и расположены в массе шлифовального круга также неупорядочено, случайно. Таким образом, геометрические угловые параметры поверхностей на режущих лезвиях абразивных зерен имеют случайный, вероятностный характер и колеблются в широких пределах.

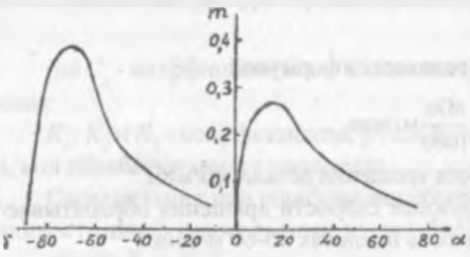


Рис.11.2 Относительная частота значений передних γ и задних α углов на режущих лезвиях абразивных зерен шлифовальных кругов [3].

На рис.11.2 показаны кривые распределения значений передних и задних углов шлифовальных кругов из абразивных зерен электрокорундов и нитрида бора. Наибольшее значение относительной частоты m наблюдается для передних углов при γ = -75° и для задних углов при α = 12°. Эти и другие исследования показывают, что процесс шлифования характерен малыми толщинами срезаемого слоя, кратковременностью контакта абразивного зерна и заготовки, большими ско-

ростями деформирования и большими отрицательными значениями наружных углов.

Элементами режима резания при круглом наружном шлифовании являются: глубина резания (поперечная подача), продольная подача, окружные скорости шлифовального круга и детали.

Глубина резания t - толщина срезаемого слоя за один проход шлифовального круга. Глубина резания совпадает с величиной поперечной подачи круга, которая осуществляется в крайнем положении круга относительно обрабатываемой детали, когда круг по ширине частично выходит за пределы детали. При черновом шлифовании глубину резания (поперечную подачу $S_{поп}$) берут в пределах 0,01-0,08 мм и при чистовом - 0,005-0,015 мм.

Продольная подача $S_{пр}$ - это продольное перемещение обрабатываемой детали (или круга) в миллиметрах за один оборот детали (мм/об). Продольную подачу берут в долях от ширины В шлифовального круга. При черновом шлифовании берется $S_{пр}$ = (0,3-0,7) В, а при чистовом - $S_{пр}$ = (0,2-0,4) В.

Скоростью резания при шлифовании $V_к$ называют окружную скорость шлифовального круга. Скорость шлифования, обычно выражаемую в м/сек, рассчитывают по формуле:

$$V = \frac{\pi D n}{1000 \cdot 60},$$

где D - диаметр шлифовального круга, мм; n - частота вращения шпинделя, об/мин. Окружная скорость шлифовального круга обычно не превышает 30 м/сек. Этот предел ограничен механической прочностью шлифовальных кругов, выполненных на керамической связке. Шлифование со скоростями более 30 м/сек допустимо только при использовании кругов, выполненных на металлических связках.

Скорость вращения детали определяется формулой

$$V_д = \frac{\pi D n}{1000} \text{ м/мин},$$

где D - диаметр детали, мм; n - частота вращения детали, об/мин.

Обычно при шлифовании окружные скорости вращения обрабатываемой детали из стали и чугуна находятся в пределах 20-60 м/мин.

Объем металла, срезаемый за один оборот обрабатываемой детали, равен $Q = \pi D\, t S_{пр}$, мм^3, где D- диаметр детали, мм, t - глубина резания, мм, $S_{пр}$ - продольная подача, мм/об.

При шлифовании равнодействующая P нормальных и касательных сил, действующих на рабочие поверхности круга, является суммой трех сил P_z, P_y и

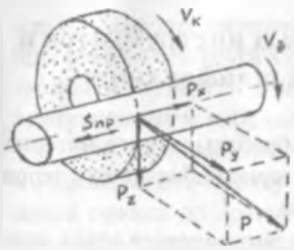


Рис.11.3. Схема сил, действующих при шлифовании

P_z (рис.11.3). Так как тангенциальная P_z действует в направлении главного движения резания, то именно она определяет значение эффективной мощности резания. Радиальная сила P_y, вызывая упругие деформации, оказывает значительное влияние на точность обработки и виброустойчивость процесса резания. Осевая сила P_x определяет мощность привода подачи.

При шлифовании радиальная составляющая P_y силы резания всегда больше тангенциальной составляющей P_z в 1,5-3 раза из-за больших отрицательных передних углов, малых толщин срезаемого слоя и больших радиусов округления на абразивных зернах.

Исследованиями установлено, что при шлифовании конструкционных сталей, чугунов и высоколегированных сплавов, затрачиваемая эффективная мощность (квт) для наружного и внутреннего круглого шлифования выражается зависимостью:

$$N_{e\ кр} = C_N S_{пр} V^{0,7} S_{пп} \qquad (11.1)$$

Для плоского шлифования

$$N_{e\ пл} = C_N S_{пп} S_{пр}^{\ 0,7} S_в^{\ 0,7} \qquad (11.2)$$

Входящий в эти зависимости коэффициент C_N зависит от вида шлифования и диаметра шлифуемой детали D, мм:

$$C_N = C_0 D_д^{\ n} K_1 K_2 K_3 \qquad (11.3)$$

где $C_в$ - коэффициент и n - показатель степени, зависящие от вида шлифования;

K_1, K_2 и K_3 - коэффициенты, учитывающие твердость круга, ширину круга, вид обрабатываемого материала.

Силы резания при шлифовании обычно невелики. Однако эффективная мощность шлифования велика из-за большой скорости круга $V_к$: $N_e = P_z V_к$, откуда $P_z = N/V_к$.

Используя уравнения (11.1), (11.2) и (11.3) получим:

для наружного и внутреннего круглого шлифования

$$P_{z\,кр} = C_0 D_д^{\ n} S_{пр} V_д^{\ 0,7} S_{пп}^{\ 0,7} K_1 K_2 K_3 / V_к \qquad (11.4)$$

а для плоского шлифования

$$P_{z\,пл} = C_в S_{пп} S_{пр}^{\ 0,7} S_в^{\ 0,7} K_1 K_2 K_3 / V_к \qquad (11.5)$$

11.4. Характер изнашивания абразивных инструментов и назначение режимов резания при шлифовании

Износ абразивного инструмента зависит от обрабатываемого материала, характеристики абразивного инструмента (материал абразивных зерен, зернистость, твердость, структура), режима резания.

Характерными видами износа являются истирание вершин зерен, выкрашивание зерен, истирание связки, вырывание зерен, забивание пор частицами обрабатываемого материала и абразивным шламом.

В зависимости от условий шлифования могут происходить все виды изнашивания или один из них является преобладающим.

В процессе шлифования абразивные зерна изнашиваются тем интенсивнее, чем тверже обрабатываемый материал и чем выше его истирающие свойства. С изнашиванием зерен возрастают силы резания, способные вырвать из режущей поверхности круга изношенные зерна. Вырывание изношенных зерен приводит к обновлению режущей поверхности. В резание включаются новые неизношенные зерна из нижних слоев круга. Таким образом, происходит самозатачивание круга. Чтобы использовать свойство самозатачивания абразивных инструментов, шлифование твердых материалов с повышенными истирающими свойствами ведут мягкими шлифовальными кругами.

В процессе шлифования, образующаяся стружка срезаемого слоя и шлифовальный шлам, содержащий частицы металла, осколки абразивных зерен и связок, накапливаются в замкнутом пространстве между соседними зернами и порами шлифовального круга. За время холостого цикла, накопившаяся стружка и шлам в объеме поры, под действием центробежных сил и потока охлаждающей жидкости имеет возможность удаляться из пор. Однако часть стружки и шлама застревает в объемах пор и через некоторый промежуток времени поры на режущей поверхности оказываются заполненными. Такое явление называют засаливанием круга.

Засаленный круг теряет режущие свойства, в результате чего выделяется большое количество тепла, повышается температура на режущей поверхности круга и обрабатываемой поверхности детали. Вследствие этого, снижается качество обрабатываемой детали, что выражается прижогами на обработанной поверхности.

Таким образом, мягкие и среднемягкие абразивные инструменты изнашиваются преимущественно благодаря их способности к самозатачиванию. Более твердые абразивные инструменты изнашиваются вследствие частичного раскрашивания и частичного притупления вершин зерен от истирающего действия обрабатываемого материала

По мере изнашивания режущие поверхности постепенно изменяют фор-

му и размеры. Износ шлифовального круга по ширине происходит неравномерно: наиболее интенсивно изнашиваются места угловых переходов. Износ шлифовального круга характеризуется увеличением шероховатости обработанной поверхности, снижением точности обработки, появлением прижогов, возникновением вибраций, повышением мощности.

Для восстановления режущей способности и профиля круга необходимо производить правку круга. Время работы абразивного инструмента от одной правки до другой называют периодом стойкости. Период стойкости абразивных кругов составляет T=5-60 мин.

Очень важную роль при шлифовании играет смазочно-охлаждающая технологическая среда (СОТС).

На всех операциях обработки абразивным инструментом в единицу времени снимается множество мелких стружек, непрерывно образуется шлифовальный шлам. Все эти отходы обработки следует непрерывно удалять из зоны обработки и с рабочих органов станка.

Смазочное действие СОТС при обработке деталей абразивным инструментом сводится к снижению работы трения режущих и давящих абразивных зерен, связки, частиц материала и отходов обработки, налипших на рабочую поверхность инструмента, а также к предотвращению засаливания. Моющее действие СОТС заключается в удалении (вымывании) частиц материала, продуктов износа абразивного инструмента и других отходов обработки с рабочей поверхности инструмента, из зоны резания, с поверхности обрабатываемой детали и деталей станка.

Реализация функциональных свойств СОТС встречает серьезные затруднения прежде всего из-за окружных и торцевых воздушных потоков, создаваемых вращающимися с большой скоростью шлифовальными кругами и препятствующих доступу СОТС в зону шлифования. Ввиду особенностей пористого строения абразивный круг работает как центробежный насос. Воздух, находящийся в порах круга, отбрасывается центробежной силой к его периферии, что создает внутри круга разряжение, а новые объемы воздуха засасываются через торцы круга. Мощные вихревые воздушные потоки создаются также шероховатой периферией и торцами абразивных кругов. Поэтому правильный метод подвода СОТС значительно повышает работоспособность абразивного инструмента.

При выборе режима резания, в первую очередь, определяют характеристику шлифовального круга (форму, размеры, материал абразива, зернистость, твердость, структуру, связку, класс круга) в зависимости от свойств обрабатываемого материала.

Вторым шагом является выбор глубины резания t (или поперечную подачу $S_{поп}$).

После этого определяют продольную подачу $S_{пр}$ и на основе ее определяют минутную подачу $S_м = S_{пр} n$. Затем выбирают окружную скорость V (или

скорость стола при плоском шлифовании) и определяется частота вращения детали n и корректируют ее по паспортным данным станка. По принятой фактической частоте вращения детали определяют фактическую окружную скорость детали.

После этого выбирают окружную скорость шлифовального круга $V_к$ (скорость резания), тщательно учитывая недопустимость превышения этой скорости против указанной в характеристике круга.

Вычисляют силу P_z и мощность, необходимую для шлифования $N_э$. Эта мощность должна быть менее или равна мощности на шпинделе станка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адаскин А.М. Обработка материалов резанием при лезвийной обработке. М. 1990. 2. 2.Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. М. Машиностроение, 1977.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М., 1975.
4. Барботько А.И., Зайцев А.Г. Теория резания металлов. Воронеж, 1990.
5. Верещака А.С., Третьяков И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М., 1986.
6. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М., 1985.
7. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов. М.,1984.
8. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М., 1974.
9. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ. Высшая школа, 1991.
10. Лоладзе Т.Н. Износ режущего инструмента. М., 1958.
11. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. М.,1966.
12. Резников А.Н. Теплофизика резания. М., 1969.
13. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. М., 1979.
14. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М., 1989.
15. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания и износа инструмента. Волгоград, 1988.
16. Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием (Под ред. М.И. Каушина). М., 1979.
17. Технология обработки конструкционных материалов. (Под ред. П.Г. Петрухи). Высшая школа, 1991.
18. Технология металлов и других конструкционных материалов. (Под ред. Н.П. Дубинина). Высшая школа, 1969.
19. Технология металлов и других конструкционных материалов. (Под ред. Г.А. Глазова и К.М. Скобникова). М.,1972.
20. Трент Е.М. Резание металлов. М. 1980.
21. Усманов К.Б., Якунин Г.И. Влияние внешних сред на износ и стойкость режущих инструментов. Фан, 1984.
22. Якубов Ф.Я. Энергетические соотношения механической обработки металлов. Фан, 1985.
23. Якимов А.В, Слободяник.П.Т ,Усов.А.В. Теплофизика механической обработки. Киев, 1991.
24 Ящерицын П.И,Еременко.М.Л,Фельдштейн.Е.Э. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах. Минск, 1990.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
Глава 1. Основы механической обработки металлов резанием 5
1.1.Основные определения 5
1.2.Режущая часть инструмента 6
1.3.Геометрические параметры режущей части инструмента 7
Глава 2. Инструментальные материалы 12
2.1.Требования, предъявляемые к инструментальным материалам 12
2.2.Углеродистые инструментальные стали 14
2.3. Легированные инструментальные стали 15
2.4.Быстрорежущие инструментальные стали 17
2.5.Твердые сплавы 19
2.6.Минералокерамика 22
2.7.Природные и синтетические алмазы 23
2.8.Сверхтвердые материалы 24
2.9.Абразивные материалы 26
2.10.Основные пути и методы повышения качества режущих инструментов 28
Глава 3. Физические основы резания металлов 31
3.1.Элементы резания и размеры срезаемого слоя при продольном точении 31
3.2.Процесс стружкообразования 33
3.3.Дислокационный механизм процесса резания 37
3.4.Основные характеристики поверхностного слоя обработанной поверхности 42
3.5.Качество обработанной поверхности 43
3.6.Усадка стружки 46
3.7.Наростообразование 47
Глава 4. Тепловые явления в зоне резания 50
4.1.Источники образования тепла 50
4.2.Факторы, влияющие на температуру резания 55
Глава 5. Износ и стойкость режущего инструмента 57
5.1.Износ режущего инструмента 57
5.2.Развитие износа во времени 62
5.3.Стойкость режущего инструмента 65
5.4.Физическая природа стойкости 67

Глава 6. Влияние смазочно-охлаждающих технологических сред на процесс резания 70
6.1.Физико-химические явления взаимодействия со средой при резании 70
6.2. Виды СОЖ 75
Глава 7. Силы резания 77
7.1.Определение сил резания 77
7.2.Факторы, влияющие на силы резания 79
Глава 8. Точение 82
8.1.Основные виды точения и классификация резцов 82
8.2.Резцы для станков с числовым программным управлением 89
8.3.Последовательность выбора режимов резания 93
8.4.Оптимизация процесса резания 96
Глава 9. Сверление 104
9.1. Назначение и основные типы сверл 104
9.2.Элементы процесса резания при сверлении 108
9.3. Силы резания при сверлении 110
9.4.Характер изнашивания спиральных сверл 112
9.5. Назначение режимов резания при сверлении 115
Глава 10. Фрезерование 116
10.1.Общие положения фрезерования 116
10.2.Основные типы фрез и их назначение 116
10.3.Геометрические параметры фрез 118
10.4.Элементы процесса резания при фрезеровании 120
10.5.Силы резания при фрезеровании 125
10.6.Характер изнашивания фрез 127
10.7. Порядок назначения режимов резания при фрезеровании 129
Глава 11. Шлифование 131
11.1.Особенности шлифования 131
11.2.Характеристика шлифовальных кругов и виды шлифования 131
11.3.Элементы процесса шлифования 135
11.4.Характер изнашивания абразивных инструментов и назначение режимов резания при шлифовании 138
Литература 141

Камал Бекмуратович Усманов

ОСНОВЫ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Издательство «Akademiya»
Ташкент 2005

Редактор Д.Кабулова
Дизайнер Р.Султанов
Корректор Д.Кабулова
Тех.редакторы Р.Султанов, Н.Курбанова
Ответственный за выпуск Б.Умаров

Сдано в набор 20.12.05. Подписано к печати 28.12.05.
Формат 60x84$^{1}/_{16}$. Гарнитура Таймс.
Офсетная печать. Усл.п.л. 9,0. Изд.п.л. 9,0. Тираж 2000.
Цена договорная.

Отпечатано в типографии ООО «Сано-Стандарт».
г. Ташкент, ул. Ширак, 100.

1484-95