

**ЛЕКЦИИ ПО КУРСУ
ОСНОВЫ ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ МЕТАЛЛОВ**

Модуль 1. Понятие о системе резания как о совокупности одновременно совершаемых взаимосвязанных процессов

1.1. Структурная схема процесса резания

Процесс резания представляет собой совокупность физических процессов и явлений, одновременно протекающих на контактных площадках режущего инструмента и взаимосвязанных между собой. К ним относятся – кинематика процесса резания, пластические деформации и разрушения в зоне стружкообразования, напряженное состояние инструмента и заготовки, трение, тепловые, химические и др. явления.

Структурная схема процесса резания определяет взаимосвязь между входными и выходными параметрами процесса, которые связаны между собой процессом резания (рис. 1.1).

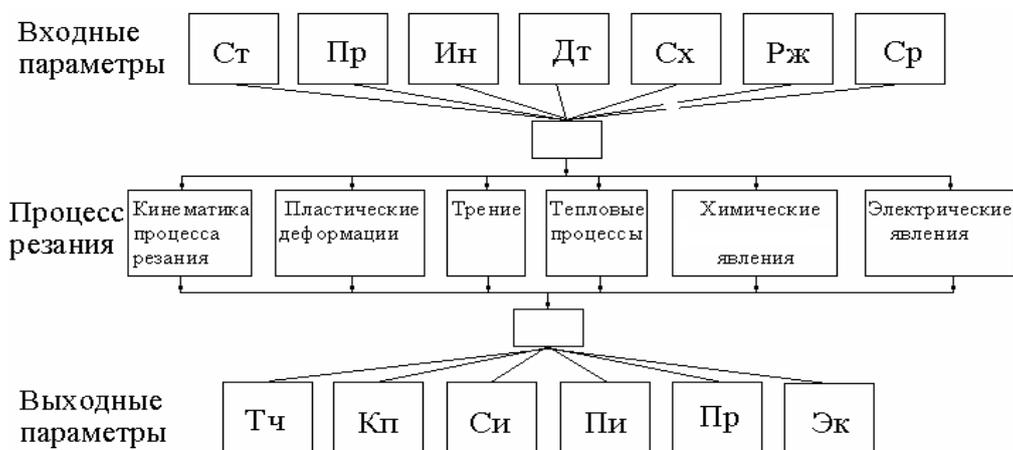


Рис. 1.1. Структурная схема процесса резания

Входные параметры характеризуют систему СПИД – станок, приспособление, инструмент, деталь. Их можно разделить на 2 группы. Первая характеризует заготовку, параметры которой задаются конструктором (деталь D_t – ее материал и размеры) и технологом (способ получения заготовки, припуск, точность). Вторая группа характеризует станок C_t , инструмент I_n , схему обработки C_x , режимы резания $P_{ж}$, приспособление P_r , технологическую среду C_p .

Выходные параметры определяются как результат воздействия процесса резания на заготовку (они определяют ее эксплуатационные характеристики: точность $T_{ч}$, качество поверхностного слоя $K_{п}$ (шероховатость, наклеп)) и на инструмент (стойкость $C_{и}$, прочность $P_{и}$ режущего инструмента), а также характеризуют производительность P_r и экономичность \mathcal{E}_k процесса резания.

Процесс резания связывает между собой входные и выходные параметры.

Способ обработки материалов определяется видом энергии подводимой в зону обработки (механической, электрической и др.). Соответственно различают механическую, электроэрозионную, электрохимическую, лазерную и др. виды обработки.

Механическая обработка представляет собой процесс снятия стружки путем внедрения в поверхностный слой обрабатываемой заготовки режущего клина инструмента, который двигается под действием сил привода станка.

Механическую обработку подразделяют на лезвийную и абразивную.

1.2. Классификация методов обработки

Большое разнообразие возможных комбинаций процесса резания можно классифицировать по следующим признакам:

1) По количеству участвующих в процессе резания режущих кромок:

- свободное резание – в работе принимает участие одна режущая кромка (рис. 1.4, а);
- несвободное резание – в работе участвуют две и более сопряженных между собой режущих кромок (рис. 1.4, б).

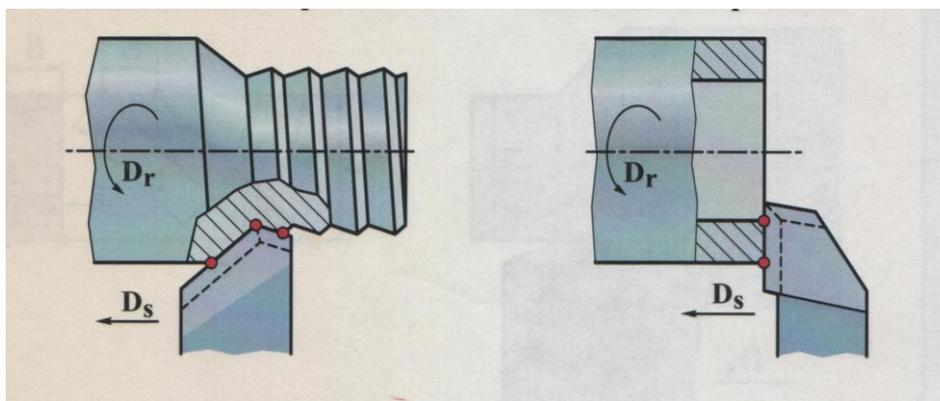


Рис. 1.4. Схема несвободного (а) и свободного (б) резания

2) По ориентации главной режущей кромки относительно вектора скорости резания (рис. 1.5):

- прямоугольное резание, если вектор скорости главного движения перпендикулярен режущей кромке;
- косоугольное резание, когда вектор скорости главного движения не перпендикулярен режущей кромке.

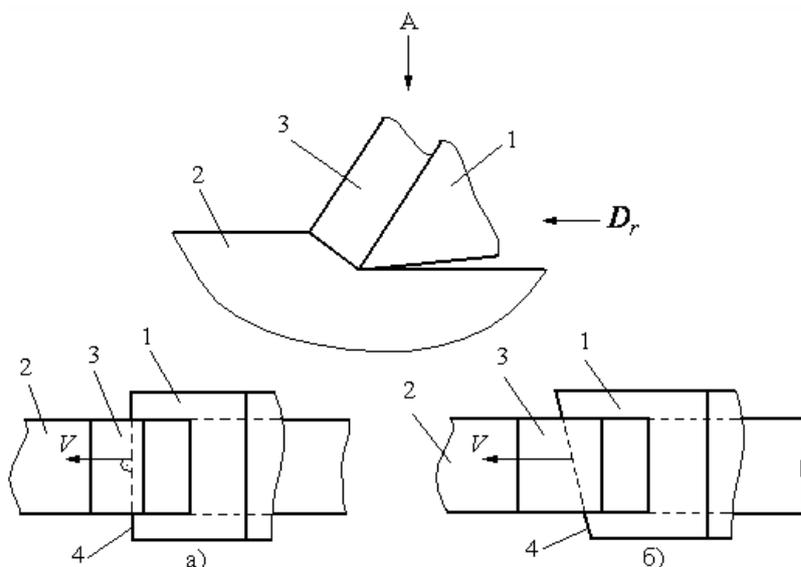


Рис. 1.5. Схема прямоугольного (а) и косоугольного (б) резания:
1 – резец, 2 – заготовка, 3 – стружка, 4 – главная режущая кромка резца

- 3) По количеству одновременно участвующих в работе режущих клиньев (лезвий):
 - однолезвийная обработка (точение, строгание);
 - многолезвийная обработка (фрезерование, зенкерование).
- 4) По форме сечения срезаемого слоя:
 - резание с постоянным сечением срезаемого слоя (точение, сверление);
 - резание с переменным сечением срезаемого слоя (фрезерование).
- 5) По времени контакта режущего лезвия с обрабатываемой заготовкой:
 - непрерывная обработка (точение);
 - прерывистая обработка (фрезерование).
- 6) По характеру контактных деформаций стружки:
 - резание без вторичных пластических деформаций;
 - резание с вторичными пластическими деформациями без разрушения контактного слоя стружки;
 - резание с вторичными деформациями контактного слоя стружки и его разрушением (резание с наростом).
- 7) По непрерывности процесса стружкообразования:
 - резание с образованием сливной стружки;
 - резание с образованием стружки скалывания.

Модуль 2. Элементы режима резания и геометрия срезаемого слоя

2.1. Элементы режима резания

К элементам режима резания относятся: скорость резания, подача, глубина резания (рис. 1.2 и 2.1).

Скорость резания, V [м/мин] – путь перемещения обрабатываемой поверхности заготовки в единицу времени относительно режущей кромки инструмента

$$V = \frac{\pi D n}{1000},$$

где n – частота вращения (об/мин), D – диаметр обрабатываемой поверхности, (мм).

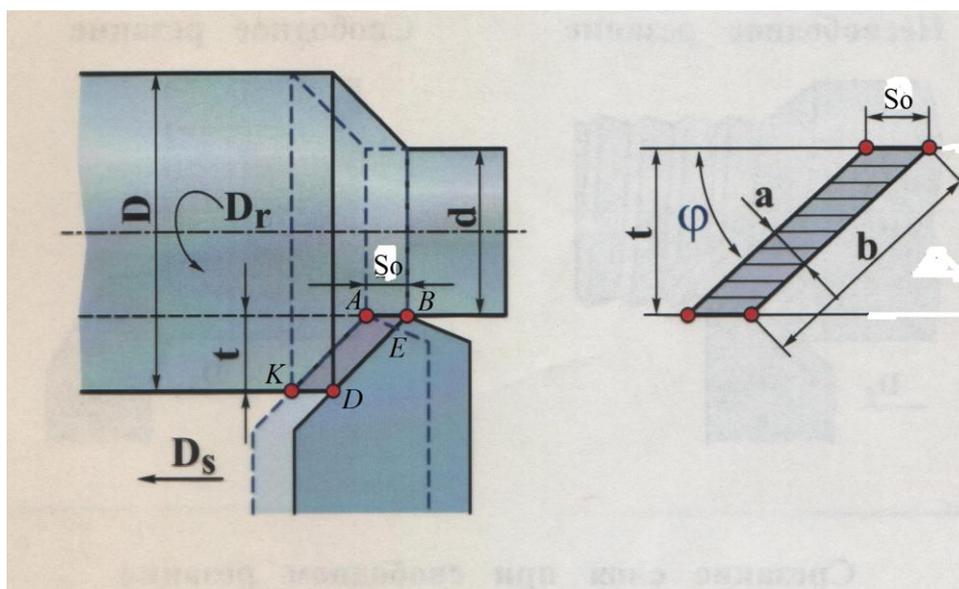


Рис. 2.1. Схема к определению элементов режима резания и геометрии срезаемого слоя

Подача, S – величина перемещения режущей кромки резца в направлении движения подачи (D_s). Рассматривают подачу на оборот S_0 , [мм/об] – перемещение режущей кромки резца в направлении движения подачи за один оборот заготовки; минутную подачу $S_{\text{мин}}$ или скорость движения подачи V_s [мм/мин] – перемещение режущей кромки резца в направлении движения подачи за одну минуту: $S_{\text{мин}} = V_s = S_0 \times n$.

Глубина резания, t – величина слоя материала снимаемого за один проход инструмента, рассматриваемого как расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями:

$$t = \frac{D - D_0}{2},$$

где D_0 – диаметр обработанной поверхности, (мм).

Основное технологическое время, T_0 – это время, затрачиваемое непосредственно на процесс снятия стружки:

$$T_0 = L/V_s = T_0 = \frac{y + l + \Delta}{S_0 n},$$

где L – длина пути резания инструмента в направлении движения подачи, мм; l – длина обработанной поверхности, мм; y – величина врезания инструмента, мм; Δ – величина перебега инструмента, мм (рис. 2.2).

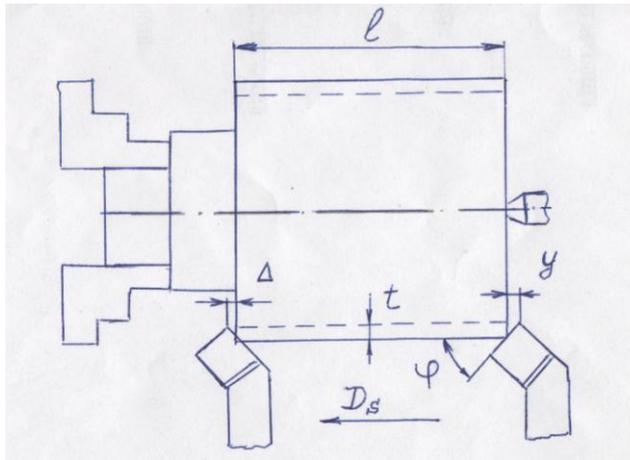


Рис. 2.2. Схема для определения основного технологического времени

2.2. Геометрия срезаемого слоя

К геометрии срезаемого слоя относятся: ширина срезаемого слоя, толщина срезаемого слоя и площадь срезаемого слоя (рис. 1.5).

Ширина срезаемого слоя, b – расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями измеренное вдоль главной режущей кромки:

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}.$$

Толщина срезаемого слоя, a – расстояние между двумя последовательными положениями поверхности резания:

$$a = S_0 \times \sin \varphi.$$

Площадь срезаемого слоя, F :

$$F = S_0 t = ab.$$

Рассматривают номинальную площадь срезаемого слоя АВДК, действительную – АЕДК и остаточную – АВЕ. Остаточная площадь срезаемого слоя определяет расчетную (геометрическую) высоту микронеровностей. Для этого, выделим на рис. 6 треугольник АВЕ (рис. 2.3).

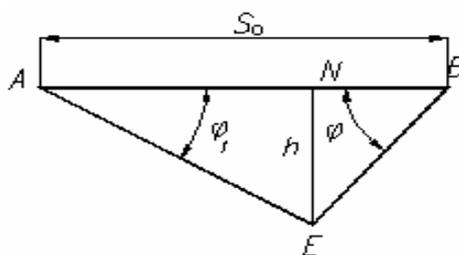


Рис. 2.3. Схема к определению высоты микронеровностей

Отрезок NE представляет собой высоту расчетной (геометрической) микронеровности (h). Из треугольника АВЕ имеем:

$$\operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{h}{|AN|}; \operatorname{tg}\varphi = \frac{h}{|NB|}.$$

$$AB = S_0 = h/\operatorname{tg}\varphi_1 + h/\operatorname{tg}\varphi = h (\operatorname{ctg}\varphi_1 + \operatorname{ctg}\varphi).$$

$$h = \frac{S_0}{\operatorname{ctg}\varphi_1 + \operatorname{ctg}\varphi}.$$

При радиусе при вершине резца не равном нулю ($r \neq 0$) величину h можно рассчитать по формуле:

$$h \approx \frac{S_0^2}{8r}.$$

Модуль 3. Инструментальные материалы

3.1. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам

1. Для того чтобы режущий клин инструмента, не деформируясь, мог срезать слой обрабатываемого материала, твердость инструментального материала должна значительно превосходить твердость обрабатываемого материала. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к инструментальному материалу, является его высокая твердость.

2. Высокие механические нагрузки на режущий клин инструмента требуют, чтобы инструментальный материал обладал достаточной механической прочностью. Режущий клин инструмента должен выдерживать высокие напряжения без хрупкого разрушения и заметного пластического деформирования. Так как инструмент может работать в условиях знакопеременных (циклических) нагрузок (прерывистое резание, непрерывное резание с переменным припуском или твердыми включениями на поверхности заготовки и т.д.), поэтому, желательным требованием к инструментальному материалу, наряду с механической прочностью на сжатие и изгиб, является высокая сопротивляемость разрушению при знакопеременном нагружении (высокий предел выносливости).

3. В процессе резания контактные площадки инструмента подвергаются высокому температурному воздействию (до 800 – 1000 °С), что может привести к температурному разупрочнению и потере твердости инструментального материала. Поэтому следующим важным требованием к инструментальному материалу является его способность сохранять свою твердость и прочностные характеристики при повышенных температурах, соответствующих температурам резания. Обычно это свойство инструментального материала называют теплостойкостью, которая является важнейшим показателем качества инструментального материала. С учетом необходимости использования инструмента в условиях периодического изменения температуры (например, прерывистое резание) инструментальный материал должен быть малочувствительным к циклическим температурным изменениям.

4. Важным условием нормальной работы инструмента является снижение вероятности появления локальных термических напряжений на контактных площадках инструмента. Такая вероятность снижается по мере роста теплопроводности инструментального материала. Поэтому последний должен обладать достаточной теплопроводностью.

5. Весьма важным свойством инструментального материала является его способность сопротивляться истиранию при контактном взаимодействии с обрабатываемым материалом. Поэтому инструментальный материал должен иметь высокую износостойкость.

6. Наряду с требованиями к физико-механическим и теплофизическим свойствам инструментального материала, необходимым условием достижения достаточно высоких режущих свойств инструмента является низкая физико-химическая активность инструментального материала по отношению к обрабатываемому.

3.2. Углеродистые и легированные инструментальные стали

Для изготовления режущего инструмента применяют высокоуглеродистые, высококачественные стали с содержанием углерода 0,9...1,3% (У9А, У10А, У12А и т. д.). Углеродистые инструментальные стали обозначаются буквой «У», за которой следует цифра, характеризующая массовое содержание углерода в стали, умноженная на 0,1. Так в стали марки У10 массовое содержание углерода составляет 1%. Буква «А» в обозначении соответствует высококачественным сталям с пониженным массовым содержанием примесей.

После полной термической обработки они имеют высокую твёрдость (61...63 HRC₃), что позволяет режущему инструменту, изготовленному из данных сталей, обрабатывать заготовки из углеродистых сталей и чугунов в отожжённом и нормализованном состоянии с твёрдостью 30...32 HRC₃. Из-за низкой теплостойкости (200 °С) режущий инструмент, изготовленный из них, работает на скоростях резания не выше 20...25 м/мин.

Износостойкость углеродистых сталей в указанном диапазоне скоростей резания может быть повышена путём легирования их небольшим количеством вольфрама, хрома, кремния и марганца. Такие инструментальные стали получили название легированных (9ХС, ХВГ, ХВ6 и др.).

Легированные инструментальные стали обозначаются цифрой, характеризующая массовое содержание углерода в десятых долях процента (если цифра отсутствует, то содержание углерода 1%), за которой следуют буквы, соответствующие легирующим элементам (Г-марганец, Х-хром, С-кремний, В-вольфрам, Ф-ванадий), и цифры, обозначающие содержание элемента в процентах. Они обладают повышенной твёрдостью (HRC₃ 63...65), средняя теплостойкость – 250 °С. Из легированных сталей изготавливают сложнопрофильные мелкогабаритные инструменты: развёртки, фасонные резцы, метчики, плашки.

3.3. Быстрорежущие стали

Повышенная теплостойкость данных сталей предопределяется введением в их состав легирующих элементов (W, Mo, Cr, V и Co), образующих сложные карбиды, которые связывают практически весь углерод. Поэтому коагуляция карбидов происходит при повышенных температурах и теплостойкость стали повышается до 580...700 °С. Высокая твёрдость быстрорежущих сталей (63...70 HRC₃), прочность на изгиб и сжатие связаны с превращением (переходом) остаточного аустенита в мартенсит, а также с дисперсионным упрочнением сталей в результате выделения карбидов, не растворившихся при закалке.

Быстрорежущие стали обозначаются буквами, соответствующие карбидообразующим и легирующим элементам (В-вольфрам, М-молибден, Ф-ванадий, А-азот, К-кобальт). За буквой следует цифра, обозначающая среднее массовое содержание элемента в процентах. Цифра, стоящая в начале обозначения стали, указывает содержание углерода в десятых долях процента.

По уровню теплостойкости быстрорежущие стали делятся на три группы:

1. Стали нормальной теплостойкости – вольфрамовые быстрорежущие (P18, P9, P12) и вольфрамомолибденовые быстрорежущие стали (P6M5, P8M3).
2. Стали повышенной теплостойкости – вольфрамокобальтовые быстрорежущие (P9K5, P9K10, P6M5K5), вольфрамованадиевые быстрорежущие стали (P12Ф3, P6M5Ф3).
3. Стали высокой теплостойкости (B11M7K23, B14M7K25).

Быстрорежущие стали нормальной теплостойкости. Стали данной группы имеют твердость в закаленном состоянии 63 – 65 HRC₃, теплостойкость 620 – 630 °С. Режущие инструменты, изготовленные из сталей нормальной теплостойкости, используются при обработке заготовок из конструкционных сталей, чугунов, цветных сплавов и конструкционных пластмасс. Применяются стали дополнительно легированные азотом, например, P6AM5, которые являются модификациями обычных быстрорежущих сталей. Легирование азотом повышает твердость стали и режущие свойства инструмента.

Быстрорежущие стали повышенной теплостойкости. Повышение износостойкости и теплостойкости быстрорежущих сталей достигается дополнительным легированием их ванадием и кобальтом с соответствующим изменением содержания углерода.

Стали данной группы характеризуются повышенным содержанием углерода. Твердость сталей в закаленном состоянии достигает 65 – 67 HRC₃, теплостойкость сталей – 640 –

650 °С. Инструменты, изготовленные из сталей повышенной теплостойкости, используются при обработке заготовок из жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и сплавов, а также конструкционных сталей повышенной прочности.

Быстрорежущие стали высокой теплостойкости (стали с интерметаллидным упрочнением). Данные стали характеризуются пониженным содержанием углерода (содержание С до 0,3%) и большим количеством легирующих элементов (В11М7К23, В14М7К25). Они имеют твердость 69 – 70 HRC₃ и теплостойкость 700 – 720 °С.

Инструмент, изготовленный из таких сталей, рекомендуют для обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов (титановых, хромо-никелевых сплавов и др.).

Экономнолегированные быстрорежущие стали. В связи с возрастающей дефицитностью вольфрама и молибдена – основных легирующих элементов, используемых при производстве быстрорежущих сталей, все большее применение находят стали с низким содержанием указанных элементов или не содержащие вольфрам, которые называют экономнолегированными. Среди сталей этого типа наибольшее применение получила сталь 11РЗМЗФ2, которая обладает достаточно высокими показателями по твердости (HRC₃ 63 – 64), прочности ($\sigma_{и} = 3,4$ ГПа) и теплостойкости (до 620 °С).

Находит применение низколегированная безвольфрамовая сталь 11М5Ф (1,06% С; 5,5% Мо; 4,0% Cr; 1,5% V). Свойства стали 11М5Ф примерно на уровне соответствующих показателей стали Р6М5.

Сравнительные исследования режущих свойств инструмента из экономнолегированных сталей показали, что по режущим свойствам ближе всех к стали Р6М5 наряду с 11РЗАМЗФ2 стоят Р2М5 и 11М5Ф.

Порошковые быстрорежущие стали. Порошковая быстрорежущая сталь характеризуется однородной мелкозернистой структурой, равномерным распределением карбидной фазы, пониженной деформируемостью в процессе термической обработки, хорошей шлифуемостью, более высокими технологическими и механическими свойствами, чем стали аналогичных марок, полученных по традиционной технологии.

В частности, были разработаны порошковые быстрорежущие стали ДИ 100 (Р7М2Ф6) и ДИ 106 (Р9М2Ф5К6-М1) по ГОСТ 28393-89. Инструменты, изготовленные из указанных сталей, показали высокую эффективность в ходе многочисленных промышленных испытаний.

Карбидостали отличаются от обычных быстрорежущих сталей высоким содержанием карбидной фазы (в основном, карбидов титана), что достигается путем смешивания порошка быстрорежущей стали и мелкодисперсных частиц карбида титана. Содержание карбидной фазы в карбидостали колеблется от 30 до 70%. Пластическим деформированием, главным образом экструзией, из спрессованного порошка получают заготовки простой формы. В отожженном состоянии твердость карбидостали составляет HRC₃ 40 – 44, а после закалки и отпуска HRC₃ 68 – 70.

При использовании в качестве материала режущего инструмента карбидосталь обеспечивает повышение стойкости в 1,5 – 2 раза по сравнению с аналогичными марками обычной технологии производства. В ряде случаев карбидосталь является полноценным заменителем твердых сплавов, особенно при изготовлении формообразующих инструментов.

3.4. Твёрдые сплавы

Твёрдые сплавы являются основным инструментальным материалом, обеспечивающим высокопроизводительную обработку материалов резанием.

Стандартные твердые сплавы состоят из тугоплавких соединений (карбидов вольфрама, титана и тантала) и связующей фазы (кобальт) и подразделяются на три группы:

- 1 – однокарбидные (вольфрамовые, группа ВК, (WC + Co);
- 2 – двухкарбидные (вольфрамтитановые, группа ТК, (WC + TiC + Co);

3 – трёхкарбидные (вольфрамотитанотанталовые, группа ТТК (WC + TiC + TaC + Co).

Обозначение твердых сплавов включает буквы, характеризующие карбидообразующие элементы (В-вольфрам, Т-титан, вторая буква Т-тантал) и связку (К-кобальт). Цифра после буквы «К» обозначает массовую долю связки в процентах. Массовая доля карбидообразующих элементов в однокарбидных сплавах, содержащих только карбид вольфрама, определяется разностью между 100% и массовой долей связки. Например, сплав ВК4 содержит 4% кобальта и 96% WC. В двухкарбидных WC + TiC сплавах цифра после буквы карбидообразующего элемента обозначает массовую долю карбида этого элемента (TiC), а массовая доля карбида второго элемента (WC) определяется разницей между 100% и массовыми долями связки и карбида первого элемента (например, сплав Т5К10 содержит 5% TiC, 10% Co и 85% WC). В трехкарбидных WC + TiC + TaC сплавах цифра после букв ТТ означает массовую долю карбидов титана и тантала. Массовая доля карбида вольфрама определяется разницей между 100% и массовыми долями связки и карбидов TiC и TaC. Например, сплав ТТ7К12 содержит 12% Co, 7% карбидов титана и тантала (TiC + TaC) и 81% WC.

Вольфрамо-кобальтовые твердые сплавы. Вольфрамо-кобальтовые сплавы (ВК) состоят из карбида вольфрама и кобальта. Марки сплавов этой группы различаются по содержанию в них кобальта, размерами зерен карбида вольфрама (WC) и технологией изготовления. Для оснащения режущего инструмента применяются сплавы с содержанием кобальта от 3% до 10% весовых. ВК3, ВК3-М, ВК6, ВК6-М, ВК6-ОМ, ВК8, ВК10-ХОМ. Сплавы ВК имеют самую высокую прочность на изгиб, ударную вязкость и трещиностойкость. Теплостойкость сплавов данной группы 800 °С.

При увеличении в сплавах содержания кобальта в рассматриваемом диапазоне предел прочности при поперечном изгибе и эксплуатационная прочность при резании возрастают, в то время как твердость и износостойкость уменьшаются. Так, сплав ВК3 с минимальным содержанием кобальта, как наиболее износостойкий, но наименее прочный, рекомендуют для чистовой обработки с максимально допустимой скоростью резания, а сплавы ВК8 и ВК10 – для черновой обработки с пониженной скоростью резания и увеличенным сечением среза в условиях ударных нагрузок. Таким образом, чем тяжелее условия резания (предварительная черновая обработка), тем больше кобальта должен содержать твердый сплав и наоборот, чем легче (чистовая окончательная обработка) – тем меньше кобальта и больше карбидов.

Вольфрамокобальтовые сплавы, благодаря указанным выше свойствам, рекомендуются преимущественно для обработки материалов, дающих дискретные типы стружек (элементная, стружка надлома): чугуны, цветные материалы, стеклопластики, фарфор и труднообрабатываемые материалы (коррозионностойкие, высокопрочные стали, жаропрочные сплавы на основе никеля и титана и т.д.). Для чистовой обработки рекомендуются сплавы, имеющие большую износостойкость (с малым содержанием кобальта и большим содержанием карбида вольфрама). При черновой обработке используются более прочные сплавы – с большим содержанием кобальта и соответственно меньшим содержанием карбида вольфрама.

Совершенствование вольфрамо-кобальтовых твердых сплавов (WC – Co) связано с разработкой сплавов особомелкозернистой (размер зерна $\rho \cong 1$ мкм) (например, ВК3-М и ВК6-М) и ультрамелкозернистой структуры (размер зерна $\rho \cong 0,1-0,5$ мкм) (например, ВК6-ОМ и ВК10-ОМ, ВК10-ХОМ), созданием сплавов со связками повышенной прочности и теплостойкости (например, ВРК15). Уменьшение размера зерен обеспечивается добавками карбида тантала (около 2%), ванадия (0,1%) и хрома, которые препятствуют росту зерен карбида вольфрама при спекании.

Использование твердых сплавов ультра- и особомелкозернистой структуры позволяет получить радиус округления режущих кромок инструмента в пределах 5 – 10 мкм, что соответствует радиусу округления для инструмента из углеродистой и быстрорежущей

сталей и обеспечивает получение более малой высоты микронеровностей обработанной поверхности и размерной точности. Кроме того, такие сплавы имеют более высокую однородность зерен по объему, что делает ультра- и особомелкозернистые сплавы наиболее пригодными для изготовления мелкогабаритного цельнотвердосплавного инструмента (сверла, концевые фрезы, резьбонарезной инструмент и т.д.).

Титановольфрамовые твердые сплавы. Титановольфрамовые сплавы (ТК) состоят из карбидов WC, сложного карбида TiWC и кобальта. Сплавы данной группы выпускают главным образом для оснащения инструментов при обработке резанием сталей, дающих сливную стружку. По сравнению со сплавами ВК они обладают большей стойкостью против окисления, твердостью и теплостойкостью (теплостойкость сплавов ТК ~ 900 °С, сплавов ВК ~ 800 °С), в то же время имеют меньшую теплопроводность и электропроводность, а также меньший модуль упругости. Высокая твердость твердых сплавов данной группы связана с более высокой твердостью карбида (Ti,W)C по сравнению с карбидом WC.

Сплавы ТК имеют повышенную способность сопротивляться адгезионно-усталостному изнашиванию благодаря более высокой температуре схватывания со сталью по сравнению со сплавами ВК.

Содержание карбида титана колеблется в пределах 5 – 30%, кобальта от 4 до 10%, например, Т5К10, Т14К8, Т15К6.

Так же, как и у сплавов WC-Co, с ростом содержания кобальта предел прочности при изгибе и сжатии, а также ударная вязкость у сплавов ТК увеличивается, а твердость и износостойкость снижаются.

Благодаря высокой твердости и теплостойкости сплавы данной группы предназначены для обработки заготовок из конструкционных сталей. Так же, как и для сплавов ВК, в условиях чистовой и получистовой обработки заготовок из конструкционных сталей применяются сплавы с высоким содержанием карбидов и меньшим содержанием кобальта. При черновой обработке, наоборот – с большим содержанием кобальта.

Титано-тантало-вольфрамовые твердые сплавы. Промышленные титано-тантало-вольфрамовые твердые сплавы (сплавы ТТК) состоят из трех основных фаз: карбида вольфрама WC, сложного карбида (Ti, W, Ta)C, кобальта.

Введение в сплавы карбида тантала улучшает их физико-механические и эксплуатационные свойства, что выражается в увеличении прочности при изгибе и твердости, снижает ползучесть, существенно повышает предел усталости трехфазных сплавов при циклическом нагружении, а также повышает термостойкость и стойкость против окисления на воздухе.

Различают следующие сплавы этой группы – ТТ8К6, ТТ10К8Б, ТТ7К12, ТТ20К9, в которых содержание карбида тантала колеблется от 2 до 12%.

Сплавы ТТК рекомендуют для тяжелой обработки, резания труднообрабатываемых материалов, сталей и чугунов при значительном термомеханическом нагружении инструмента, а также операций прерывистого резания, особенно фрезерования, отличающихся переменным сечением среза и циклическими термомеханическими нагрузками на режущую часть инструмента.

Безвольфрамовые твердые сплавы. В связи с высокой дефицитностью основных компонентных составляющих твердого сплава и, прежде всего, W и Co разработаны безвольфрамовые (БВТС) сплавы на основе карбидов или карбидонитридов титана с никель-молибденовой связкой. Например, ТН20 (TiC – 79%, Ni – 15%, Mo – 6%), КНТ16 (TiCN – 74%, Ni – 19,5%, Mo – 6,5%).

Сплавы отличаются высокой твердостью, окалиностойкостью, имеют низкий коэффициент трения стали и пониженную склонность к адгезионному взаимодействию, что уменьшает износ инструмента, особенно по передней поверхности, позволяет получить при обработке сталей низкую шероховатость обработанной поверхности и высокую размерную точность. Вместе с тем, БВТС в сравнении со стандартными вольфрамсодержащими

сплавами имеют более низкий модуль упругости, меньшую теплопроводность и ударную вязкость, поэтому они хуже сопротивляются ударным и тепловым нагрузкам, упругим и пластическим деформациям, имеют пониженную жаропрочность, более интенсивно разупрочняются при повышенных температурах.

БВТС рекомендуется использовать, главным образом, для чистовой и получистовой обработки (точение, фрезерование) углеродистых и легированных сталей с высокой скоростью резания и относительно небольшим сечением среза взамен титановольфрамовых сплавов.

В соответствии с рекомендациями международной организации стандартов (ISO) твердые сплавы классифицируют на шесть групп резания P, M, K, S, N, H, которые, в свою очередь, делятся на подгруппы применения в зависимости от условий обработки:

1) P – углеродистые стали в состоянии поставки и термообработанные, твердостью до 43 HRC;

2) M – нержавеющие стали;

3) K – чугуны (кроме отбеленных высокой твердостью);

4) S (бежевый) – титановые сплавы и жаропрочные сплавы на основе никеля, кобальта и т.д.

5) N – вязкие сплавы на основе алюминия и меди, а также неметаллические материалы (пластики, не содержащие абразивных включений);

6) H (серый) – материалы высокой твердости (стали твердостью свыше 43 HRC, отбеленные чугуны, графит, композиты на основе углепластиков, термообработанный поликарбонат и пр.).

Чем больше индекс подгруппы применения, тем ниже износостойкость твердого сплава и допускаемая скорость резания, но выше прочность (ударная вязкость) и допустимая подача, и глубина резания. Таким образом, малые индексы соответствуют чистовым операциям, когда от твердых сплавов требуется высокая износостойкость и малая прочность, а большие индексы – соответствуют черновым операциям, т.е. когда твердый сплав должен обладать высокой прочностью. В связи с этим каждая марка имеет свою предпочтительную область применения, в которой она обеспечивает максимальные работоспособность сплава и производительность процесса обработки.

Границы подгруппы применения определяются ориентировочно и неоднозначно. Поэтому ряд марок твердых сплавов могут хорошо работать в двух-трех подгруппах применения (например, сплав T15K6 – P10, P15, P20) или даже в различных группах применения (например, сплав BK8 – K30, K40, M30).

3.5. Минералокерамика

Различают несколько групп минералокерамики (режущей керамики): оксидную (белая керамика) на основе Al_2O_3 (Евростандарт – A₁ – pure ceramic) (ЦМ332, ВШ75, ВО-13), оксиднокарбидную (черная керамика) на основе композиции Al_2O_3 (60%) – TiC (40%) (Евростандарт – A₂ – mixed ceramic) (ВОК-63, ВОК-71), оксиднитридную (кортинит) на основе Al_2O_3 (70%) – TiN (30%) (ОНТ-20) и нитридокремниевую керамику на основе Si_3N_4 (Евростандарт – B – reinforced ceramic) (ПК-30).

По сравнению с твердыми сплавами минералокерамика имеет более высокую твердость, теплостойкость, но меньшую прочность на изгиб. Основной особенностью режущей керамики является отсутствие связующей фазы, что значительно снижает степень ее разупрочнения при нагреве в процессе изнашивания (теплостойкость порядка 1200 °С), повышает пластическую прочность, что и предопределяет возможность применения высоких скоростей резания, намного превосходящих скорости резания инструментом из твердого сплава. Если предельный уровень скоростей резания для твердосплавного инструмента при

точении сталей с тонкими срезами и малыми критериями затупления составляет 500 – 600 м/мин, то для инструмента, оснащенного режущей керамикой, этот уровень увеличивается до 900 – 1000 м/мин.

Отсутствие связующей фазы оказывает и отрицательное влияние на эксплуатационные свойства керамического инструмента. В частности, снижаются хрупкая прочность, ударная вязкость, трещиностойкость, прочность на изгиб (напряжение на изгиб 350...800 МПа). Это оказывает сильное влияние на характер изнашивания керамического инструмента.

В настоящее время керамический инструмент рекомендуют для чистовой обработки серых, ковких, высокопрочных и отбеленных чугунов, низко- и высоколегированных сталей, в том числе улучшенных, термообработанных (HRC_э до 55 – 60), цветных сплавов, конструкционных полимерных материалов (K01-K05, P01-P05) при условии высоких требований к жесткости технологической системы и державок режущего инструмента. В указанных условиях инструмент, оснащенный пластинами из режущей керамики, заметно превосходит по работоспособности твердосплавный инструмент.

Применения керамического инструмента при обработке с повышенными значениями сечений среза ($t \times S$), при прерывистом резании резко снижает его эффективность вследствие высокой вероятности внезапного отказа из-за хрупкого разрушения режущей части инструмента. Во многом это объясняет сравнительно низкий объем используемого в промышленности страны керамического инструмента (до 0,5% от общего объема режущего инструмента), для развитых стран Запада этот объем составляет от 2 до 5%.

Высокоэффективная эксплуатация инструмента, оснащенного режущей керамикой, возможна только при тщательно обработанной технологии его заточки и доводки, так как внесение опасных поверхностных дефектов в процессе заточки может служить причиной резкого снижения прочности пластин из керамики. Вместе с тем следует отметить, что даже использование самых совершенных методов заточки и доводки керамического инструмента не исключает возможность появления на обработанной поверхности опасных дефектов (термических трещин, протяженных полей со сформированными полями растягивающих напряжений, микроскол и т.д.). В этом случае следует использовать методы дополнительной обработки керамического инструмента с целью ликвидации или «залечивания» поверхностных дефектов.

Одним из таких методов является нанесение на рабочие поверхности керамического инструмента износостойких покрытий. Для повышения надежности инструмента из режущей керамики используют также следующие методы: увеличение толщины пластин, формирование упрочняющей фаски на режущей кромке и изготовление слоистых режущих пластин (керамика – твердый сплав, керамика – твердый сплав – керамика и т.д.).

Анализ тенденций развития керамического режущего инструмента свидетельствует о больших перспективах этого инструмента в ближайшем будущем, причем увеличение общего объема выпуска керамического инструмента взаимосвязано с совершенствованием технологии производства, оптимизацией состава традиционных марок керамики, широким применением армированной керамики и расширением области применения инструмента на основе нитрида кремния.

3.6. Сверхтвердые инструментальные материалы

К сверхтвердым синтетическим поликристаллическим инструментальным материалам (ПСТМ) относят синтетические и природные алмазы и композиционные материалы на основе кубического нитрида бора (КНБ).

В основе технологии изготовления поликристаллов лежат два различных процесса: фазовый переход вещества из одного состояния в другое (синтез) или спекание мелких частиц заранее синтезированного порошка ПСТМ. В нашей стране первым способом

получают поликристаллический нитрид бора (ПКНБ), а также поликристаллический алмаз (ПКА).

Прежде, чем синтезированные спеки ПКНБ и ПКА могут быть использованы в качестве металлорежущих инструментов, они должны быть разрезаны электроэрозионным или лазерным способом на многогранные пластины стандартных размеров или фрагменты произвольной формы и отшлифованы. Фрагменты запаивают либо в вершины корпусов стандартных твердосплавных пластин, либо в напайные инструменты.

ПСТМ принципиально новые, как по технологии изготовления, так и по условиям эксплуатации инструментальные материалы. Ими можно обрабатывать изделия при скоростях резания на порядок выше скоростей, допускаемых при использовании твердосплавных инструментов и даже инструментов из керамики.

ПКА имеет твердость 70...100 ГПа, которая до 5 раз превышает соответствующий показатель для твердых сплавов, обладает хорошей теплопроводностью, большим модулем упругости и низким коэффициентом трения к цветным металлам, но, как и все высокотвердые материалы обладает достаточно низкими прочностными характеристиками.

Теплостойкость ПКА составляет 700...800 °С (при более высоких температурах алмаз теряет режущие свойства). Инструменты, оснащенные режущими вставками из ПКА, применяют в основном при тонком точении цветных металлов и сплавов, не содержащих углерод и железо.

По твердости ПКНБ несколько уступает алмазу, но имеет более высокую теплостойкость, достигающую до 1500 °С, и практически инертен по отношению к углероду и железу. Как и алмаз, ПКНБ имеет повышенную хрупкость и низкую прочность на изгиб. Инструменты, оснащенные режущими вставками из ПКНБ, применяют, главным образом, для обработки металлов, содержащих углерод и железо.

Практика показывает, что во многих случаях точение инструментами из ПСТМ намного эффективнее процесса шлифования, так как такие инструменты обеспечивают бесприжоговую обработку при работе на высоких скоростях резания и низкую шероховатость обработанной поверхности.

В целом можно отметить, что основная область эффективного применения лезвийных инструментов из ПСТМ – автоматизированное производство на базе станков с ЧПУ, многоцелевых станков, автоматических линий и специальных высокоскоростных станков. При этом выбор конкретной скорости резания определяется величиной снимаемого припуска, возможностями оборудования, наличием ударных нагрузок в процессе резания и многими другими факторами.

При относительно низких скоростях резания и, как следствие, при низких температурах у ПСТМ преобладают адгезионно-усталостный и абразивный виды изнашивания, а при высоких скоростях резания может протекать диффузионный износ. При неблагоприятных условиях резания могут наблюдаться выкрашивания мелких частиц режущих кромок, а также сколы на передней и задних поверхностях. Например, для точения с ударами и фрезерования закаленных быстрорежущих сталей и сталей с высоким содержанием хрома применять инструменты из ПСТМ вообще не рекомендуется.

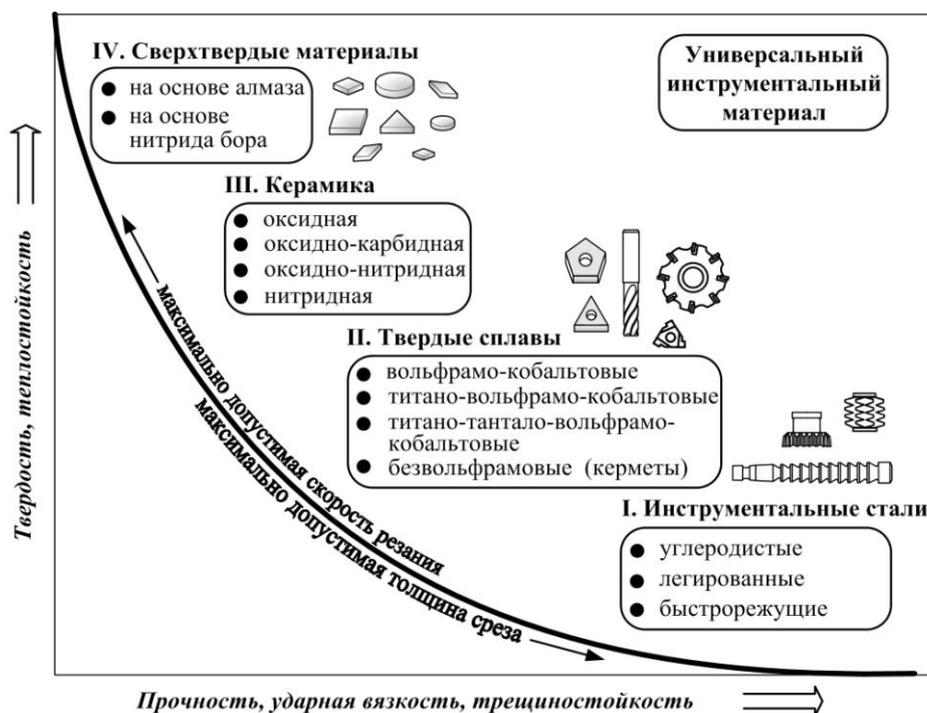


Рис. 3.1. Классификация инструментальных материалов по их свойствам

На рис. 3.1 представлена классификация инструментальных материалов, предназначенных для изготовления лезвийных инструментов, по их прочности и твердости. Как видно, ни в одной группе нет материала с оптимальным сочетанием таких свойств как удельная вязкость, прочность, трещиностойкость с одной стороны и твердость, износостойкость и теплостойкость с другой стороны. Кроме того, видно, что необходимо стремиться к такому «идеальному» инструментальному материалу, в котором удачно сочетаются вышеперечисленные свойства.

3.7. Абразивные материалы

Абразивные материалы применяются для изготовления шлифовального инструмента. К ним предъявляются следующие требования:

- высокая твердость и износостойкость,
- высокая теплостойкость,
- способность при дроблении образовывать острые кромки.

Абразивные материалы делят на две группы: естественные и искусственные.

К естественным относят корунд, наждак, кварц. Корунд (до 95% Al_2O_3) применяется в виде порошков, паст, для притирки и доводочных работ. Наждак (основа Al_2O_3 , в лучших образцах до 60%) и кварц применяются в виде брусков для ручных работ.

К искусственным абразивным материалам относятся: электрокорунд, карбид кремния и карбид бора.

Электрокорунд представляет собой кристаллическую окись алюминия Al_2O_3 , получаемую путем электроплавки бокситов, которые состоят в основном из окиси алюминия и некоторых примесей. Чем больше окиси алюминия, тем выше твердость электрокорунда.

В зависимости от содержания Al_2O_3 и технологии изготовления электрокорунд классифицируют: электрокорунд нормальный (содержит 93 – 95% Al_2O_3): марки – 16А, 15А, 14А, 13А, 12А; электрокорунд белый (содержит 98 – 99% Al_2O_3): марки 25А, 24А, 23А, 22А;

монокорунд – обладает более высокими механическими и режущими свойствами: марки 45А, 44А, 43А; сферокорунд – состоит из 99% Al_2O_3 и примесей – имеет вид полых сфер; формокорунд – состоит из 80–87% Al_2O_3 , до 1,5% Fe_2O_3 и примесей. Имеет цилиндрическую или призматическую форму; электрокорунд легированный: хромистый, легированный хромом – марки 34А, 33А, 32А; титанистый, легированный титаном – марка 37А; хромотитанистый, легированный хромом и титаном – марки 91А, 92А; циркониевый состоит из корунда и окиси циркония – марка 38А. Легирование электрокорунда повышает ударную вязкость, прочность и режущие свойства. Поэтому круги на данных материалах обладают большей производительностью.

Электрокорунд применяется для изготовления кругов, предназначенных для обработки материалов с высоким пределом прочности на разрыв (углеродистые, нержавеющие стали; ковкий чугун); монокорунд – для обработки заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов; сферокорунд – при обработке мягких, вязких материалов; формокорунд – при тяжелых обдирочных работах.

Карбид кремния обладает более высокой твердостью, теплостойкостью и режущими свойствами по сравнению с электрокорундом. По содержанию карбида кремния SiC он подразделяется на: карбид кремния черный (содержит 97% SiC) – марки 55С, 54С, 53С, 52С; карбид кремния зеленый (содержит 98% SiC) – марки 64С, 65С, 64С, 62С.

Круги из карбида кремния применяются для обработки материалов с низким пределом прочности на разрыв (серый чугун, твердые сплавы, минералокерамика, титановые сплавы).

Карбид кремния зеленый, как более дорогой, применяется для заточки твердосплавного инструмента и правки алмазных кругов.

Карбид бора обладает еще более высокой твердостью и износостойкостью, но более хрупок и имеет низкую теплостойкость. Применяется для доводки и притирки твердых сплавов.

Модуль 4. Назначение геометрических параметров режущего инструмента

4.1. Геометрические параметры проходного резца

Резец состоит из режущей части I и крепежной II, служащего для закрепления его в резцедержателе (рис. 4.1).

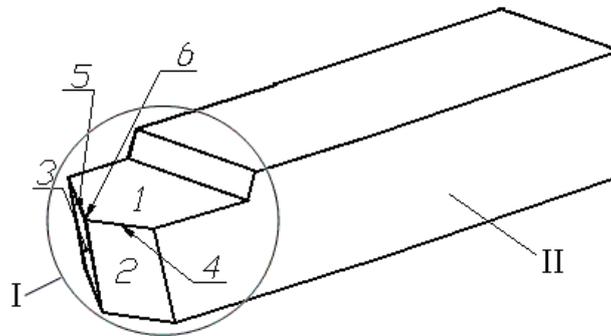


Рис. 4.1. Рабочие поверхности токарного резца

Режущая часть образована заточкой следующих поверхностей:

- 1 – передняя поверхность, поверхность по которой сходит стружка;
- 2 – главная задняя поверхность;
- 3 – вспомогательная задняя поверхность;
- 4 – главная режущая кромка образуется пересечением передней и главной задней поверхностей;
- 5 – вспомогательная режущая кромка образуется пересечением передней и вспомогательной задней поверхностей;
- 6 – вершина резца – образуется пересечением главной и вспомогательной режущих кромок.

Углы режущего инструмента

Углы рассматриваются в трех системах координат:

- инструментальной (ИСК);
- статической (ССК);
- кинематической (КСК).

Инструментальная система – прямоугольная система координат с началом в вершине режущего инструмента и ориентированная относительно поверхностей инструмента принятых за базу. Применяется для изготовления, заточки и контроля инструмента.

Статическая система – прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки и ориентированная относительно направления вектора скорости главного движения (V). Применяется для приближенных расчетов углов инструмента и для учета их изменения при установке инструмента на станок.

Кинематическая система – прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки и ориентированная относительно направления вектора скорости результирующего движения (V_e). Применяется для оценки кинематических углов инструмента.

Для определения углов рассматривают следующие плоскости (рис. 1.2 и 4.2):

1. Основная плоскость P_v – плоскость, проведенная через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно к направлению вектора скорости главного движения (V)

(в ССК) или результирующего движения резания (V_e) (в КСК). В инструментальной системе координат за направление вектора скорости резания принимается перпендикуляр к конструкторской установочной базе резца (прямоугольного сечения). Основную плоскость в инструментальной системе координат будем обозначать $P_{ви}$, в статической – P_{vc} , в кинематической – P_{vk} .

2. Плоскость резания P_n – плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная основной плоскости (соответственно – P_{nu} , P_{nc} , P_{nk}).

3. Главная секущая плоскость P_τ – плоскость, перпендикулярная линии пересечения основной плоскости и плоскости резания (перпендикулярная проекции главной режущей кромки на основную плоскость) (соответственно – $P_{\tau u}$, $P_{\tau c}$, $P_{\tau k}$).

4. Вспомогательная секущая плоскость $P_{\tau 1}$ – плоскость, перпендикулярная проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость (соответственно – $P_{\tau 1 u}$, $P_{\tau 1 c}$, $P_{\tau 1 k}$).

5. Рабочая плоскость P_s – плоскость, в которой расположены векторы скоростей главного движения и движения подачи. В ИСК это плоскость III – III, перпендикулярная плоскостям I – I и II – II.

Углы резца разделяются на главные (измеряются в главной секущей плоскости), вспомогательные углы (измеряются во вспомогательной секущей плоскости) и углы в плане (измеряются в основной плоскости) (рис. 4.2).

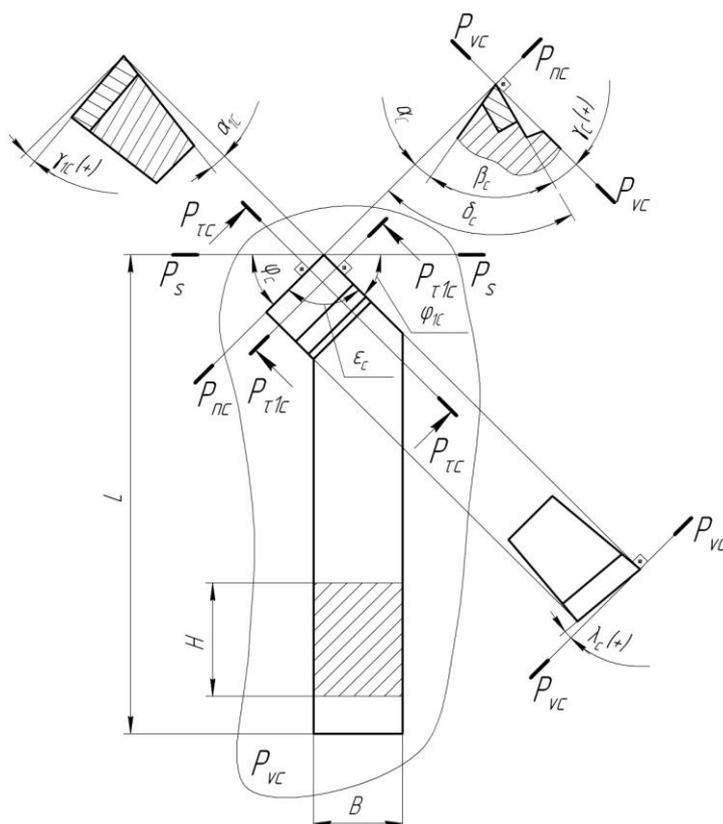


Рис. 4.2. Углы токарного резца в статической системе координат

К главным углам относятся: γ – передний угол; α – главный задний угол; δ – угол резания; β – угол заострения.

К вспомогательным углам относятся: γ_1 – вспомогательный передний угол; α_1 – вспомогательный задний угол.

К углам в плане относятся: φ – главный угол в плане; φ_1 – вспомогательный угол в плане; ε – угол при вершине.

Кроме того, рассматривают угол наклона главной режущей кромки λ , который измеряется в плоскости резания.

В различных системах координат определение углов аналогичны – углам и плоскостям, которые их образуют и в которых они рассматриваются, присваивается обозначение системы координат, например γ_n , γ_c , γ_k и т.п. Поэтому рассмотрим общие определения углов:

1) передний угол γ – угол между основной плоскостью и передней поверхностью инструмента (может быть положительным, отрицательным или равным нулю);

2) главный задний угол α – угол между плоскостью резания и главной задней поверхностью;

3) угол резания δ – угол между передней поверхностью и плоскостью резания;

4) угол заострения β – угол между передней и главной задней поверхностью;

5) главный угол в плане φ – угол между плоскостью резания и рабочей плоскостью;

6) вспомогательный угол в плане φ_1 – угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и рабочей плоскостью;

7) угол при вершине ε – угол между проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость;

8) угол наклона главной режущей кромки λ – угол между главной режущей кромкой и основной плоскостью (может быть положительным, отрицательным или равным нулю);

9) вспомогательный задний угол α_1 и передний угол γ_1 – определения аналогичны определениям углов α и γ .

4.2. Изменение геометрических параметров режущего инструмента

4.2.1. Изменение углов резца в зависимости от положения его вершины относительно оси центров

Как уже было сказано выше, изменение углов резца при установке его на станок рассматривают в статической системе координат.

Рассмотрим случай, когда вершина резца расположена ниже оси центров на величину h (рис. 4.3), а углы λ и φ равны нулю. При расположении вершины резца по центру заготовки передний и главный задний углы резца соответствуют инструментальным переднему γ_n и заднему α_n углам. Если вершину резца опустить ниже оси заготовки на величину h , то система координат из инструментальной переходит в статическую, повернувшись на угол μ , и углы будут соответственно равны γ_c и α_c .

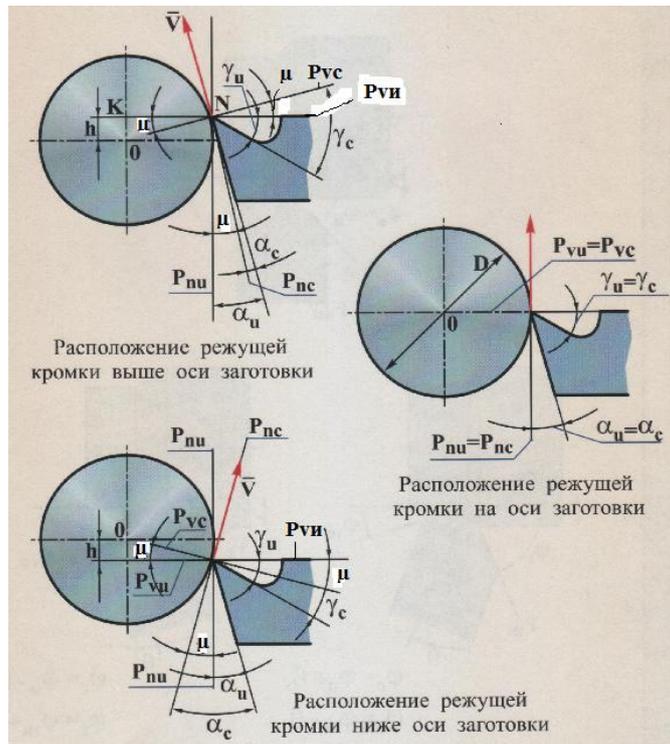


Рис. 4.3. Изменение углов реза при установке его на станок

Из рисунка видно, что угол γ уменьшился, а угол α увеличился на величину угла μ . Соответственно углы γ_c и α_c будут равны:

$$\gamma_c = \gamma_u - \mu = \gamma_u - \arcsin \frac{h}{D/2};$$

$$\alpha_c = \alpha_u + \mu = \alpha_u + \arcsin \frac{h}{D/2};$$

Если угол φ будет отличен от нуля ($\varphi \neq 0$), угол μ можно найти как

$$\sin \mu_\varphi = \sin \mu \cos \varphi.$$

Тогда,

$$\gamma_c = \gamma_u - \arcsin \left(\frac{h}{D/2} \cos \varphi \right); \quad \alpha_c = \alpha_u + \arcsin \left(\frac{h}{D/2} \cos \varphi \right).$$

Если вершина реза будет расположена выше оси центров, знаки в формулах для определения углов γ_c и α_c меняются на противоположные.

4.2.2. Кинематическое изменение углов реза

Рассмотрим кинематическое изменение углов проходного упорного реза при токарной обработке с продольной подачей ($\varphi = 90^\circ$, $\lambda = 0^\circ$) (рис. 4.4).

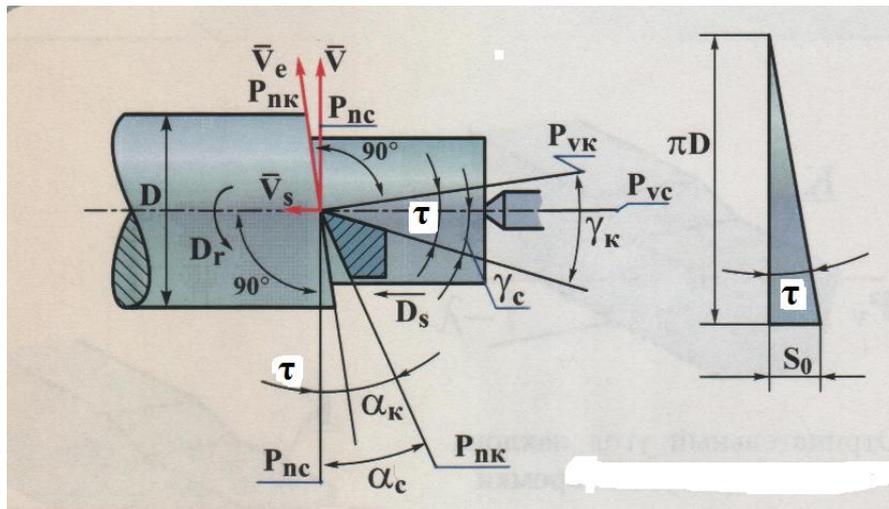


Рис. 4.4. Кинематическое изменение углов резца при точении с продольной подачей

При отсутствии движения подачи D_s углы резца рассматриваются в статической системе координат и соответственно равны γ_c и α_c . В результате суммирования двух движений главного D_r и подачи D_s статическая система координат поворачивается на угол τ и переходит в кинематическую систему координат, которая уже ориентирована относительно направления вектора скорости результирующего движения (V_e), а углы будут равны γ_k и α_k .

Как видно из рисунка, передний угол γ увеличился, а главный задний угол α уменьшился на величину угла τ :

$$\gamma_k = \gamma_c + \tau; \quad \alpha_k = \alpha_c - \tau;$$

Величину угла τ можно найти как

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{V_s}{V_r} = \frac{S n}{\pi D n} = \frac{S}{\pi D};$$

С учетом этого

$$\gamma_k = \gamma_c + \operatorname{arctg} \frac{S}{\pi D}; \quad \alpha_k = \alpha_c - \operatorname{arctg} \frac{S}{\pi D}.$$

Если угол φ будет отличен от 90° ($\varphi \neq 90^\circ$), то величина угла τ будет равна

$$\operatorname{tg} \tau_\varphi = \operatorname{tg} \tau \sin \varphi;$$

а выражение для определения углов γ_k и α_k будут равны:

$$\gamma_k = \gamma_c + \operatorname{arctg} \left(\frac{S}{\pi D} \sin \varphi \right); \quad \alpha_k = \alpha_c - \operatorname{arctg} \left(\frac{S}{\pi D} \sin \varphi \right);$$

Для обычных условий обработки угол τ имеет небольшое значение и им можно пренебречь, но в случае нарезания резьбы или при обработке с большими подачами эти изменения нужно учитывать.

Рассмотрим кинематическое изменение углов при токарной обработке с поперечной подачей.

По аналогии с предыдущим случаем, имеем (рис. 4.5):

$$\alpha_k = \alpha_c - \tau = \alpha_c - \arctg \frac{S}{\pi D}; \quad \gamma_k = \gamma_c + \tau = \gamma_c + \arctg \frac{S}{\pi D}.$$

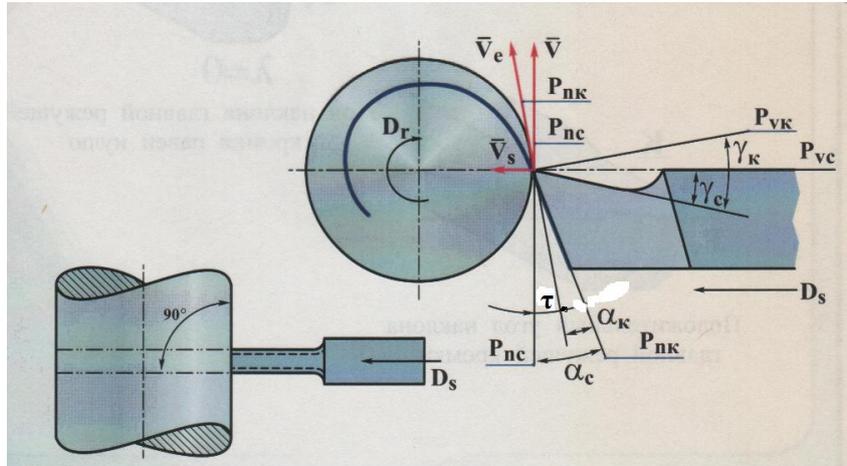


Рис. 4.5. Кинематическое изменение углов реза при точении с поперечной подачей (отрезка заготовки)

Из полученных выражений следует, что главный задний угол надо выбирать таким, чтобы на любом диаметре угол α_k был больше нуля.

4.3. Назначение и выбор геометрических параметров режущего инструмента

Для рациональной эксплуатации режущего инструмента он должен быть наделен оптимальной геометрией.

Под оптимальной геометрией понимается такое сочетание формы поверхностей режущей части и значений углов, которое обеспечивает:

- достаточную прочность режущего клина инструмента;
- заданное качество обработанной поверхности;
- минимальные усилия резания;
- минимальный износ инструмента.

Назначение и выбор переднего угла. Передний угол γ может быть положительным, отрицательным и равным нулю (рис. 4.6).

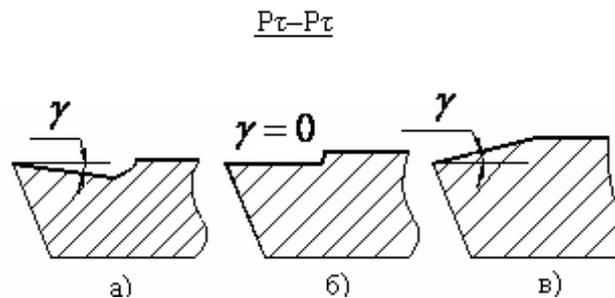


Рис. 4.6. Передний угол реза: положительный (а), равный нулю (б), отрицательный (в)

Передний угол предназначен для облегчения процесса резания. При увеличении положительного переднего угла снижается деформация обрабатываемого материала и силы резания, но с другой стороны снижается прочность режущего клина, т.к. уменьшается угол заострения β (рис. 4.7).

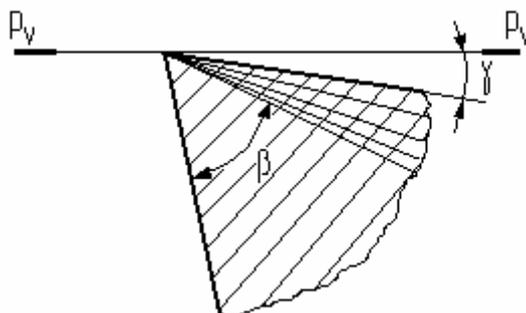


Рис. 4.7. Схема к объяснению назначения переднего угла

Передний угол оказывает влияние на величину и направление силы резания, прочность режущего клина и период стойкости инструмента. Передний угол для инструмента из быстрорежущей стали всегда положительный или равен нулю.

Для инструмента из твердого сплава он может быть как положительным, так и отрицательным. Отрицательные передние углы для твердосплавного инструмента мера вынужденная и связана с низкой прочностью на изгиб твердого сплава. Т.о. передний угол выбирается из предпосылок: с одной стороны он должен как можно больше облегчать процесс резания, с другой – обеспечивать достаточную прочность режущего клина инструмента.

Назначение и выбор заднего угла. Задний угол α предназначен для снижения трения на задней поверхности инструмента. Он оказывает влияние на прочность режущего клина, период стойкости инструмента, качество обработанной поверхности. С увеличением заднего угла уменьшаются силы резания, высота микронеровностей, повышается период стойкости инструмента, но снижается прочность режущего клина из-за уменьшения угла заострения β .

Задний угол выбирается из тех же предпосылок, что и передний угол. С точки зрения процесса резания нужно создавать как можно большие задние углы, но с другой стороны это снижает прочность режущего клина инструмента (рис. 4.8).

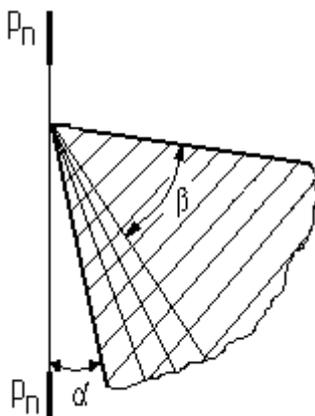


Рис. 4.8. Схема к объяснению назначения заднего угла

При чистовой (окончательной) обработке необходимо выбирать большие задние углы, чем при черновой (предварительной). При черновой обработке и снятии большого слоя материала важна прочность режущего клина и, следовательно, задние углы должны быть меньше.

Выбор угла наклона главной режущей кромки. Угол наклона главной режущей кромки (λ) оказывает влияние на шероховатость обработанной поверхности, т.к. определяет направление схода стружки, и прочность режущего клина инструмента.

Угол λ может быть положительным, отрицательным, равным нулю (рис. 4.9). Угол λ является отрицательным, когда вершина резца является наивысшей точкой режущей кромки, положительным – наинизшей точкой кромки.

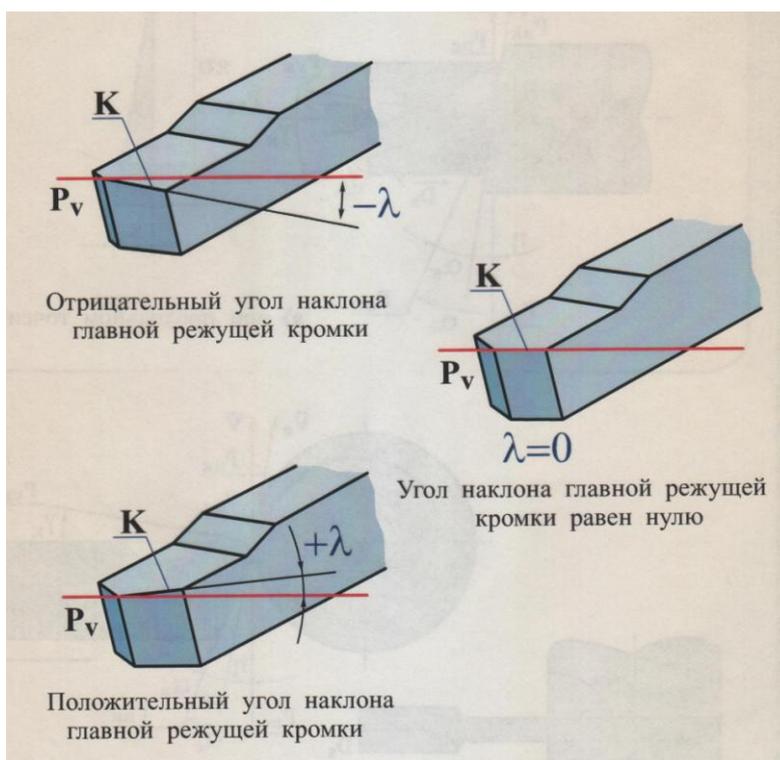


Рис. 4.9. Угол наклона главной режущей кромки

Если угол $\lambda = 0$ стружка будет сходиться в сторону уже обработанной поверхности, так как скорость резания (а, следовательно, и скорость стружки) в т. В > скорости резания в т. А (рис. 4.10, а). Такое направление схода стружки будет ухудшать шероховатость обработанной поверхности.

Если угол λ будет положительным, стружка тем более будет сходиться в сторону уже обработанной поверхности, так как в эту сторону направлен вектор скорости V_p (рис. 4.10, б).

В случае отрицательного угла λ , стружка будет сходиться в направлении вектора скорости V_p в сторону обрабатываемой поверхности (рис. 4.10, в). Следовательно, при чистовой обработке λ должен быть отрицательным, при черновой – положительным или равным нулю.

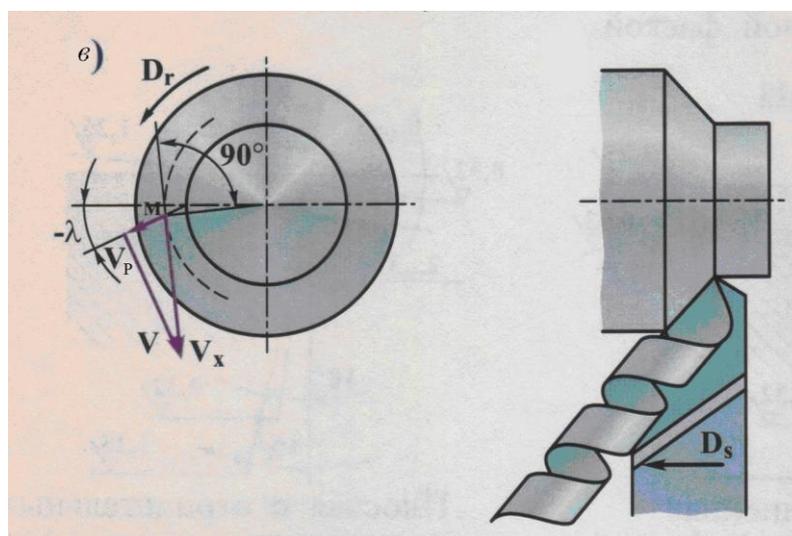
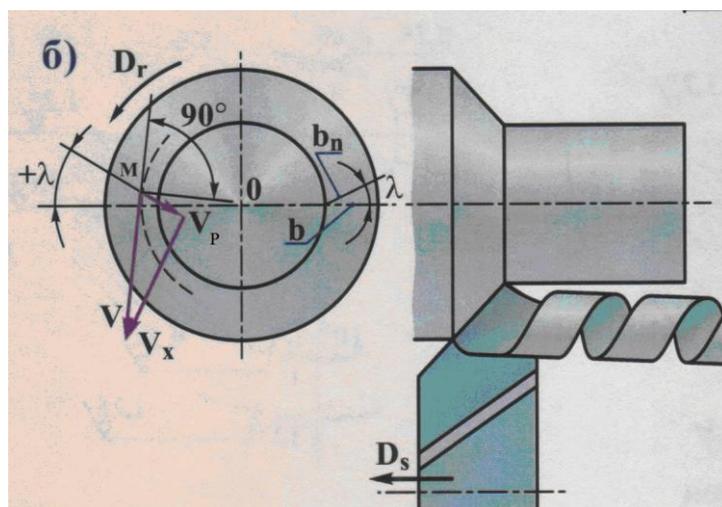
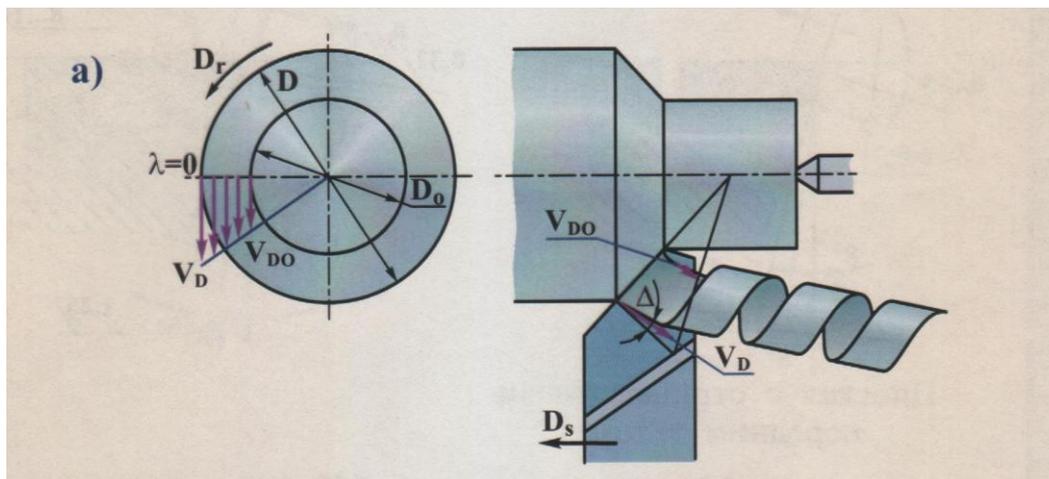


Рис. 4.10. Влияние угла наклона главной режущей кромки на направление схода стружки

С точки зрения прочности режущего клина инструмента необходимо выбирать углы λ положительные или равные нулю. Это связано с тем, что при отрицательном угле λ наибольшая нагрузка приходится на вершину резца, которая является наименее прочным местом режущей части. При положительном угле λ или равном нулю нагрузка приходится не

на вершину резца, а на удаленное от нее место режущей кромки, которое более прочно, чем вершина.

Выбор главного и вспомогательного углов в плане. Эти углы оказывают влияние на шероховатость обработанной поверхности и на износ инструмента. Уменьшение углов φ и φ_1 приводит к снижению шероховатости обработанной поверхности и повышению периода стойкости инструмента, но в тоже время – к увеличению силы отжимающей резец от заготовки (сила P_y), что может привести к возникновению вибраций. Поэтому главный угол в плане должен выбираться исходя из жесткости заготовки.

При чистовой обработке жестких заготовок угол φ необходимо брать меньше, чтобы обеспечить более высокую работоспособность инструмента и меньшую высоту микронеровностей обработанной поверхности, при обработке нежестких заготовок необходимо учитывать вероятность возникновения вибраций (для уменьшения составляющей силы резания P_y следует увеличивать главный угол в плане).

Вспомогательный угол в плане для резцов обычно берется в пределах $10 - 30^\circ$.

Выбор радиуса при вершине резца. Влияние радиуса при вершине на процесс резания аналогично влиянию главного угла в плане φ . Увеличение радиуса влечет за собой увеличение силы резания, отжимающей резец от заготовки, что может привести к возникновению вибраций; увеличение радиуса – уменьшает высоту микронеровностей обработанной поверхности.

Форма передней поверхности. Передняя поверхность оформляется в двух вариантах – плоской и криволинейной (рис. 4.11).

1) Плоская форма передней поверхности применяется для обработки твердых и хрупких материалов (чугун, бронза и др.).

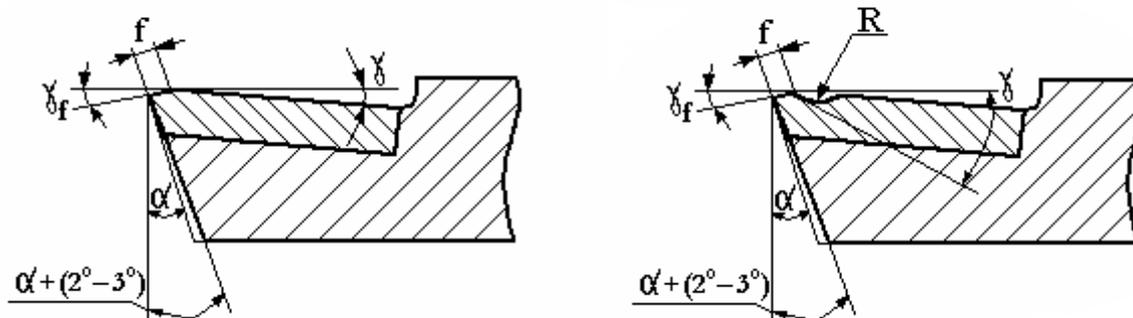


Рис. 4.11. Форма передней поверхности резцов

2) Криволинейная – для обработки вязких и мягких материалов (сталь и др.). Канавка радиусом R предназначена для завивания стружки.

Для упрочнения режущего клина на передней поверхности инструмента делается фаска f . Для твердосплавного инструмента фаска располагается под отрицательным углом γ_f ($\gamma_f = -(3 - 5)^\circ$), для быстрорежущего – под положительным или равным нулю.

Модуль 5. Стружкообразование при резании материалов

Процесс резания представляет собой сложный физический процесс, в котором имеют место как упругие, так и пластические деформации, который сопровождается интенсивным трением, тепловыделением и др. явлениями.

Процесс образования стружки сопровождается двумя видами деформаций: сжатие определенного объема металла, непосредственно примыкающего к передней поверхности режущего инструмента, и его сдвиг. Для того чтобы этот сдвиг произошел необходимо, чтобы напряжения на плоскости сдвига превышали предел текучести материала.

5.1. Основные гипотезы процесса стружкообразования

Первые научные исследования процесса резания были проведены в 19 в. русским ученым И.А. Тимэ. Согласно гипотезе Тимэ процесс резания представлялся как процесс последовательного скалывания отдельных элементов стружки по единственной плоскости скалывания, наклоненной к поверхности резания под углом β (угол скалывания, сдвига) (рис. 5.1). Считалось, что вся деформация концентрируется в очень узкой плоскости, в которой происходит мгновенное разрушение материала в виде скалывания.

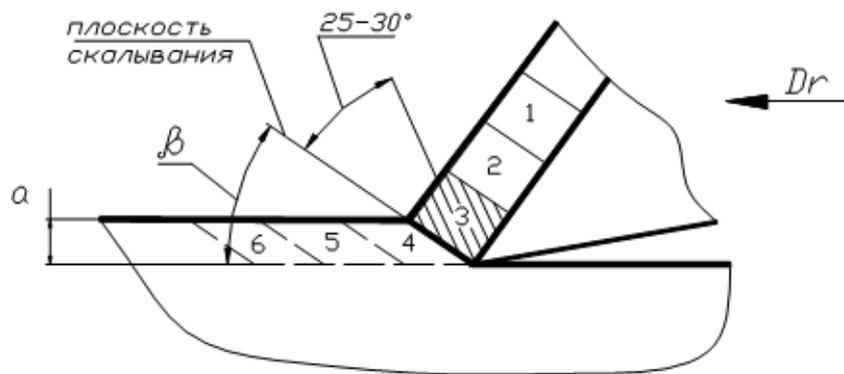


Рис. 5.1. Схема стружкообразования

В дальнейшем Усачевым Я.Г. были обнаружены дополнительные плоскости сдвига в самом элементе стружки, которые располагались под углом $25 - 30^\circ$ к единственной плоскости скалывания. Согласно Усачеву по этим плоскостям происходит сдвиг частиц металла при сжатии элемента стружки перед тем, как он отделится от основного металла по единственной плоскости сдвига.

Данные гипотезы не отражают физической картины процесса резания и существование единственной плоскости сдвига невозможно по двум основным причинам:

1) при прохождении данной плоскости частицы металла должны получать ускорение, равное бесконечности, т.к. скорость их движения мгновенно изменяется от скорости резания до скорости стружки;

2) в каждой точке этой плоскости скалывания градиент напряжения также должен быть равен бесконечности, т.к. металл на этой плоскости находится как бы в двух состояниях: с одной стороны – недеформированный, с другой – передеформированный, предел текучести которого выше недеформированного в 3 – 5 раз.

Данные противоречия заставляют предположить, что перед передней поверхностью режущего инструмента должна находиться какая-то зона, в которой постепенно происходит превращение обрабатываемого материала в стружку.

инженерных расчетов реальную схему стружкообразования заменяют упрощенной с единственной условной плоскостью сдвига.

5.2. Типы стружек, образующиеся при резании пластичных и хрупких материалов и завивание стружки

Первую классификацию типов стружек дал Тимэ И.А., согласно которой существует четыре типа стружки: элементная; суставчатая; сливная; надлома.

Первые три типа называются стружками скалывания (сдвига), т.к. их образование связано с напряжениями сдвига; последняя – стружкой отрыва, т.к. ее образование связано с растягивающими напряжениями.

Элементная стружка (рис. 5.3, а) состоит из отдельных элементов, не связанных, или слабо связанных между собой, одинаковой формы и размеров. Для суставчатой стружки (рис. 5.3, б) разделение на отдельные элементы не происходит, намечается граница раздела между элементами, но она не пронизывает стружку насквозь. Сливная стружка (рис. 5.3, в) характеризуется своей непрерывностью, прирезцовая сторона стружки отполирована (за счет трения о переднюю поверхность) и имеет мелкие зазубрины в верхней части. Стружка надлома (рис. 5.3, г) состоит из отдельных элементов различной формы и размеров.

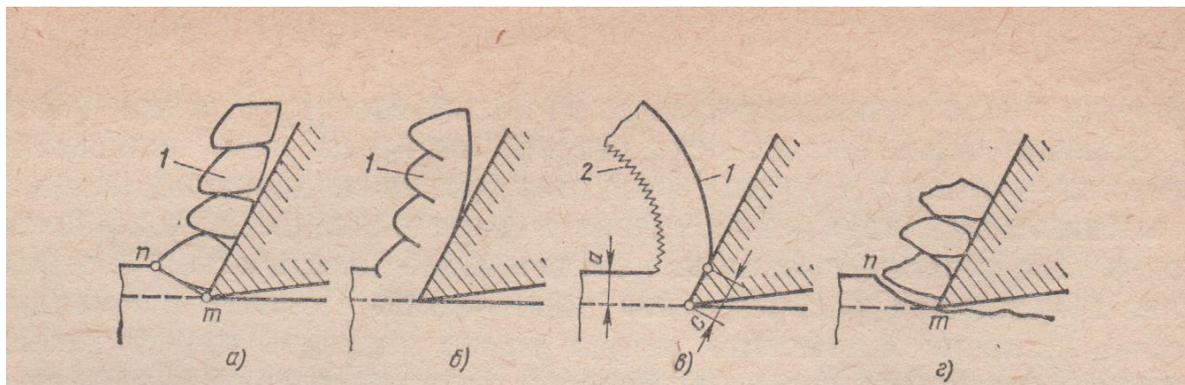


Рис. 5.3. Типы стружек при резании материалов:
а – элементная, б – суставчатая, в – сливная, г – надлома

На типы стружки оказывает влияние: вид обрабатываемого материала и его свойства, геометрия режущего инструмента и элементы режима резания.

При обработке пластичных материалов образуются первые три типа стружки, причем с увеличением твердости обрабатываемого материала стружка переходит от сливной к элементной. При обработке хрупких обрабатываемых материалов, образуется стружка элементная и надлома. Причем с увеличением твердости обрабатываемого материала стружка переходит из элементной в стружку надлома.

Наибольшее влияние из геометрии режущего инструмента оказывают два угла: передний угол γ и угол наклона главной режущей кромки λ . При обработке пластичных обрабатываемых материалов с увеличением γ и λ стружка переходит от элементной к сливной. При обработке хрупких обрабатываемых материалов с увеличением γ стружка переходит из элементной в надлома, с увеличением λ – наоборот.

Из элементов режима резания на тип стружки влияют подача и скорость. При обработке пластичных обрабатываемых материалов с увеличением подачи стружка переходит от сливной к элементной, при обработке хрупких обрабатываемых материалов с увеличением подачи – из элементной в стружку надлома. Наибольшее влияние на тип стружки оказывает скорость резания. При обработке большинства конструкционных

материалов увеличение скорости резания приводит к переходу от элементной стружки к сливной. В условиях производства, при существующих там геометрии режущего инструмента и режимов резания, основными типами стружки являются: при обработке пластичных обрабатываемых материалов – сливная и суставчатая, при обработке хрупких обрабатываемых материалов – элементная.

Завивание стружки качественно характеризует степень пластической деформации при резании металлов. Завивание стружки происходит по следующим причинам: за счет изменение направления движения стружки при контакте с передней поверхностью режущего инструмента; за счет неравномерной деформации стружки по ее толщине (больше деформируется прирезцовая сторона стружки); за счет неравномерного охлаждения стружки по ее толщине (больше охлаждается и, следовательно, сжимаются верхние слои стружки). О степени деформации можно судить по радиусу витка стружки, чем он меньше, тем деформация больше, и наоборот.

5.3. Наростообразование при резании

При определенных условиях на передней поверхности режущего инструмента образуется нарост: частицы металла привариваются к передней поверхности, наслаиваются друг на друга, образуя относительно неподвижное клинообразное тело.

Физическая сущность процесса наростообразования чрезвычайно сложна и до настоящего времени полностью не изучена. Как показывают исследования для образования нароста необходимы два основных условия:

1. Площадка контакта на передней поверхности должна быть полностью или хотя бы частично очищена от окисных и адсорбированных пленок, т.е. должна быть ювенильной (физически и химически чистой).

2. Температура и нормальные нагрузки на передней поверхности режущего инструмента должны быть такими, при которых в прирезцовых слоях стружки создается сложное напряженное состояние, соответствующее невыполнению условия пластичности.

При условиях, указанных выше, происходит адгезионное взаимодействие ювенильных поверхностей прирезцового слоя стружки и материала передней поверхности режущего инструмента. В результате сил адгезии происходит прочное соединение этого прирезцового слоя стружки к передней поверхности – образуется первый слой нароста. При перемещении стружки по этому слою происходит аналогичное адгезионное взаимодействие и образуется второй слой нароста и т.д. Это приводит к увеличению высоты нароста. Из-за высокой шероховатости отдельных слоев нароста облегчается доступ к ним кислорода воздуха. В результате этого слои нароста окисляются, что приводит к уменьшению трения, и каждый последующий слой нароста по длине становится короче предыдущего и нарост приобретает форму клина (рис. 5.4).

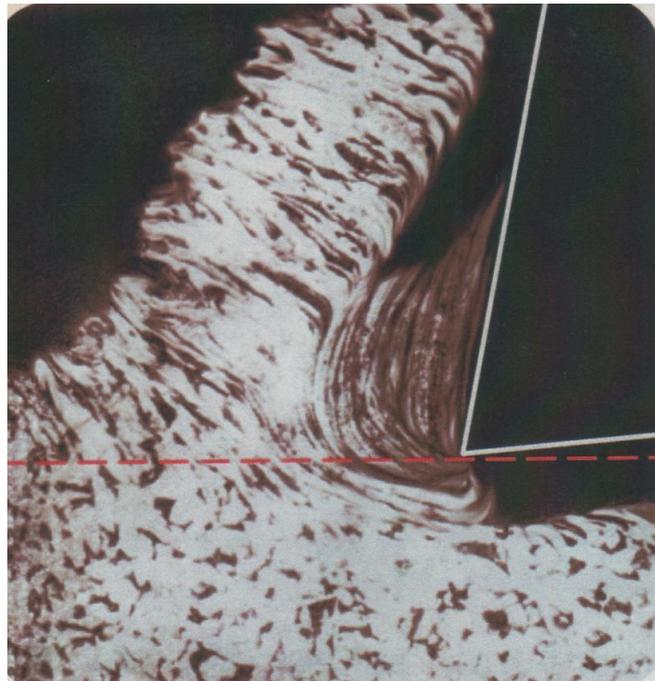


Рис. 5.4. Микрофотография корня стружки с наростом

Нарост имеет следующие зоны (рис. 5.5, а): 1 – полностью неподвижная зона; 2 – зона, в которой скорость частиц металла изменяется от 0 до скорости стружки.

Нарост характеризуется следующими параметрами: H – высота нароста; l_n – длина подошвы нароста; γ_n ($\gamma_{\text{ф}}$) – угол нароста (фактический передний угол).

Нарост явление непостоянное, он постепенно увеличивается до определенной высоты для конкретных режимов резания и затем разрушается. Часть нароста уносится стружкой, а другая – уже обработанной поверхностью (рис. 5.5, б).

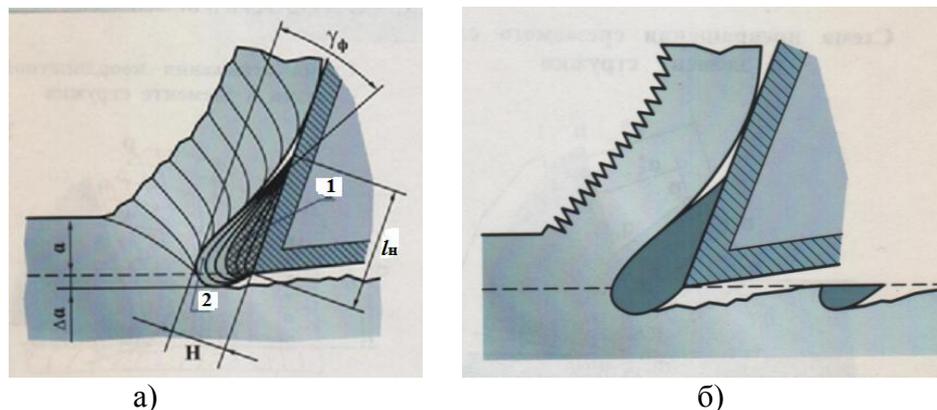


Рис. 5.5. Схема строения (а) и разрушения (б) нароста

Разрушение нароста происходит по следующим причинам:

- с увеличением высоты уменьшается его прочность, и он хуже сопротивляется нагрузке со стороны стружки;
- при большой высоте из-за образования зазоров между наростом, стружкой и обрабатываемым материалом он перестает находиться в условиях всестороннего сжатия.

Положительные свойства нароста: твердость нароста в 2 – 2,5 раза выше твердости основного материала, следовательно, нарост упрочняет режущий клин и осуществляет

резание; нарост увеличивает передний угол инструмента (γ_{ϕ}) и, тем самым, облегчает процесс резания; располагаясь на передней поверхности и нависая над задней, нарост защищает их от износа.

Отрицательные свойства нароста: т.к. нарост периодически образуется и разрушается (часть нароста уносится сходящей стружкой, а другая попадает на уже обработанную поверхность) ухудшается шероховатость обработанной поверхности, уменьшается точность обработки и образование и срыв нароста может привести к образованию вибраций.

Таким образом, при черновой обработке нарост явление положительное, при чистовой – он недопустим.

На процесс наростообразования оказывают влияние физико–механические свойства обрабатываемого материала, передний угол инструмента и скорость резания. Из всех обрабатываемых материалов можно выделить материалы склонные к наростообразованию и менее склонные. Чем пластичнее металл, тем он более склонен к наростообразованию. Если материал склонен к наростообразованию, то с увеличением его пластичности и снижением твердости высота нароста возрастает.

Наиболее сложно на высоту нароста влияет скорость резания (рис. 5.6). На малых скоростях резания нароста нет. При повышении скорости от V_1 до V_2 высота нароста растет, достигая максимального значения при скорости V_2 , а затем начинает уменьшаться.

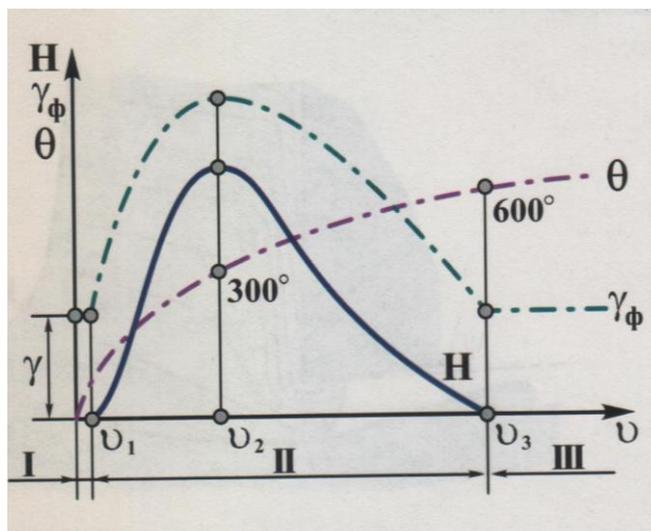


Рис. 5.6. Влияние скорости резания на высоту нароста

При любой скорости большей V_3 нарост отсутствует. При резании заготовок из среднеуглеродистых сталей максимальную высоту нарост имеет при $V = 15 - 30$ м/мин, а скорость V_3 имеет величину свыше 80 м/мин. Экспериментально установлено, что нарост имеет максимальную высоту при таком значении скорости резания, при котором температура равна примерно 300°C , и исчезает при скорости резания, при которой температура равна примерно 600°C .

С увеличением переднего угла γ (рис. 5.7, а) и уменьшением толщины срезаемого слоя a (рис. 5.7, б) высота нароста уменьшается, а скорости, при которых высота нароста достигает максимума, и становится равной нулю, смещаются в сторону более высоких значений.

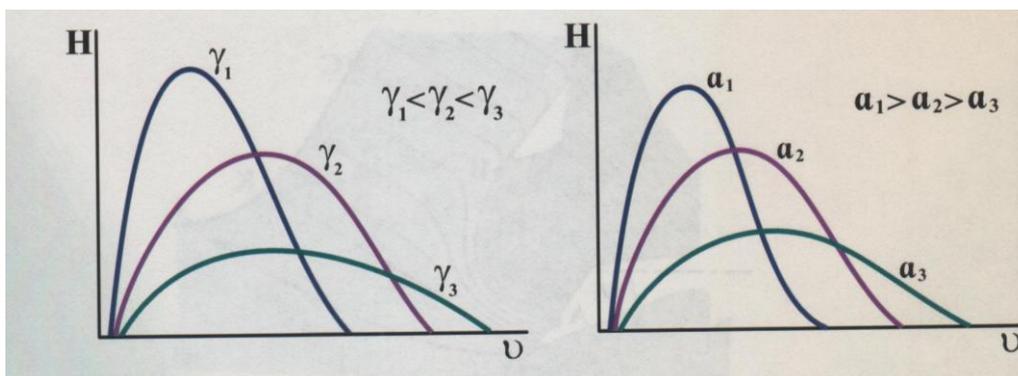


Рис. 5.7. Влияние скорости резания на высоту нароста при различных передних углах (а) и толщинах срезаемого слоя (б)

5.4. Укорочение стружки

Для качественной оценки степени пластической деформации вводится понятие укорочения стружки.

В результате пластической деформации происходит изменение размеров стружки по сравнению с размерами срезаемого слоя: стружка укорачивается, утолщается и уширяется (рис. 5.8). Степень изменения размеров стружки по сравнению со срезанным слоем характеризуется тремя коэффициентами изменения формы: коэффициентом укорочения стружки ($K_L = L/l_c > 1$); коэффициентом утолщения стружки ($K_a = a_c/a > 1$); коэффициентом уширения стружки ($K_b = b_c/b > 1$). Здесь L – длина срезаемого слоя, l_c – длина стружки, a и b – соответственно толщина и ширина срезаемого слоя, a_c и b_c – соответственно толщина и ширина стружки.

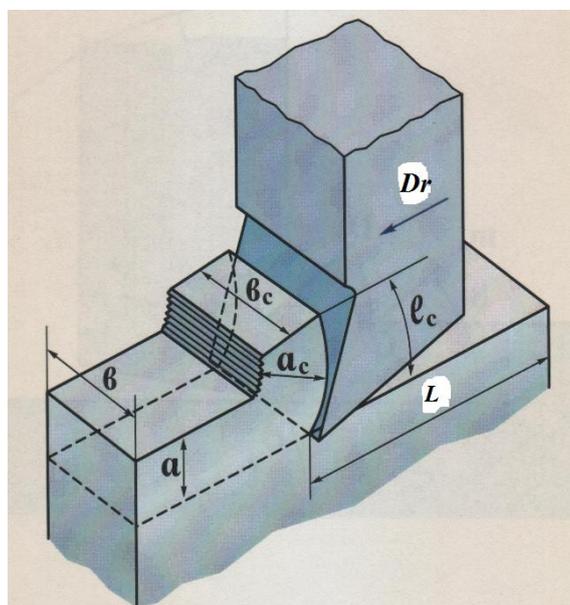


Рис. 5.8. Размеры срезаемого слоя и стружки

Так как объем срезаемого слоя равен объему стружки $L \times a \times b = l_c \times a_c \times b_c$, следовательно, $K_L = K_a \times K_b$. Учитывая, что уширение стружки незначительно и составляет

5 – 15% от ширины срезаемого слоя, в то время как укорочение и утолщение оценивается в 250 – 600%, то при черновой обработке можно считать $K_L = K_a$, а при чистовой обработке коэффициент K_b необходимо учитывать и коэффициент K_L будет равен $K_L = K_a \times K_b$.

Коэффициент укорочения стружки можно определить двумя методами: измерением длины стружки и взвешиванием стружки.

При использовании первого метода длину стружки ограничивают разделением длины срезаемого слоя на отдельные части. Например, при токарной обработке на заготовке делают один или несколько пазов и фиксируют расстояние между ними. При прохождении резца через паз процесс резания прерывается. Стружку собирают и измеряют ее длину по контактной стороне. Коэффициент укорочения стружки подсчитывают по приведенной выше формуле. Если непрерывную стружку получить трудно применяют весовой метод. Вес кусочка стружки равен: $Q = V \times \rho$, где Q – вес кусочка стружки, V – его объем, ρ – плотность.

Выразив объем кусочка стружки через параметры срезаемого слоя получим:

$$Q = L \times a \times b \times \rho = K_L \times l_c \times S \times t \times \rho; K_L = Q / (l_c \times S \times t \times \rho).$$

5.4.1. Влияние различных факторов на коэффициент укорочения стружки

Рассмотрим влияние различных факторов на коэффициент укорочения стружки (рис. 5.9). Повышение величины переднего угла вызывает снижение коэффициента укорочения стружки.

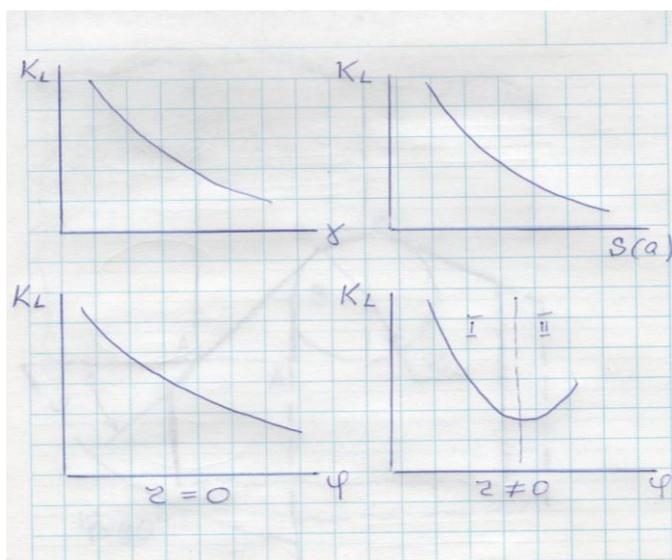


Рис. 5.9. Влияние подачи, глубины резания и главного угла в плане на коэффициент укорочения стружки

Для объяснения влияния переднего угла на коэффициент укорочения стружки воспользуемся рис. 5.10. При перемещении режущего инструмента на величину Δl из положения 1 в положение 2, параллелограмм mqr_1p , принадлежащий обрабатываемому материалу, сдвигаясь вдоль основания mn на величину Δs , превращается в параллелограмм mqr_2p , который принадлежит уже готовой стружке.

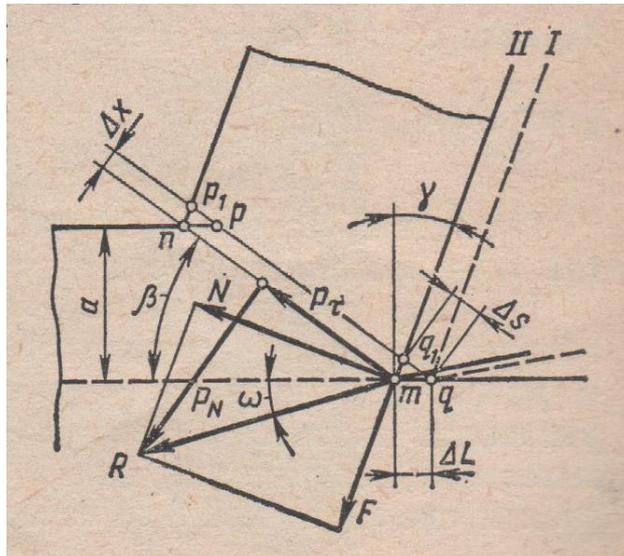


Рис. 5.10. Схема образования сливной стружки с единственной плоскостью сдвига

При дальнейшем перемещении режущего инструмента процесс повторяется. Таким образом, превращение срезаемого слоя в сливную стружку происходит в результате последовательных и непрерывных сдвигов весьма тонких слоев металла по условной плоскости сдвига без нарушения связи между сдвинутыми слоями, т.е. без нарушения сплошности материала стружки. Из этого следует, что элементарная длина срезаемого слоя материала при перемещении инструмента из положения 1 в положение 2 будет равна Δl , а элементарная длина образовавшейся стружки Δl_s будет равна отрезку $m q_1$. Используя теорему синусов, из треугольника $\Delta m q_1$ запишем:

$$K_L = \frac{\Delta l}{\Delta l_s} = \frac{\sin \psi}{\sin \beta} = \frac{\sin[180 - (\beta + \delta)]}{\sin \beta} = \frac{\sin(\beta + \delta)}{\sin \beta}$$

Из полученной зависимости следует, что повышение величины переднего угла вызывает снижение коэффициента укорочения стружки.

С увеличением подачи (или толщины срезаемого слоя) (рис. 5.9) уменьшается коэффициент трения по передней поверхности μ_γ и, следовательно, уменьшаются размеры и деформация в зоне ОЕФ, а значит, уменьшается и общая деформация, которая характеризуется коэффициентом K_L . Глубина резания (или ширина срезаемого слоя) не оказывает практически влияния на коэффициент K_L .

В случае, когда радиус при вершине резца равен нулю ($r = 0$) увеличение главного угла в плане φ вызывает снижение коэффициента укорочения стружки, что объясняется ростом толщины срезаемого слоя ($a = s \cdot \sin \varphi$) и, следовательно, согласно рис. 5.9 степень деформации должна уменьшаться. В случае, когда $r \neq 0$ влияние угла φ на коэффициент укорочения стружки более сложное. С увеличением угла φ (участок 1) согласно зависимости ($a = s \cdot \sin \varphi$) растет толщина срезаемого слоя и коэффициент K_L уменьшается. При дальнейшем увеличении угла φ возрастает доля криволинейного участка ВС в общей длине режущей кромки АВ (рис. 5.11), что вызывает повышение степени деформации и коэффициент K_L повышается. Последнее объясняется тем, что при равной длине участков степень пластической деформации на криволинейном участке режущей кромки больше, чем на прямолинейном.

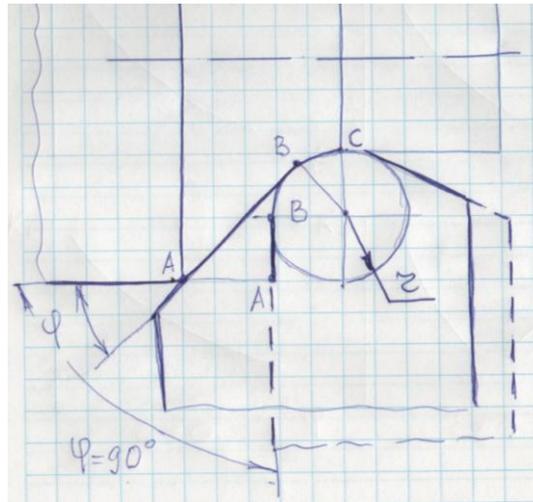


Рис. 5.11. Схема к объяснению влияния главного угла в плане на коэффициент укорочения стружки для случая $r \neq 0$

Влияние скорости резания на коэффициент укорочения стружки наиболее сложное (рис. 5.12).

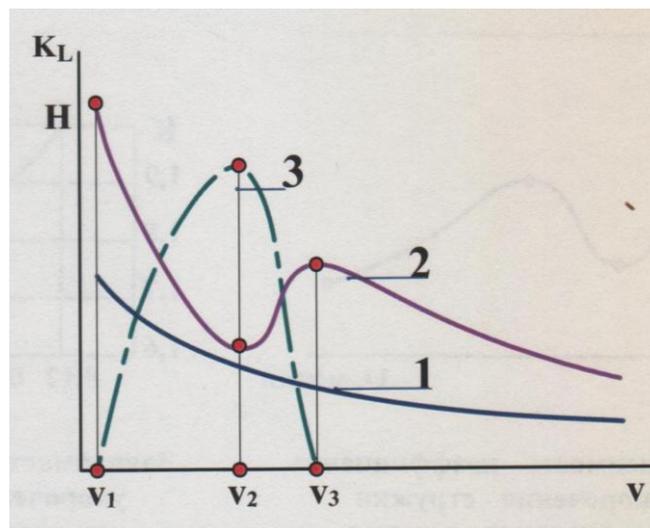


Рис. 5.12. Влияние скорости резания на коэффициент укорочения стружки:
1 – коэффициент трения μ_γ , 2 – коэффициент K_L , 3 – высота нароста H

При увеличении скорости резания от значения V_1 до V_2 растет высота нароста H и соответственно фактический передний угол γ_ϕ . Это вызывает снижение степени пластической деформации, и коэффициент укорочения стружки уменьшается. При повышении скорости резания со значения V_2 до V_3 высота нароста уменьшается и соответственно снижается фактический передний угол, что вызывает рост степени пластической деформации, и коэффициент K_L увеличивается. При скорости резания, большей V_3 , уменьшение коэффициента укорочения стружки связано со снижением коэффициента трения μ_γ и, следовательно, уменьшением пластических деформаций в зоне стружкообразования ОЕФ.

Влияние инструментального материала проявляется через его фрикционные (рис. 5.13, а) и теплофизические свойства (рис. 5.13, б).

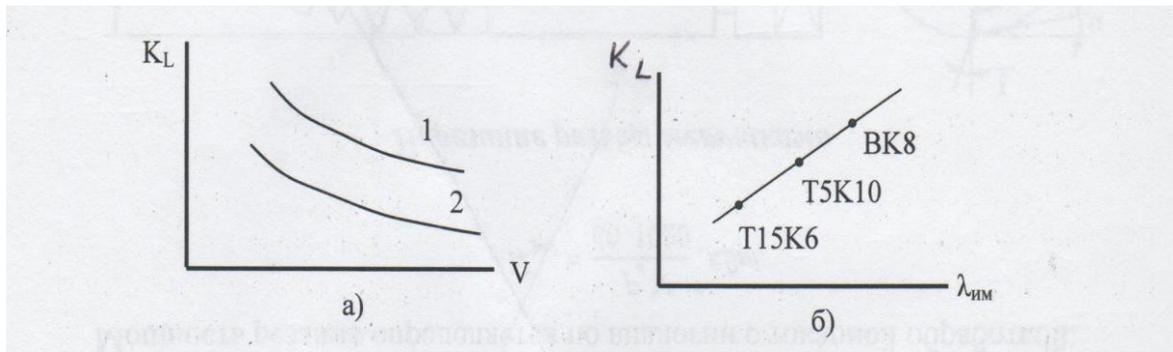


Рис. 5.13. Влияние инструментального материала на коэффициент укорочения стружки: а – BK6, б – T15K6

Например, при обработке заготовок из стали 45 большее значение коэффициента трения для твердого сплава BK6 (кривая 1 на рис. 5.13, а) по сравнению со сплавом T15K6 (кривая 2 на рис. 5.13, б) повышает степень пластической деформации и коэффициент укорочения стружки. Повышение коэффициента теплопроводности твердого сплава также вызывает рост коэффициента укорочения стружки из-за снижения температуры резания в зоне стружкообразования, связанное с повышением теплоотвода из зоны деформаций в тело инструмента при повышении коэффициента теплопроводности инструментального материала.

5.4.2. Относительный сдвиг

Для количественной оценки степени пластической деформации вводится понятие относительного сдвига. Величина относительного сдвига (рис. 34) равна $\varepsilon = \Delta S / \Delta x$, где ΔS – абсолютный сдвиг, Δx – толщина слоя, в котором происходит деформация обрабатываемого материала. На схеме образования сливной стружки с единственной плоскостью сдвига выделим треугольник mpq (см. рис. 5.14), из которого можно записать

$$\Delta S = mp + pq' = \Delta x \times \text{ctg}\beta + \Delta x \times \text{ctg}\psi = \Delta x(\text{ctg}\beta + \text{ctg}(180 - [\delta + \beta])) = \Delta x(\text{ctg}\beta + \text{tg}(\beta - \gamma))$$

Тогда величина относительного сдвига будет равна: $\varepsilon = \text{ctg}\beta + \text{tg}(\beta - \gamma)$.

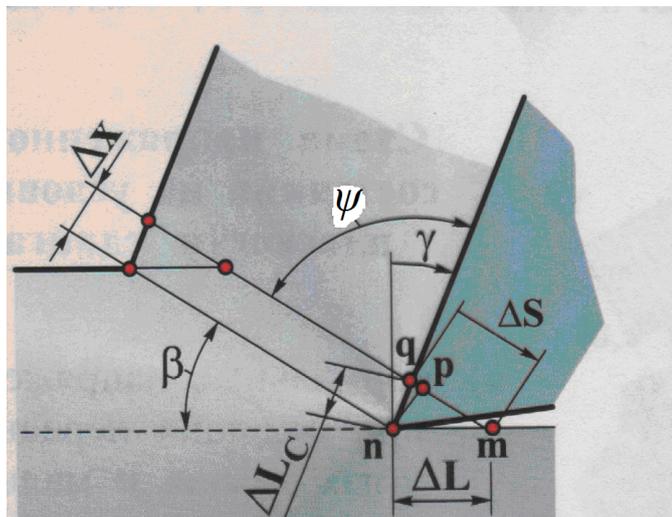


Рис. 5.14. Схема к определению относительного сдвига

Модуль 6. Силы при обработке материалов резанием

6.1. Система сил, действующих в процессе резания

Для определения сил на контактных площадках инструмента, можно воспользоваться теоретическими формулами, но они в ряде случаев не обеспечивают точных результатов. Силы при обработке материалов резанием определяют экспериментально при помощи динамометров, с помощью которых равнодействующую силу резания R раскладывают по трем координатным осям (z, x, y) (рис. 6.1).

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_x^2 + P_y^2},$$

где P_z – главная составляющая силы резания, определяющая мощность и крутящий момент при резании (данная сила необходима для расчета привода главного движения); P_y – радиальная составляющая силы резания, отжимающая резец от заготовки, оказывает влияние на точность и шероховатость обработанной поверхности; P_x – осевая составляющая силы резания; необходима для расчета привода подачи станка.

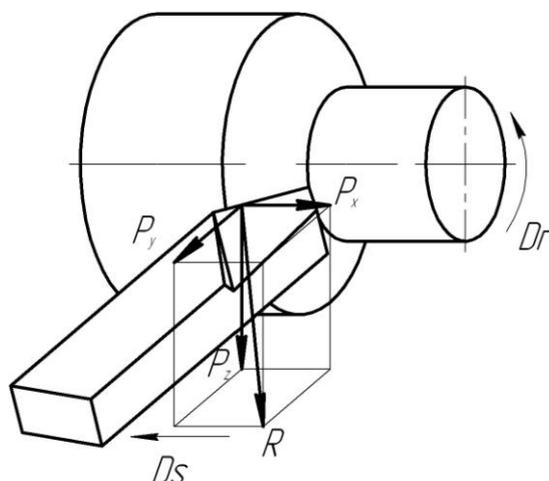


Рис. 6.1. Составляющие силы резания при точении

При $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 15^\circ$, $\lambda = 0^\circ$ между составляющими силы резания имеется соотношение: $P_z = 1$, $P_y = (0,4 - 0,5) P_z$, $P_x = (0,3 - 0,4) P_z$. Отсюда сила R будет равна:

$$R = \sqrt{P_z + [0,4 - 0,5 P_z]^2 + [0,3 - 0,4 P_z]^2} \cong 1,1 P_z.$$

Из полученного выражения следует, что сила P_z является главной составляющей силы резания и мало отличается по величине от равнодействующей силы R .

Для расчета составляющих сил резания используют следующие эмпирические зависимости, полученные на основании экспериментальных исследований:

$$P_z = C_{P_z} t^{X_{P_z}} S^{Y_{P_z}} V^{Z_{P_z}} k_{P_z}; \quad P_y = C_{P_y} t^{X_{P_y}} S^{Y_{P_y}} V^{Z_{P_y}} k_{P_y};$$

$$P_x = C_{P_x} t^{X_{P_x}} S^{Y_{P_x}} V^{Z_{P_x}} k_{P_x},$$

где C_p – постоянный коэффициент, зависящий от свойств инструментального и обрабатываемого материалов и условий обработки; x_p, y_p, z_p – показатели степени влияния соответственно глубины, подачи и скорости на силу резания; k_p – общий поправочный коэффициент на измененные условия резания.

6.2. Мощность, затрачиваемая на процесс резания

Мощность, затрачиваемая на процесс резания (эффективная мощность), рассчитывается как сумма мощностей на преодоление каждой составляющей силы резания P_z , P_y и P_x . Учитывая, что мощность есть работа в единицу времени, необходимо каждую составляющую умножить на скорость резания в направлении действия данной силы, т.е.

$$N_{рез} = N_{Pz} + N_{Px} + N_{Py} = \frac{P_z V_{Pz}}{60 \cdot 75 \cdot 1,36} + \frac{P_y V_{Py}}{60 \cdot 75 \cdot 1,36} + \frac{P_x V_{Px}}{60 \cdot 75 \cdot 1,36}.$$

Учитывая, что скорость в направлении радиальной составляющей P_y равна нулю, мощность резания на преодоление данной силы также будет равна нулю. Мощность на преодоление осевой составляющей существенно меньше по сравнению с мощностью на преодоление главной составляющей,

$$N_{Px} = \frac{P_x \cdot S_o \cdot n}{60 \cdot 75 \cdot 1,36 \cdot 1000}.$$

Поэтому окончательно имеем:

$$N_{рез} = \frac{P_z \cdot V}{60 \cdot 1020}, \text{ [кВт]}$$

где P_z измеряется в (Н), а V – м/мин.

Мощность на валу электродвигателя определяется как:

$$N_{э} = \frac{N_{рез}}{\eta} \leq N_{ст},$$

где η – КПД электродвигателя станка, $N_{ст}$ – мощность электродвигателя станка.

Для осуществления процесса резания необходимо чтобы $N_{э} \leq N_{ст}$.

Если данное условие не выполняется, то необходимо:

1. Уменьшить частоту вращения, перейдя на ближайшее меньшее её значение по паспорту станка.

2. «Разбить» глубину резания на несколько проходов (2 или более).

3. Выбрать более мощный станок.

6.3. Влияние различных факторов на силы резания

Рассмотрим влияние различных фактор на силы резания (на примере главной составляющей P_z) при токарной обработке.

С увеличением твердости или прочности НВ (σ_B) обрабатываемого материала возрастает его сопротивляемость процессу снятия стружки, что ведет к росту силы резания P_z (рис. 6.2, а).

Увеличение подачи или глубины резания $S(t)$ приводит к росту площади срезаемого слоя и, следовательно, объема срезаемого материала, что повышает силу P_z (рис. 6.2, б). Больше влияние на силу резания оказывает глубина резания по сравнению с подачей. Это объясняется тем, что при увеличении глубины резания, например, в 2 раза площадь срезаемого слоя тоже увеличивается в 2 раза ($F = 2S \times t$), но степень деформации при этом не меняется. Следовательно, сила P_z растет пропорционально глубине, а значит, увеличивается в 2 раза. При увеличении подачи в 2 раза площадь срезаемого слоя также увеличивается в 2 раза, но степень пластической деформации уменьшается (см. рис. 5.9). Следовательно, рост силы будет отставать от роста подачи и она не увеличится в 2 раза.

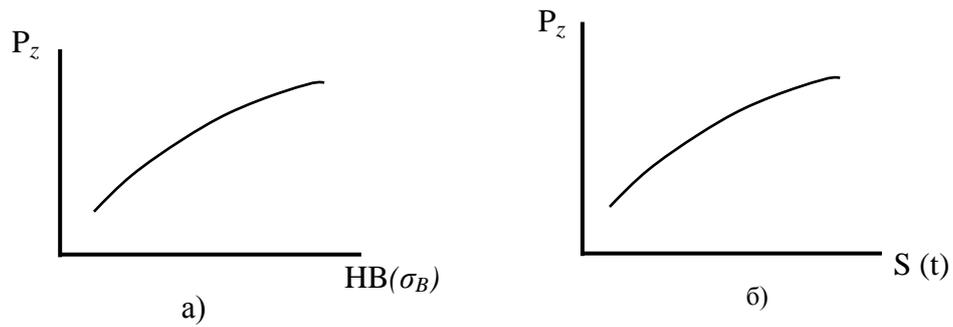


Рис. 6.2. Влияние обрабатываемого материала (а), подачи и глубины (б) на составляющую силы резания P_z

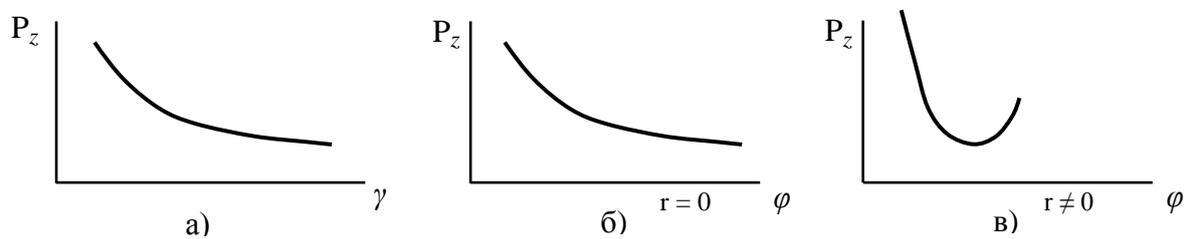


Рис. 6.3. Влияние переднего (а) и главного заднего угла в плане (б, в) на составляющую силы резания P_z

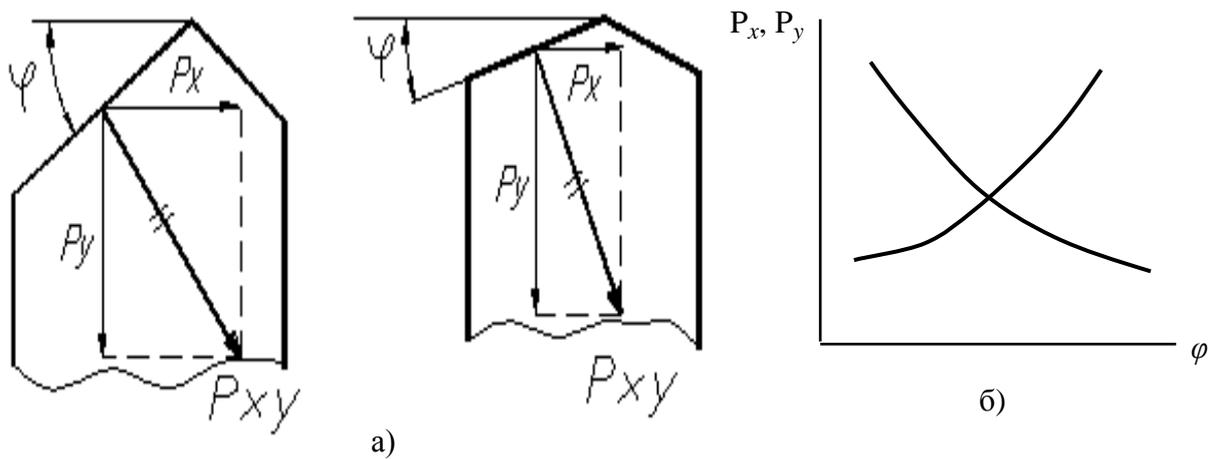


Рис. 6.4. Влияние главного угла в плане на составляющие силы резания P_x и P_y

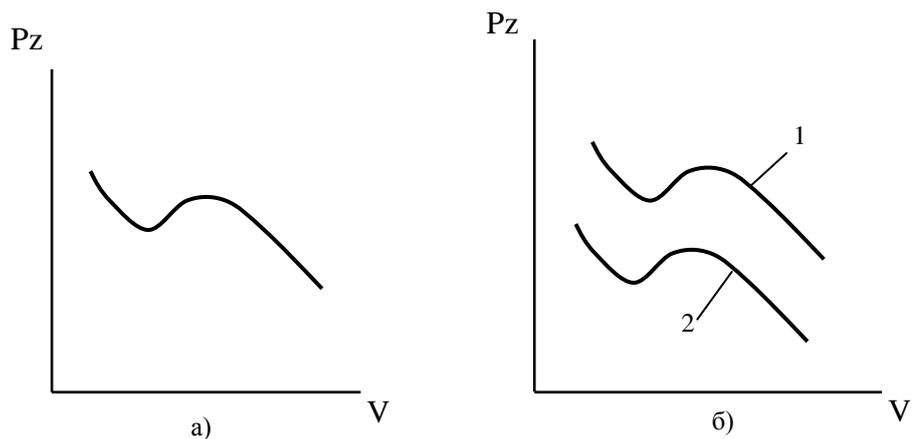


Рис. 6.5. Влияние скорости резания (а) и инструментального материала (а) на составляющую силы резания P_z : а – ВК6, б – Т15К6

Влияние всех остальных факторов на силу резания объясняется их влиянием на коэффициент укорочения стружки. При этом факторы, повышающие степень пластической деформации (увеличивающие коэффициент укорочения стружки), действуют в сторону увеличения сил резания и наоборот (рис. 6.3 – 6.5).

Модуль 7. Контактные процессы на передней поверхности режущего инструмента

7.1. Полная длина контакта стружки с передней поверхностью режущего инструмента и контактные напряжения

Характерными особенностями контакта стружки с передней поверхностью являются:

- различная химическая чистота контакта: часть контакта свободна, а другая покрыта окисными и адсорбированными пленками;
- неравномерное распределение контактных нагрузок по длине контакта стружки с передней поверхностью;
- изменение температуры контакта в широких пределах.

Из-за указанных особенностей скольжение стружки по передней поверхности происходит в различных условиях: начиная от граничного трения без существенных вторичных деформаций прирезцовых слоев стружки и кончая полным схватыванием данных слоев с инструментальным материалом. Исходя из этого, на контактной площадке режущего инструмента по передней поверхности можно выделить следующие участки (рис. 7.1).

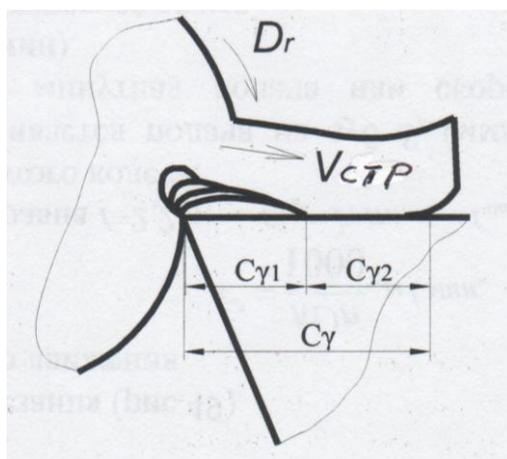


Рис. 7.1. Участки трения на передней поверхности режущего инструмента

Участок пластического контакта $C_{\gamma 1}$, для которого характерны схватывание контактных слоев стружки с передней поверхностью и внутреннее трение материала. На данном участке расположен заторможенный слой, в пределах которого стружка движется не по передней поверхности, а по заторможенному слою, и сопротивление, оказываемое движению стружки, определяется сопротивлением сдвигу в контактном слое стружки. Поэтому на данном участке внешнее трение скольжения отсутствует и заменяется внутренним трением между отдельными слоями стружки. Второй участок – это участок упругого контакта $C_{\gamma 2}$, на котором стружка контактирует непосредственно с передней поверхностью. Здесь имеет место внешнее трение скольжения и сопротивление движению стружки определяется силой трения между стружкой и передней поверхностью.

Эпюры контактных напряжений на передней поверхности режущего инструмента представлено на рис. 7.2.

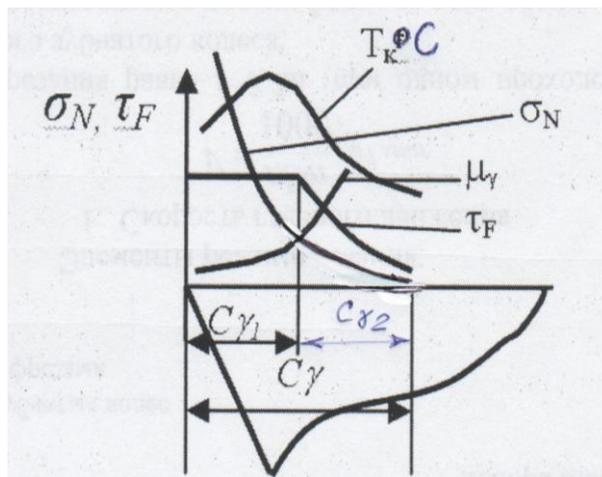


Рис. 7.2. Эпюры распределения нормальных (σ_N) и касательных (τ_F) напряжений и контактной температуры (T_k) на передней поверхности инструмента

Нормальные контактные напряжения σ_N имеют наибольшую величину у вершины режущего клина инструмента, монотонно убывая до нуля в месте отрыва стружки от передней поверхности. Касательные контактные напряжения τ_F на участке пластического контакта имеют постоянную величину, а затем начинают уменьшаться.

7.2. Система сил, действующих на передней и задней поверхностях режущего инструмента

Рассмотрим схему сил, действующих на передней и задней поверхностях режущего инструмента, при свободном резании (рис. 7.3). Присвоим силам, действующим на передней поверхности, индекс « γ », на задней – « α ».

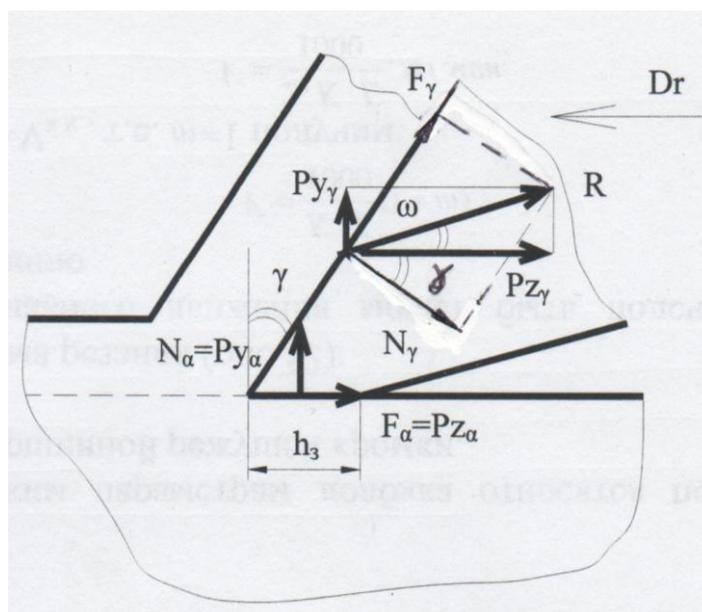


Рис. 7.3. Схема сил, действующих на передней и задней поверхностях инструмента при свободном резании

Тогда суммарные силы резания, действующие на контактных площадках режущего инструмента, будут равны:

$$P_z = P_{z\alpha} + P_{z\gamma}; P_y = P_{y\alpha} + P_{y\gamma}.$$

Для определения сил, действующих на передней и задней поверхностях инструмента, воспользуемся методом экстраполяции сил резания на нулевую фаску износа. Данный метод заключается в определении силы резания при различных величинах износа по задней поверхности инструмента h_3 с последующей экстраполяцией на величину фаски износа, равной нулю (рис. 7.4). По графику, представленному на рис. 43, определяем силы, действующие на задней поверхности $P_{y\alpha}$, $P_{z\alpha}$ при выбранной величине фаски износа по задней поверхности.

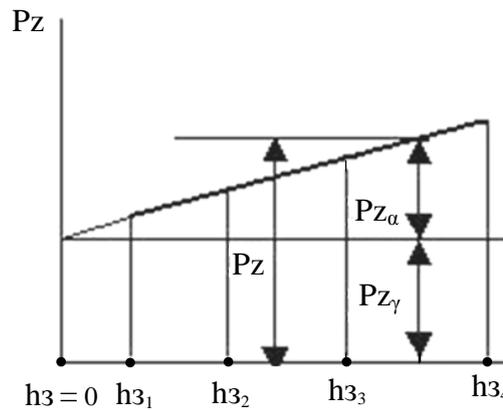


Рис. 7.4. Иллюстрация метода экстраполяции сил резания на нулевую фаску износа

Далее находим соответствующие силы на передней поверхности:

$$P_{z\gamma} = P_z - P_{z\alpha}; P_{y\gamma} = P_y - P_{y\alpha}.$$

Нормальная сила на передней поверхности:

$$N_\gamma = R \times \cos(\gamma + \varpi) = P_{z\gamma} \frac{\cos(\gamma + \varpi)}{\cos \varpi}.$$

Сила трения на передней поверхности:

$$F_\gamma = R \times \sin(\gamma + \omega) = P_{z\gamma} \frac{\sin(\gamma + \varpi)}{\cos \varpi}.$$

Коэффициент трения на передней поверхности:

$$\mu_\gamma = F_\gamma / N_\gamma.$$

Средняя удельная нормальная нагрузка на передней поверхности:

$$q_{N\gamma} = \frac{P_{z\gamma} \times \cos \gamma - P_{y\gamma} \times \sin \gamma}{C_\gamma \times b},$$

Средняя удельная касательная нагрузка на передней поверхности:

$$q_{F\gamma} = \mu_{\gamma} q_{N\gamma}.$$

По аналогии находим силы и удельные нагрузки на задней поверхности:

$$N_{\alpha} = P_{y\alpha}; F_{\alpha} = P_{z\alpha}; \mu_{\alpha} = P_{z\alpha}/P_{y\alpha}; q_{N\alpha} = P_{y\alpha}/f_3; q_{F\alpha} = P_{z\alpha}/f_3.$$

(f_3 – площадь фаски износа на задней поверхности).

При несвободном резании в полученных зависимостях необходимо силы P_y , $P_{y\alpha}$, $P_{y\gamma}$ заменить соответственно на силы P_{xy} , $P_{xy\alpha}$ и $P_{xy\gamma}$.

$$P_{xy} = \sqrt{Px^2 + Py^2}; P_{xy\alpha} = \sqrt{Px_a^2 + Py_a^2}; P_{xy\gamma} = \sqrt{Px_{\gamma}^2 + Py_{\gamma}^2}$$

Модуль 8. Качество обработанной поверхности

8.1. Шероховатость обработанной поверхности

Качество поверхностного слоя определяется шероховатостью обрабатываемой поверхности и состоянием материала поверхностного слоя. Шероховатость поверхности характеризуется высотой и формой микронеровностей, а состояние материала – его упрочнением, микроструктурой и остаточными напряжениями. При изучении шероховатости рассматривают микронеровность расчетную (геометрическую) и реальную.

Геометрическая микронеровность получается при следующих допущениях: 1 – обрабатываемый материал считается полностью недеформируемым; 2 – технологическая система является абсолютно жесткой; 3 – режущие кромки инструмента являются геометрическими линиями.

Из рис. 8.1 расчетную (геометрическую) высоту микронеровностей (высота НК в треугольнике ВСК, который определяет остаточную площадь срезаемого слоя) можно найти как:

$$R_r = \frac{S_o}{\operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{ctg} \varphi_1}.$$

Реальная микронеровность по сравнению с геометрической отличается в большую сторону, как по форме, так и по величине. Данный факт объясняется: пластическим течением материала (обрабатываемого материала) из зоны стружкообразования в сторону высоты микронеровности, колебаниями режущего инструмента и заготовки в процессе резания, трением задних поверхностей режущего инструмента о поверхности заготовки и неровностями режущих кромок, которые увеличиваются по мере износа инструмента.

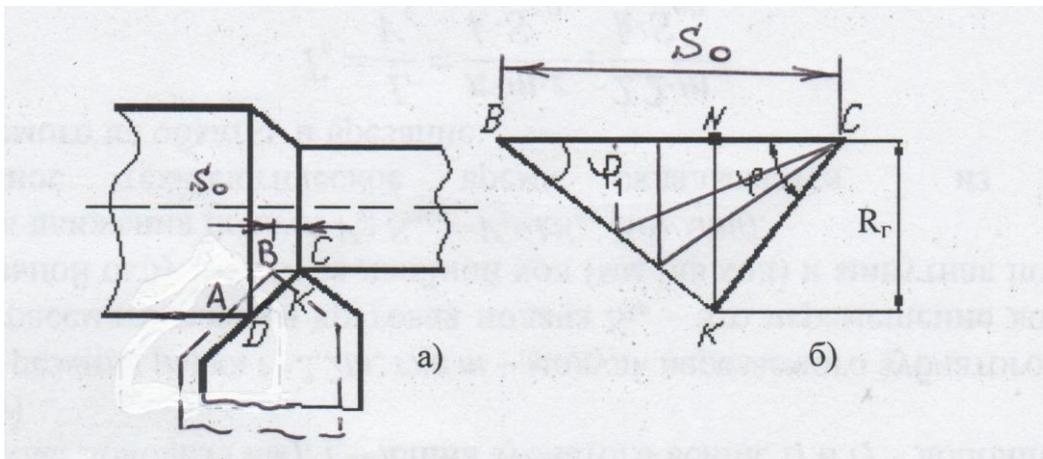


Рис. 8.1. Схема к объяснению влияния подачи и главного угла в плане на высоту геометрической микронеровности

На высоту реальных микронеровностей оказывают влияние те же факторы, что и на высоту расчетных неровностей. Поэтому при уменьшении подачи (толщины срезаемого слоя) (рис. 8.2, б), углов в плане инструмента (рис. 8.2, в) и увеличении радиуса при вершине инструмента величина неровностей уменьшается. Глубина резания (ширина срезаемого слоя) и передний угол инструмента на высоту неровностей значительного влияния не оказывают.

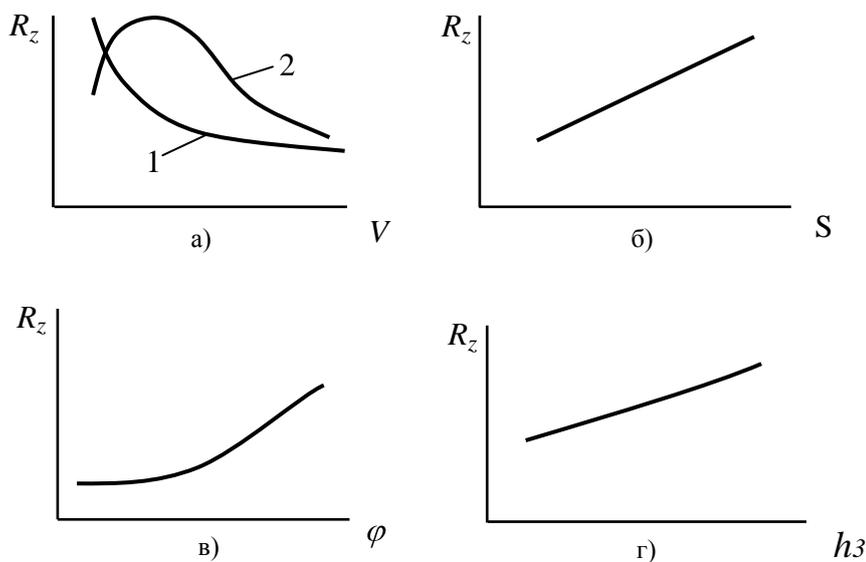


Рис. 8.2. Влияние различных факторов на высоту микронеровностей

Кроме того, на высоту неровностей влияют факторы, которые изменяют объем пластического деформирования материала и условия трения на контактных поверхностях инструмента. К ним можно отнести механические свойства обрабатываемого материала, скорость резания и свойства применяемой смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Факторы, увеличивающие объем пластического деформирования материала, и коэффициент трения повышают высоту микронеровностей. Так, с увеличением твердости и прочности обрабатываемого материала и снижением его пластичности объем пластической деформации уменьшается, и это приводит к уменьшению высоты неровностей. При обработке заготовок из материала не склонного к наростообразованию с увеличением скорости резания высота неровностей уменьшается. Это связано с уменьшением объема пластической деформации и среднего коэффициента трения (рис. 8.2, а, кривая 1). Если обрабатываемый материал склонен к наростообразованию, то высота неровностей находится в прямой зависимости от высоты нароста. В зоне наростообразования высота неровностей возрастает с увеличением высоты нароста, затем снижается по мере уменьшения высоты нароста, а после исчезновения нароста продолжает непрерывно снижаться (рис. 8.2, а, кривая 2). Применение СОЖ, снижающих средний коэффициент трения, вызывает снижение высоты неровностей. С повышением износа инструмента по задней поверхности средний коэффициент трения возрастает, и высота неровностей увеличивается (рис. 8.2, г).

8.2. Упрочнение (наклеп) поверхностного слоя

При обработке материалов резанием деформации подвергается не только срезаемый слой, но и слой металла, с которого он снимается, т.е. деформация проникает вглубь обрабатываемого материала, изменяет его физико-механические свойства, вызывая его упрочнение (наклеп) (рис. 8.3).

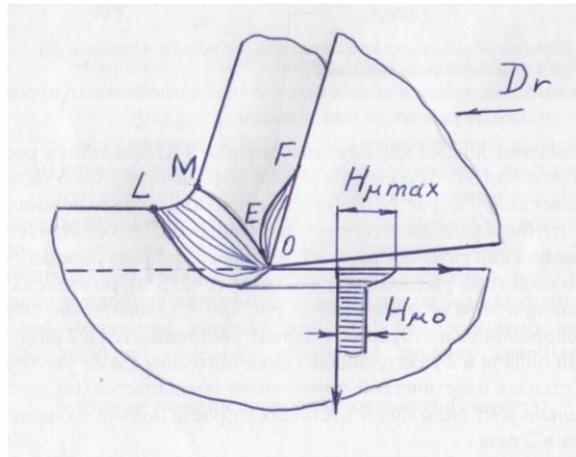


Рис. 8.3. Схема образования упрочненного слоя обработанной поверхности

Упрочненный слой характеризуется повышенной твердостью, износостойкостью, пониженной пластичностью. Твердость упрочненного слоя может в 2 и более раз превышать твердость основного материала. Физико-механические свойства упрочненного слоя характеризуются следующими параметрами:

1. Степенью упрочнения материала поверхностного слоя ($\Delta H\mu$)

$$\Delta H\mu = \frac{H\mu_{\max} - H\mu_o}{H\mu_o} \times 100\%$$

2. Глубиной упрочненного (наклепанного) слоя (h).
3. Величиной, характером распространения и знаком остаточных напряжений.

Упрочнение поверхностного слоя обрабатываемой заготовки вызывают следующие причины: силовые и тепловые нагрузки, возникающие в процессе резания, и структурные превращения, происходящие в поверхностном слое заготовки.

Влияние различных факторов на глубину упрочненного слоя (h) и степень упрочнения ($\Delta H\mu$) показано на рис. 8.4.

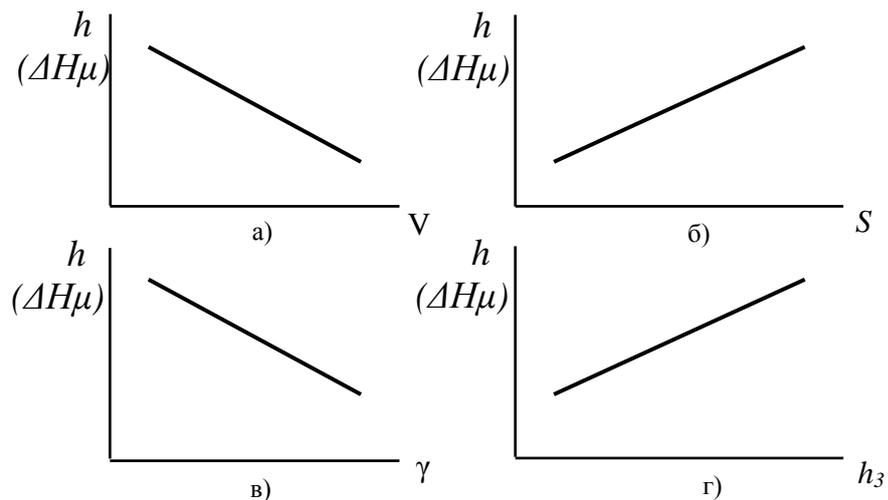


Рис. 8.4. Влияние различных факторов на глубину упрочнённого слоя и степень упрочнения

Упрочнение материала поверхностного слоя связано в основном с деформацией обрабатываемого материала. Степень упрочнения и глубина упрочненного слоя находятся в прямой зависимости от степени деформации срезаемого слоя и действующих сил резания. Факторы, повышающие степень пластической деформации и силы резания, увеличивают степень упрочнения и глубину упрочненного слоя. Поэтому величины ΔH_{μ} и h растут при уменьшении переднего угла (рис. 8.4, в) и увеличения подачи (толщины срезаемого слоя) (рис. 8.4, б). Влияние скорости резания на степень упрочнения такое же, как и на коэффициент укорочения стружки (рис. 8.4, а). Повышение износа инструмента увеличивает степень упрочнения и глубину упрочненного слоя (рис. 8.4, г).

Упрочненный слой обладает высокой твердостью и износостойкостью, но и большой хрупкостью, поэтому для деталей, работающих на износ он полезен, а для деталей, работающих со знакопеременными нагрузками – вреден.

Основной причиной возникновения остаточных напряжений при лезвийной обработке является силовой фактор, температура имеет второстепенное значение. При абразивной обработке – температурный. При лезвийной обработке пластичных материалов остаточные напряжения обычно растягивающие, т.е. имеют знак «+», при обработке хрупких материалов – сжимающие «-», при шлифовании – всегда растягивающие. Растягивающие остаточные напряжения ухудшают качество поверхностного слоя из-за снижения усталостной прочности материала. В том случае, когда растягивающие напряжения будут больше предела прочности обрабатываемого материала, то это приведет к образованию поверхностных трещин.

Модуль 9. Тепловые процессы при обработке материалов резанием

9.1. Основные источники образования теплоты при резании

Основными источниками теплоты (рис. 9.1) при резании являются: пластические деформации материала в зоне основных пластических деформаций OLM, в результате которых образуется теплота деформации Q_d ; трение стружки по передней поверхности, в результате которой образуется теплота трения по передней поверхности $Q_{ТП}$; трение обрабатываемого материала по задней поверхности, в результате чего образуется теплота трения по задней поверхности $Q_{ТЗ}$.

Таким образом, общее количество теплоты, образующейся при резании Q будет равно:

$$Q = Q_d + Q_{ТП} + Q_{ТЗ}.$$

Уравнение теплового баланса при резании имеет вид:

$$Q_d + Q_{ТП} + Q_{ТЗ} = Q_c + Q_p + Q_u + Q_v,$$

где Q_c – теплота, уходящая в стружку; Q_p – теплота, уходящая в инструмент; Q_u – теплота, уходящая в заготовку, Q_v – теплота, уходящая во внешнюю среду.

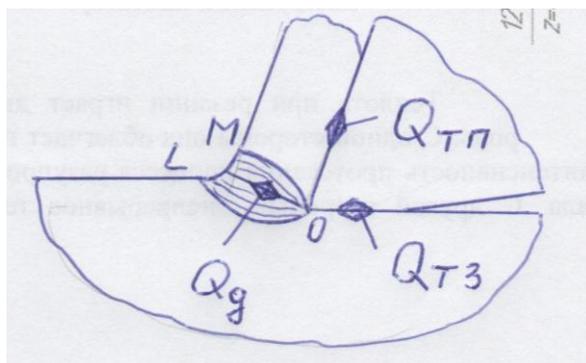


Рис. 9.1. Основные источники образования теплоты при резании

Количество теплоты, уходящее в стружку, инструмент и заготовку, существенно зависит от скорости резания. Как видно из рис. 9.2, с увеличением скорости резания количество теплоты, уходящей в стружку, возрастает, а в инструмент и заготовку – уменьшается. При лезвийной обработке без применения СОЖ наибольшее количество теплоты уносится стружкой (50 – 80%), в инструмент поступает 40 – 10%, в заготовку – 9% и в окружающую среду – 1%.

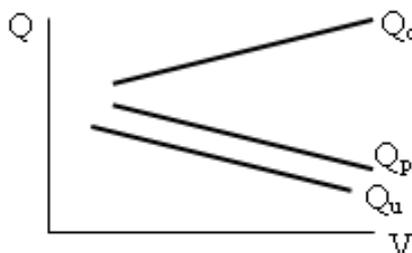


Рис. 9.2. Влияние скорости резания на теплоту, уходящую в стружку, инструмент и заготовку

Теплота при резании играет двойную роль. С одной стороны она облегчает процесс резания, т.к. определяет интенсивность протекания процесса разупрочнения обрабатываемого материала. С другой стороны – непрерывное тепловое воздействие на контактные площадки режущего инструмента приводят к их износу.

Кроме того, интенсивное тепловое воздействие на технологическую систему ведёт к температурным деформациям ее элементов, что может вызвать снижение точности обработки.

9.2. Тепловые потоки в зоне резания

Рассмотрим тепловые потоки в зоне резания. В обозначении количества теплоты, поступающей в стружку, инструмент и заготовку от различных источников, введем индексы «'», «''», «'''» соответственно. Часть теплоты деформации, уходящей в стружку обозначим $Q_{дс}$, в заготовку – $Q_{ди}$.

Рассмотрим движение тепловых потоков от каждого из тепловых источников.

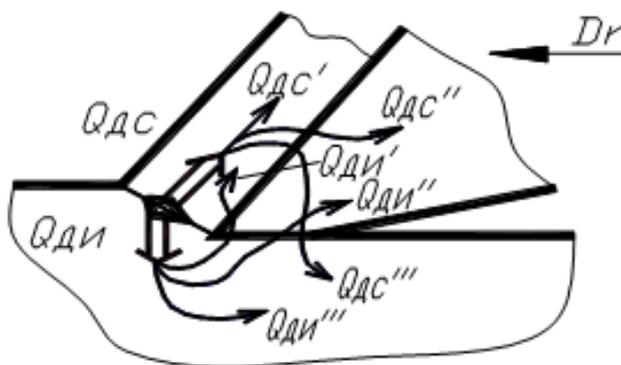


Рис. 9.3. Тепловые потоки от источника теплоты деформации в стружку, инструмент и заготовку

Теплота деформации. Часть теплоты деформации Q_d (рис. 9.3) уходит в стружку в виде потока $Q_{дс}$, который в свою очередь частично остается в стружке $Q_{дс}'$, через контакт по передней поверхности поступает в инструмент $Q_{дс}''$, а через контакт по передней и задней поверхностям – в заготовку $Q_{дс}'''$. Вторая часть теплоты деформации в виде потока $Q_{ди}$ уходит в заготовку. Часть этого потока остается в заготовке $Q_{ди}'''$, другая часть через контакт по задней поверхности переходит в инструмент $Q_{ди}''$, а третья через контакт по задней и передней поверхностям уходит в стружку $Q_{ди}'$. Теплота трения по передней поверхности (рис. 9.4, б) $Q_{тп}$ в виде трех потоков уходит в стружку $Q_{тп}'$, в заготовку $Q_{тп}'''$ через контакт по задней поверхности и в инструмент $Q_{тп}''$. Аналогично теплота трения по задней поверхности (рис. 9.4, а) – в заготовку $Q_{тз}'''$, в инструмент $Q_{тз}''$ и в стружку $Q_{тз}'$.

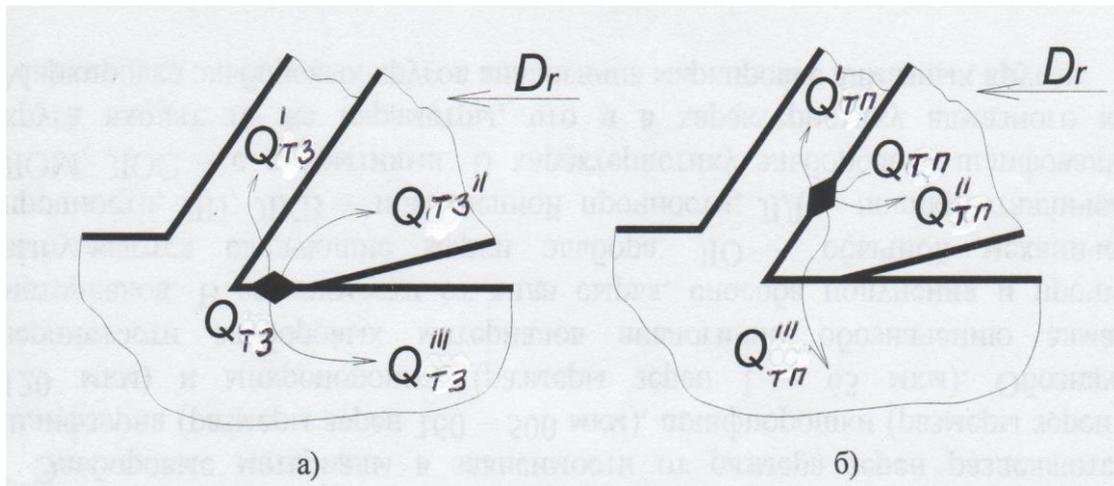


Рис. 9.4. Тепловые потоки от источника теплоты трения по задней (а) и передней (б) поверхностям, уходящие в стружку, инструмент и заготовку

Для упрощения схемы движения тепловых потоков в зоне резания введем понятие итоговых потоков. Количество теплоты, поступающей в заготовку, будет равно:

$$Q_{и} = Q_{ди}''' + Q_{дс}''' + Q_{тп}''' + Q_{тз}'''.$$

Величину потоков $Q_{ди}'''$ и $Q_{тз}'''$ можно определить как:

$$\begin{aligned} Q_{ди}''' &= Q_{ди} - Q_{ди}'' - Q_{ди}'; \\ Q_{тз}''' &= Q_{тз} - Q_{тз}'' - Q_{тз}'. \end{aligned}$$

Тогда: $Q_{и} = Q_{ди} + Q_{тз} - (Q_{ди}'' + Q_{ди}' + Q_{тз}'' + Q_{тз}' - Q_{дс}''' - Q_{тп}''')$.

Тепловые потоки $(Q_{ди}'' + Q_{ди}' + Q_{тз}'' + Q_{тз}' - Q_{дс}''' - Q_{тп}''')$ обозначим через Q_3 . Тогда выражение для определения количества теплоты, поступающей в заготовку, можно записать в виде:

$$Q_{и} = Q_{ди} + Q_{тз} - Q_3,$$

где Q_3 – итоговый поток, образующийся в результате теплообмена по задней поверхности режущего инструмента.

Количество теплоты, уходящей в стружку, будет равно:

$$Q_{с} = Q_{дс}' + Q_{ди}' + Q_{тз}' + Q_{тп}'.$$

Величины потоков $Q_{дс}'$ и $Q_{тп}'$ можно определить как:

$$\begin{aligned} Q_{дс}' &= Q_{дс} - Q_{дс}'' - Q_{дс}'''; \\ Q_{тп}' &= Q_{тп} - Q_{тп}'' - Q_{тп}'''. \end{aligned}$$

Тогда:

$$Q_{с} = Q_{дс} + Q_{тп} - (Q_{дс}'' + Q_{дс}''' + Q_{тп}'' + Q_{тп}''' - Q_{ди}' - Q_{тз}').$$

Обозначив потоки $(Q_{дс}'' + Q_{дс}''' + Q_{тп}'' + Q_{тп}''' - Q_{ди}' - Q_{тз}')'$ через $Q_{п}$, получим новое выражение для определения количества теплоты, уходящей в стружку:

$$Q_{с} = Q_{дс} + Q_{тп} - Q_{п},$$

где $Q_{п}$ – итоговый поток, образующийся в результате теплообмена по передней поверхности.

Схема тепловых потоков в зоне резания с учетом итоговых представлена на рис. 9.5.

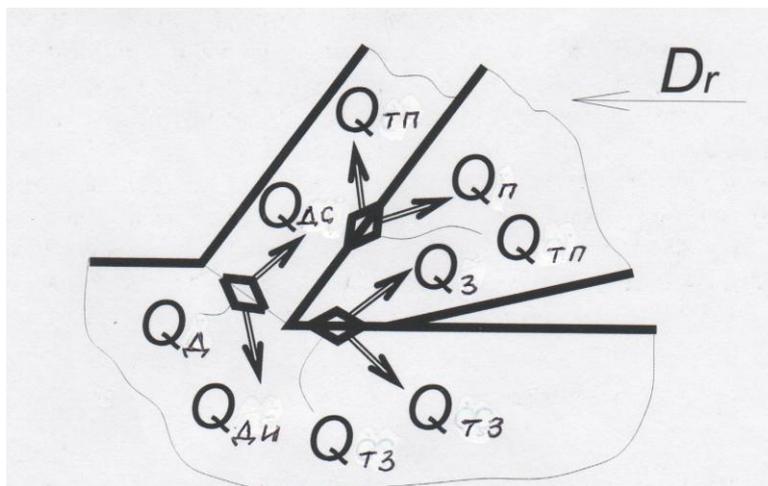


Рис. 9.5. Схема тепловых потоков в стружке, инструменте и заготовке с учетом итоговых тепловых потоков

Как следует из данной схемы количество теплоты, поступающей в режущий инструмент, будет равна:

$$Q_{р} = Q_{п} + Q_{з}.$$

Долю теплоты деформации, уходящую в заготовку и стружку, можно определить как:

$$Q_{ди} = (1 - b^*) Q_{д};$$

$$Q_{дс} = b^* Q_{д},$$

где b^* – коэффициент, учитывающий долю теплоты деформации $Q_{д}$, уходящую в стружку.

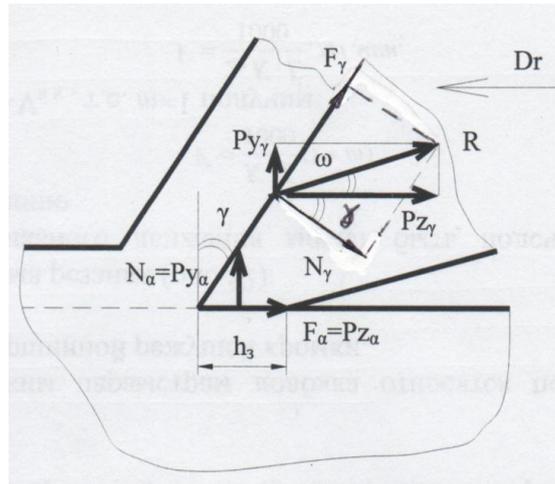


Рис. 9.6. Схема сил, действующих на передней и задней поверхности инструмента

Силы, действующие на передней и задней поверхности инструмента, необходимые для расчета количества теплоты различных источников, представлены на рис. 9.6. Общее количество теплоты будет равно:

$$Q = P_z \times V.$$

Теплота трения по передней поверхности $Q_{тп}$:

$$Q_{тп} = F_\gamma \times V_c = \frac{(P_{y\gamma} \times \cos \gamma + P_{z\gamma} \times \sin \gamma)}{K_L} \times V,$$

где K_L – коэффициент укорочения стружки.

Теплота трения по задней поверхности $Q_{тз}$:

$$Q_{тз} = F_\alpha \times V = P_{z\alpha} \times V.$$

Теплота деформации Q_d :

$$Q_d = Q - Q_{тп} - Q_{тз} = \frac{V}{K_L} \times [P_{z\gamma} \times (K_L - \sin \gamma) - P_{y\alpha} \times \cos \gamma].$$

Интенсивность тепловых источников определяется как отношение количества теплоты какого-либо источника к площади, на которой действует данный источник:

$$q_i = \frac{Q_i}{f_i},$$

где q_i – интенсивность источника теплоты Q_i , f_i – площадь, на которой действует источник теплоты Q_i .

Для источника теплоты деформации площадь равна:

$$f_d = \frac{b \times a}{\sin \beta},$$

для источника теплоты трения по передней поверхности соответственно:

$$f_{тп} = b \times C_\gamma,$$

для источника теплоты трения по задней поверхности:

$$f_{тз} = b \times h_3.$$

9.3. Методы экспериментального определения температуры резания

Различают следующие методы определения температуры:

1) Калориметрический метод – предназначен для определения количества теплоты, поступающей в стружку, инструмент, заготовку (рис. 9.7).

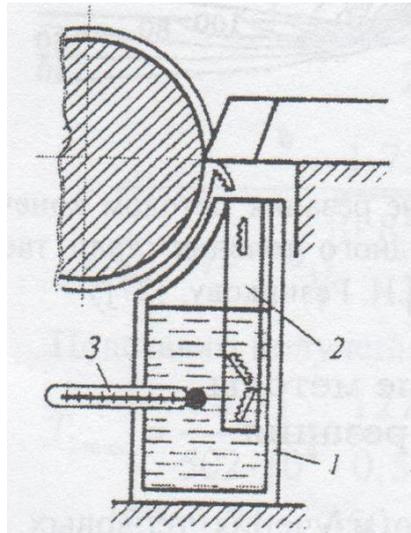


Рис. 9.7. Определение количества теплоты, уходящей в стружку, с использованием калориметра: 1 – калориметр, 2 – сетка для сбора стружки, 3 – термометр

2) Метод термокрасок. При использовании данного метода применяются специальные краски, которые при определенной температуре меняют свой цвет. С помощью данного метода можно определять температуру на рабочих поверхностях инструмента. Для конкретного режима резания (V, s и t) можно последовательно наносить на рабочие поверхности инструмента краски, изменяющие свой цвет при различных температурах, построить температурное поле (рис. 9.8).

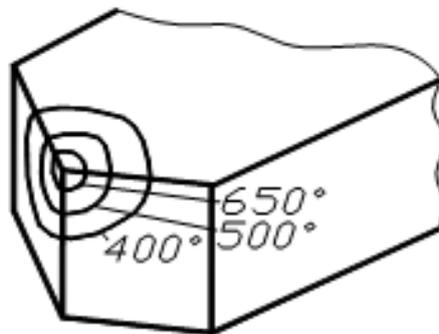


Рис. 9.8. Температурное поле на поверхностях инструмента, полученное методом термокрасок

3) Металлографический метод. Данный метод основан на изменении свойств инструментального материала (например, микротвердости) под воздействием температуры. Метод требует разрушения инструмента – инструмент разрезают по главной секущей

плоскости, изготавливают шлифы и измеряют микротвердость. Далее по тарировочному графику определяют температуру.

4) Метод термопар.

5) Бесконтактный (оптический) метод.

Наибольшее применение нашел метод термопар. Рассмотрим *естественную* термопару (рис. 9.9), оба элемента которой присутствуют в процессе резания для измерения температуры.

Различают одноинструментальную (рис. 9.9, а) и двухинструментальную (рис. 9.9, б) термопары. Обозначения на рис. 9.9, а: 1 – заготовка, 2 – резец, 3 – патрон, 4 – шпиндель, 5 – изоляция, 6 – гибкий вал, 7 – наконечник, 8 – ванночка со ртутью, 9 – показывающий прибор, 10 – медный провод; на рис. 9.9, б: 1, 2 – резцы, 3 – показывающий прибор.

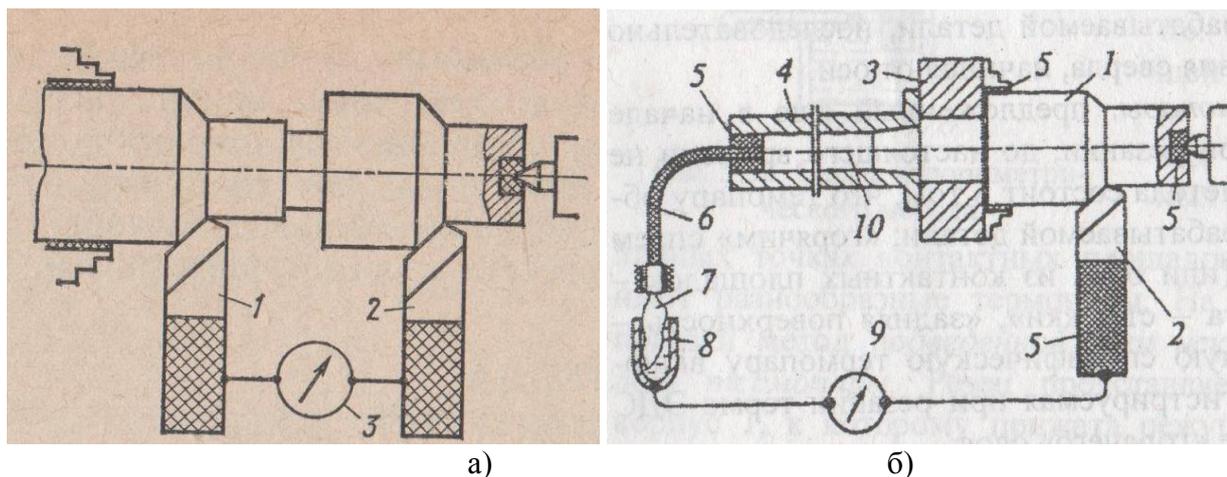


Рис. 9.9. Схема изменения температуры методом естественной

Элементами одноинструментальной термопары являются резец и заготовка, двухинструментальной – два резца, изготовленных из разных инструментальных материалов и имеющих одинаковую геометрию.

Преимущества и недостатки термопар. Одноинструментальная термопара проще и доступнее в эксплуатации, требует меньшего расхода обрабатываемого материала. Существенным ее недостатком является необходимость трудоемкой тарировки термопары при замене обрабатываемого материала. Некоторые трудности вызывает также необходимость замыкания термо-ЭДС в цепи, один из элементов которой имеет вращательное движение (при токарной обработке это вращение заготовки). При использовании двухинструментальной термопары тарировка делается только один раз. Не требуется и дополнительных подвижных контактов в цепи термо-ЭДС, т.к. резцы 2 и 2' относительно друг друга не перемещаются. Недостатками двухинструментальной естественной термопары является более сложная наладка и больший расход обрабатываемого материала.

Естественная термопара позволяет определять среднюю температуру в зоне резания. Для перевода показаний показывающего прибора 4 в градусы Цельсия производится тарировка термопары. Один из способов тарировки показан на рис. 9.10, а. Тарировку производят в расплавленном металле. В электропечь 1 помещают тигель 2 с расплавленным металлом, имеющим низкую температуру плавления (свинцом, оловом, сплавом Вуда и т.п.). Стержни 3 и 4 из обрабатываемого и инструментального материалов опускают на одинаковую глубину в расплавленный металл, а к их концам присоединяют милливольтметр 6 (показывающий прибор естественной термопары), применяемый в опытах по измерению температуры при резании. Между стержнями помещают контрольную термопару 5, гальванометр которой 7 проградуирован в градусах Цельсия. Нагревая и охлаждая

расплавленный металл, сравнивают показания милливольтметра 6 в милливольтках и гальванометр 7 в градусах и строят тарировочный график (рис. 9.10, б). Наличие в металлорежущем оборудовании различных узлов и элементов, перемещающихся относительно друг друга, вызывает образование различных «паразитных» термо-ЭДС, которые искажают результаты измерения температуры при резании. Поэтому при использовании естественной термопары заготовка и инструмент должны быть изолированы от станка.

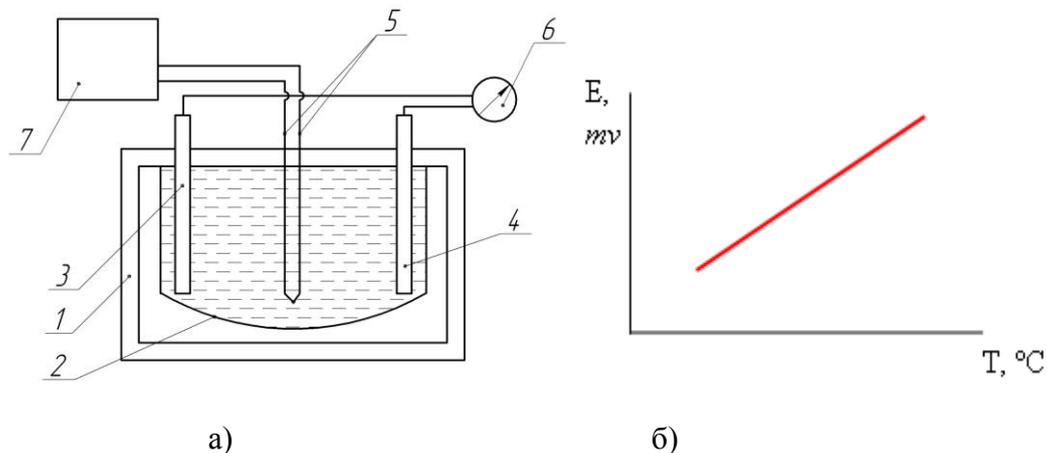


Рис. 9.10. Схема тарировки термопары (а) и тарировочный график (б)

Полуискусственной называется термопара, один из элементов которой естественно присутствует в процессе резания, а другой искусственно вводится или в инструмент или заготовку для измерения температуры. Данной термопарой можно получать температурные поля в режущем клине инструмента, определять локальные и контактные температуры (температуры на передней и задней поверхностях).

На рис. 9.11 представлена схема измерения температуры методом полуискусственной термопары при шлифовании. Между двумя половинками заготовки 1 и 2 закладывается изолированная от них проволока 4, которая образует с ними полуискусственную термопару. В процессе резания шлифовальный круг перерезает проволочку и, возникшая термо-ЭДС, фиксируется показывающим прибором 6. Данная термопара также измеряет среднюю температуру контакта шлифовального круга и заготовки.

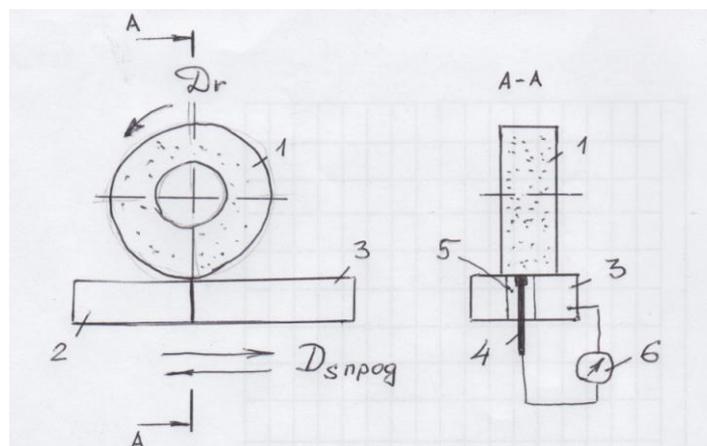


Рис. 9.11. Схема измерения температуры методом полуискусственной термопары при шлифовании

Разновидностью полуискусственной термопары является закладная термопара (рис. 9.12), позволяющая определять температурные поля в режущем клине инструмента и температуру на контактных площадках, наиболее близкую к реальной. Для этого используется разрезной резец, состоящий из двух половинок 1 и 2, которые плотно притерты между собой.

В половинке 1 делается паз, в который закладывается проволочка 3, изолированная от половинок резца слюдой 4. Предварительно один конец проволоки расклепывается и обрезается в виде прямоугольника размером 0,15 мм. Элементами полуискусственной термопары являются проволочка и материал инструмента, возникающая в процессе резания термо-ЭДС фиксируется прибором 5.

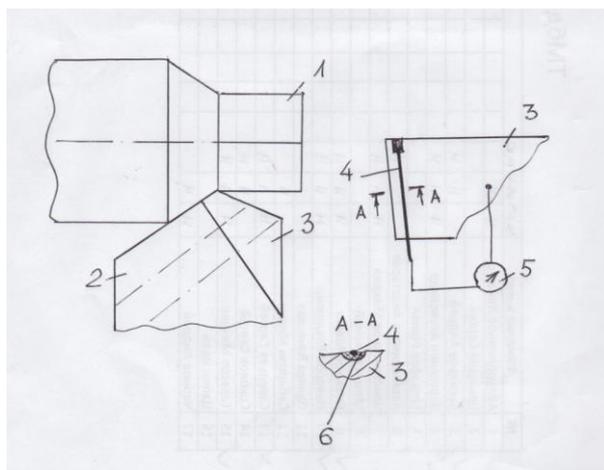


Рис. 9.12. Схема измерения температуры методом полуискусственной термопары при токарной обработке

Искусственной называется термопара, у которой оба элемента искусственно вводятся в инструмент или заготовку для измерения температуры. Для измерения температуры, например, при токарной обработке, в корпусе резца 1 сделано отверстие (рис. 9.13), в которое вставлена термопара 4, изолированная от корпуса резца изоляцией 3, и подключенная к показывающему прибору 5. Спай термопары прижимается к режущей пластине 2. В процессе резания спай термопары регистрирует температуру в режущем клине инструмента на некотором расстоянии от передней поверхности.

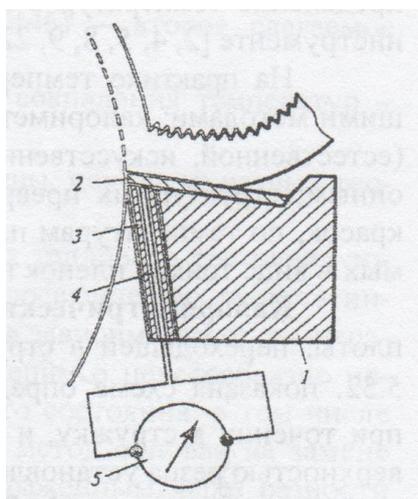


Рис. 9.13. Схема измерения температуры методом искусственной термопары

Бесконтактный метод. Для измерения температуры применяются специальные приборы – пирометры, которые регистрируют тепловое излучение, исходящее от нагретого тела (рис. 9.14 – обозначение на рисунке: 1 – пирометр, 2 – державка резца, 3 – режущая пластина, 4 – заготовка).

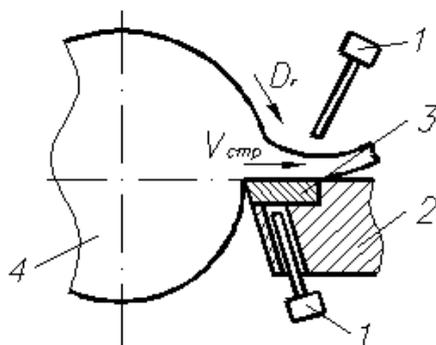


Рис. 9.14. Схема измерения температуры бесконтактным методом

9.4. Влияние различных факторов на температуру резания

Все факторы, увеличивающие силу резания и ухудшающие теплоотвод из зоны обработки, действуют в сторону увеличения температуры резания. Так увеличение твёрдости или прочности обрабатываемого материала приводит к увеличению сил резания и количества теплоты, что вызывает рост температуры (рис. 9.15, а). Наибольшее влияние на температуру резания оказывает скорость резания (рис. 9.15, б). С увеличением скорости резания возрастает общее количество теплоты ($Q = P_z \times V$) и температура растёт.

Увеличение подачи и глубины резания приводит к повышению силы резания P_z и количества теплоты, что ведёт к росту температуры резания (рис. 9.15, в). Больше влияние на температуру оказывает подача, чем глубина резания. Это связано с тем, что при увеличении подачи теплоотвод из зоны резания не изменяется, а при увеличении глубины резания он возрастает, так как увеличивается длина контакта режущего инструмента вдоль режущей кромки с заготовкой.

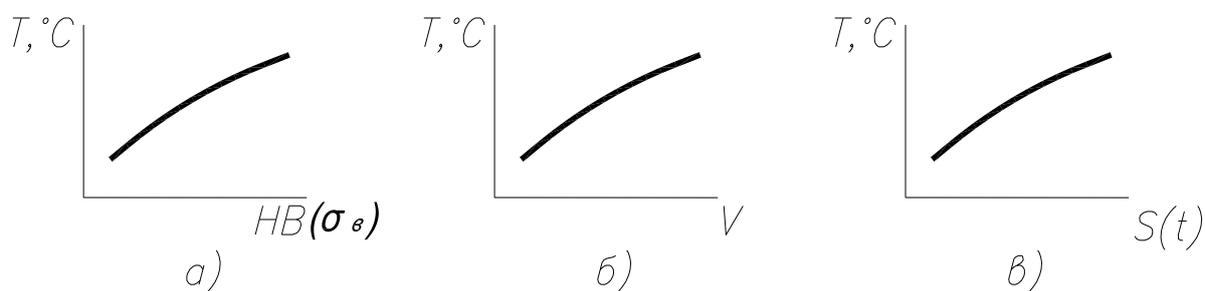


Рис. 9.15. Влияние различных факторов на температуру резания

Из геометрических параметров инструмента на температуру резания оказывают влияние главный угол в плане φ , передний угол γ и главный задний угол α . Увеличение угла φ с одной стороны ведёт к уменьшению сил резания и количества выделившейся теплоты, что должно было бы привести к снижению температуры резания. С другой стороны

увеличение угла φ уменьшает длину контакта режущей кромки с заготовкой, теплоотвод из зоны резания уменьшается и температура резания, несмотря на уменьшение количества теплоты, повышается (рис. 9.16, а).

Влияние углов γ и α на температуру резания более сложное (рис. 9.16, б). Увеличение переднего угла снижает силу резания P_z , соответственно уменьшается количество выделившейся теплоты, и температура резания снижается. Дальнейший рост переднего угла уменьшает массивность режущего клина инструмента, что вызывает снижение теплоотвода в тело инструмента и температура резания начинает увеличиваться. Аналогичное влияние на температуру резания оказывает главный задний угол.

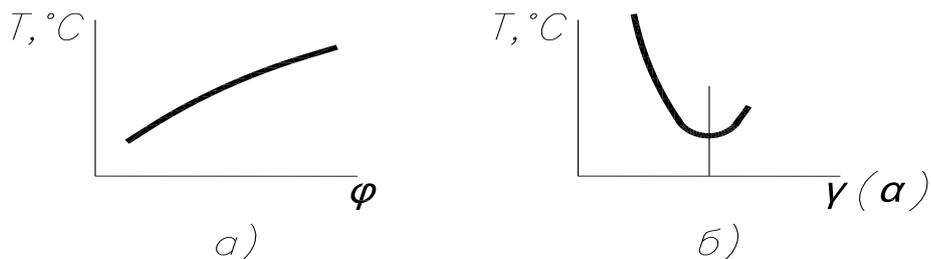


Рис. 9.16. Влияние геометрии инструмента на температуру резания

Влияние инструментального материала на температуру резания проявляется через его фрикционные и теплофизические свойства.

Так увеличение коэффициента теплопроводности инструментального материала $\lambda_{\text{им}}$ увеличивает теплоотвод в тело инструмента и температура резания снижается (рис. 64, а). Уменьшение трения на передней поверхности инструмента, например, при нанесении на нее износостойких покрытий, ведет к снижению теплоты трения, что приводит к уменьшению температуры (рис. 9.17, б – обозначения на рисунке: 1, 2 – соответственно инструмент без покрытия и с покрытием).

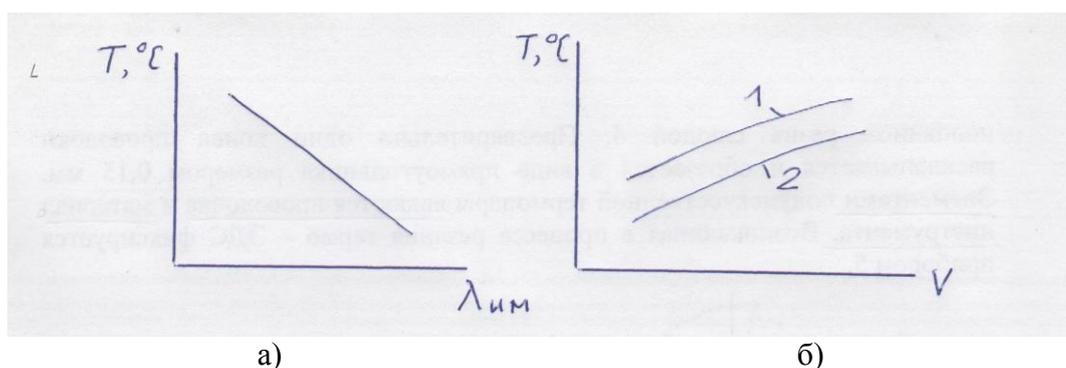


Рис. 9.17. Влияние инструментального материала на температуру резания

Модуль 10. Изнашивание режущего инструмента в процессе резания

10.1. Виды физического изнашивания режущего инструмента

В процессе резания режущий инструмент изнашивается и теряет свою работоспособность. Под работоспособностью режущего инструмента понимается такое его состояние, при котором он выполняет процесс резания с заданными техническими требованиями или условиями (такими требованиями могут быть – требования по точности обработки, по качеству обработанной поверхности, по износу режущего инструмента и т.д.). После затупления инструмент подвергается переточке. Время работы режущего инструмента между двумя его переточками называется периодом стойкости (T), которое измеряется в минутах. Полный период стойкости режущего инструмента определяется по следующей формуле: $\sum T = T \times (n + 1)$, мин, где n – количество переточек.

В зависимости от условий резания режущий инструмент может подвергаться различным видам изнашивания, которые могут протекать одновременно или какой-то из них может преобладать над другими. Различают четыре основных вида изнашивания (износа): абразивное (абразивный износ), адгезионное (адгезионный износ), диффузионное (диффузионный износ) и окислительное (окислительный износ).

Абразивный износ. Механизм данного износа заключается в том, что твердые частицы обрабатываемого материала, внедряясь в контактные площадки режущего инструмента, царапают их, действуя как микрорезцы. Интенсивность данного износа зависит от твердости инструментального материала и увеличивается по мере ее уменьшения. Интенсивность данного вида износа возрастает при увеличении содержания в сталях цементита и сложных карбидов, в чугунах цементита и фосфидов, в жаропрочных сплавах интерметаллидов, которые сохраняют высокую твердость даже при высоких температурах резания. Контактные поверхности инструмента могут также царапать частицы нароста. Данный вид износа проявляется на низких скоростях резания и, особенно при обработке материалов с ярко выраженными абразивными свойствами. Абразивный износ проявляется в большей степени для быстрорежущего инструмента и в меньшей степени для инструмента, оснащенного твердым сплавом, твердость которого значительно выше твердости быстрорежущей стали.

Адгезионный износ. Высокие температуры и нагрузки, действующие на контактных площадках режущего инструмента, способствуют адгезионному взаимодействию материала инструмента и обрабатываемой заготовки. В результате этого на контактных площадках режущего инструмента образуются «мостики схватывания» (рис. 10.1).

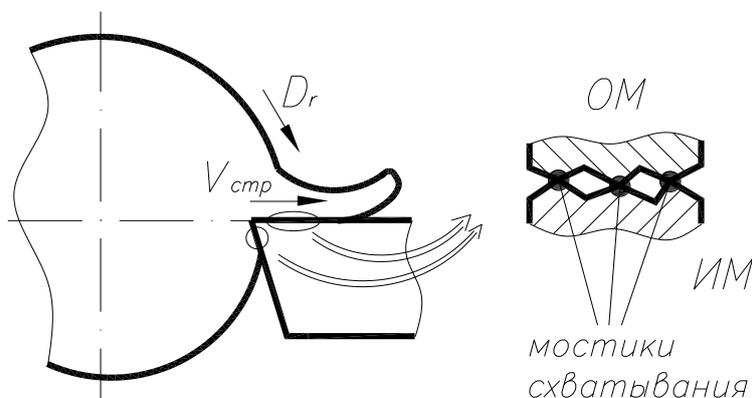


Рис. 10.1. Схема адгезионного износа

При перемещении стружки по передней поверхности и поверхностям заготовки относительно задней поверхности эти «мостики схватывания» разрушаются и образуются вновь. Повторение циклов образования и разрушения «мостиков схватывания» приводит к циклическому нагружению поверхностного объема инструментального материала и вызывает местное усталостное разрушение контактного слоя режущего инструмента, протекающее в виде выкрашивания отдельных частиц инструментального материала. Вырванные с контактных поверхностей частицы инструментального материала уносятся сходящей стружкой и поверхностями заготовки. Данный вид износа зависит от циклической прочности и хрупкости инструментального материала. В зоне невысоких температур резания (низкие скорости резания) твердые сплавы, имеющие более высокую твердость и хрупкость по сравнению с быстрорежущими сталями, хуже сопротивляются циклической нагрузке и поэтому режущий инструмент из твердого сплава в большей степени подвергается данному виду износа, чем инструмент из быстрорежущей стали. При высоких температурах резания хрупкость твердого сплава уменьшается из-за снижения его твердости (рис. 10.2, кривая 1) и сопротивляемость его циклическим нагрузкам возрастает. В результате интенсивность адгезионного износа снижается. Кроме того, снижению адгезионного износа способствует уменьшение прочности «мостиков схватывания» из-за дальнейшего разупрочнения (снижения твердости, рис. 10.2, кривая 4) обрабатываемого материала.

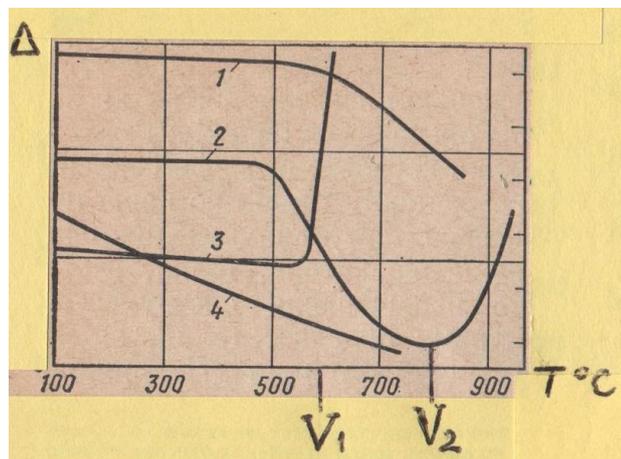


Рис. 10.2. Зависимость относительного износа (Δ) инструмента от температуры ($T^{\circ}\text{C}$) (скорости резания, V): 1 – зависимость твердости твердого сплава от температуры, 2 – твердосплавный инструмент; 3 – быстрорежущий инструмент, 4 – зависимость твердости обрабатываемого материала от температуры

Диффузионный износ. Высокие температуры и нагрузки, действующие на контактных площадках инструмента, высокие деформации прирезцовых слоев стружки (слоев, прилегающих к передней поверхности), схватывание на контактных площадках режущего инструмента приводят к взаимному диффузионному растворению инструментального и обрабатываемого материала, которое сопровождается диффузией отдельных элементов инструментального материала в стружку и обрабатываемый материал и наоборот. В результате процессов диффузии и самодиффузии в контактных слоях режущего инструмента происходят структурные превращения, которые вызывают их разупрочнение и охрупчивание. В результате этого, ослабленные диффузионными процессами, контактные слои режущего инструмента разрушаются и уносятся сходящей стружкой и поверхностью заготовки.

На рис. 10.2 показана зависимость относительного износа режущего инструмента Δ от температуры (скорости резания). Относительный износ режущего инструмента определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{h_3}{L},$$

где h_3 – величина износа режущего инструмента по задней поверхности, (мм), L – путь режущего инструмента, пройденный до данной величины износа, (мм).

При работе быстрорежущего инструмента до температуры порядка 550°C (скорость резания V_1) имеет место адгезионное изнашивание, которое протекает с постоянной скоростью, о чем свидетельствует практически постоянная величина относительного износа. Дальнейшее, даже небольшое повышение температуры вызывает резкий рост относительного износа из-за начала разупрочнения быстрорежущей стали и адгезионный износ переходит в диффузионный (рис. 10.2, кривая 3). Для твердосплавного инструмента зависимость относительного износа от скорости резания носит более сложный характер (рис. 10.2, кривая 2). При обработке до скорости резания V_1 имеет место адгезионное изнашивание инструмента, которое, как и для быстрорежущего инструмента, протекает с постоянной скоростью, о чем свидетельствует постоянная величина относительного износа. Снижение интенсивности адгезионного износа для твердосплавного инструмента после скорости V_1 связано с повышением его пластичности в результате снижения твердости (рис. 10.2, кривая 1) и уменьшением прочности «мостиков схватывания» в результате дальнейшего снижения твердости обрабатываемого материала (рис. 10.2, кривая 4). Все это вместе взятое приводит к увеличению времени работы инструмента до местного усталостного разрушения поверхности твердосплавного инструмента и снижает интенсивность адгезионного износа. При скорости резания V_2 , когда температура равна примерно 800°C , начинается разупрочнение твердого сплава и адгезионный износ переходит в диффузионный. Для инструмента из быстрорежущей стали снижения интенсивности адгезионного износа не происходит, т.к. при температурах около 600°C начинается разупрочнение самой быстрорежущей стали.

Окислительный износ. Окислительным износом называют установившейся стационарный процесс динамического равновесия разрушения и восстановления окисных пленок. При этом скорость окисления превосходит скорости всех других процессов, происходящих на контактных поверхностях инструмента, т. е. окисление является преобладающим. Пленки окислов влияют на интенсивность износа инструмента. В случае образования тонких пленок и достаточно прочных пленок интенсивность износа снижается. При образовании более толстых и рыхлых пленок интенсивность износа резко увеличивается.

10.2. Хрупкое разрушение режущей части инструмента

В процессе резания может происходить хрупкое разрушение режущего инструмента, протекающее в виде выкрашивания режущих кромок и сколов режущей части режущего инструмента.

Выкрашивание представляет собой отделение мелких частиц материала режущей кромки, вызванное наличием на ней различного рода дефектов (микротрещин, микросколов и т.д.).

Сколы представляют собой отделение значительных объемов материала режущей части режущего инструмента, связанное со свойствами обрабатываемого и инструментального материала и толщиной срезаемого слоя.

10.3. Пластическое разрушение режущей части инструмента

При высоких температурах в поверхностных слоях режущего инструмента из быстрорежущей стали может происходить пластическое течение материала инструмента.

Высокие температуры вызывают размягчение контактных слоев быстрорежущего инструмента и под действием нагрузки наступает процесс пластического течения и разрушения задней поверхности (рис. 10.3, а и в).

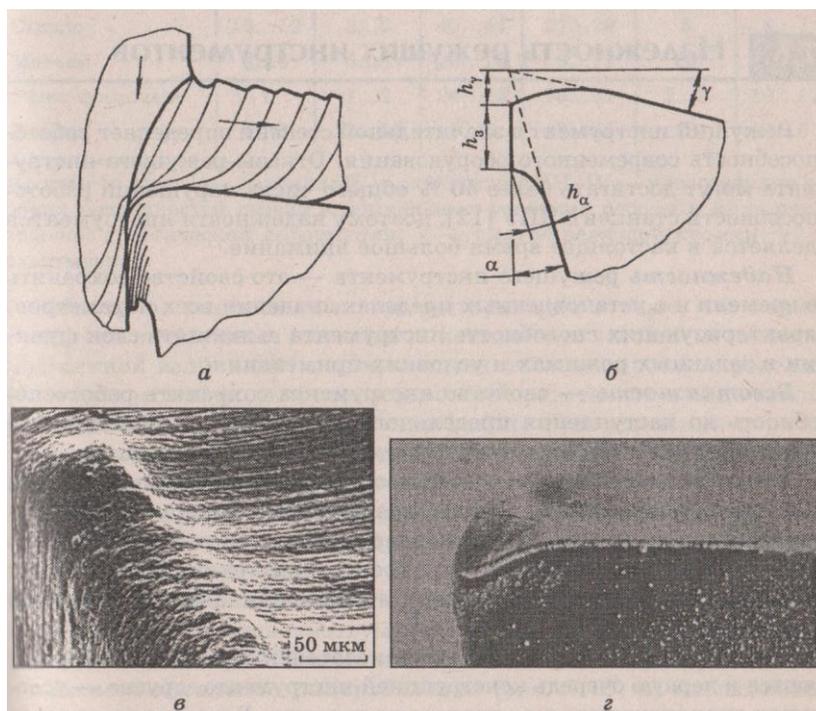


Рис. 10.3. Схемы и внешний вид пластического разрушения контактных площадок режущего инструмента:
а, в – быстрорежущий инструмент, б, г – твердосплавный инструмент

При работе твердосплавного инструмента с большими скоростями и сечениями срезаемого слоя может произойти пластическая деформация режущего клина (рис. 10.3, б и г). В результате происходит опускание вершины режущего клина на величину h_γ и выпучивание материала режущей части по передней и задней поверхности. Это вызывает изменение геометрии режущего клина – задний угол становится равным нулю $\alpha = 0$, а передний угол γ – отрицательным – что интенсифицирует износ режущего инструмента.

10.4. Развитие очагов износа на контактных площадках режущего инструмента

В зависимости от условий резания износ режущего инструмента может происходить: преимущественно по задней поверхности; преимущественно по передней поверхности; равномерно протекать как по передней, так и по задней поверхности (рис. 10.4).

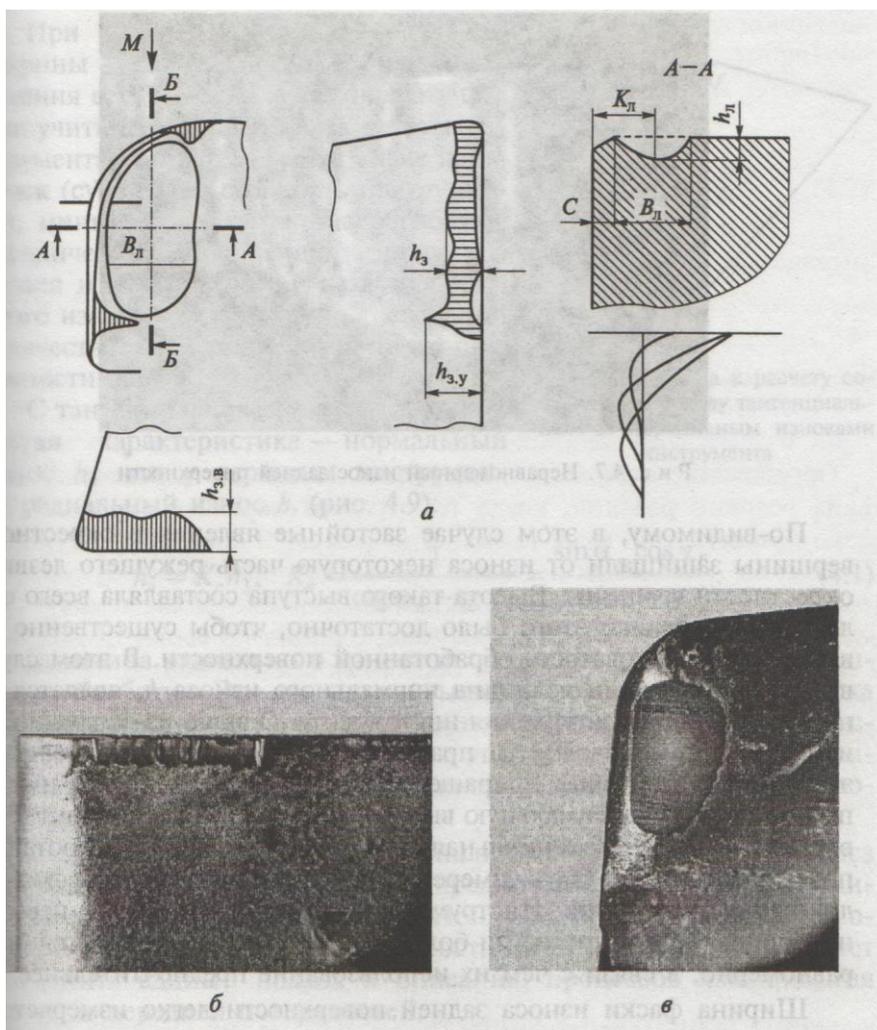


Рис. 10.4. Очаги изнашивания контактных площадок режущего инструмента:
 а – схема износа в виде лунки на передней поверхности и фаски износа на задней поверхности; б – фото фаски износа на задней поверхности;
 в – фото лунки износа на передней поверхности

Износ режущего инструмента преимущественно по задней поверхности (рис. 10.4, а и б, рис. 10.5, а) происходит при работе с малыми толщинами срезаемого слоя ($a < 0,1$ мм), особенно при обработке хрупких материалов. На задней поверхности инструмента образуется фаска износа h_3 . Очертания фаски износа в главной секущей плоскости (рис. 10.5, а) приблизительно копируют форму поверхности резания на заготовке.

Износ режущего инструмента преимущественно по передней поверхности происходит при работе с большими толщинами срезаемого слоя ($a > 0,4$ мм) на высоких скоростях резания, когда тепловой источник на передней поверхности значительно превышает тепловой источник на задней поверхности. Под действием сходящей стружки на передней поверхности образуется лунка износа шириной $b_{л}$ и глубиной $h_{л}$ (рис. 10.5, б). Края лунки располагаются приблизительно параллельно главной режущей кромки инструмента, а длина лунки $l_{л}$ равна рабочей длине режущей кромки.

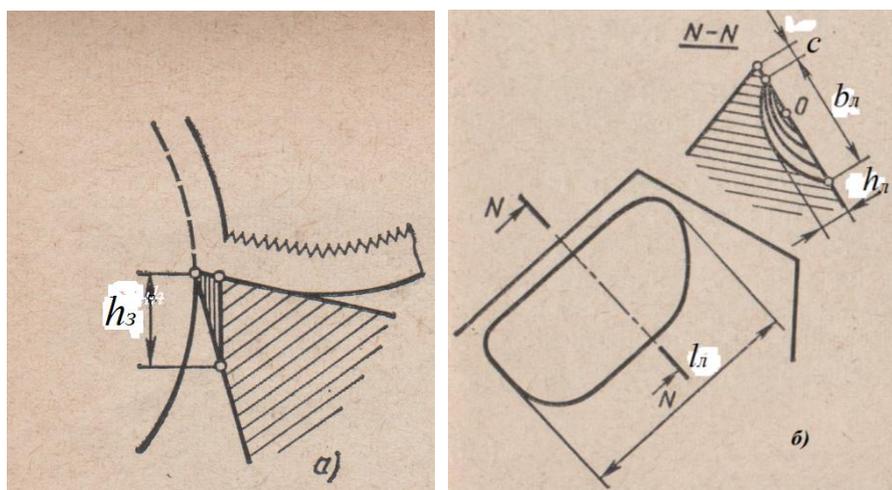


Рис. 10.5. Развитие очагов износа на контактных площадках режущего инструмента:
а – по задней поверхности, б – по передней поверхности

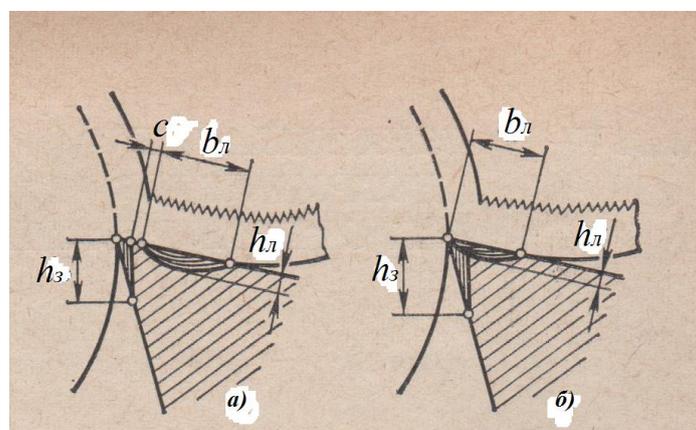


Рис. 10.6. Развитие очагов износа на контактных площадках режущего инструмента:
а – быстрорежущий, б – твердосплавный

Равномерный износ инструмента происходит при его работе с толщинами срезаемого слоя $0,1 \leq a \leq 0,4$ мм. Особенно при обработке материалов, подвергающихся упрочнению.

Рассмотрим схемы износа твердосплавного и быстрорежущего инструмента (рис. 10.6). Как видно из рис. 10.6, а, для инструмента из быстрорежущей стали между краем лунки и режущей кромкой имеется перемычка *С*. Наличие перемычки связано с наростом, предохраняющим часть передней поверхности от износа. По мере увеличения времени работы инструмента размер перемычки уменьшается и в какой-то момент времени прочность ее становится недостаточной и она «прорывается», что сопровождается резким увеличением износа инструмента по задней поверхности. Зависимость величины фаски износа быстрорежущего инструмента h_3 от времени его работы τ представлена на рис. 10.7, а. На данной зависимости можно выделить три участка: участок интенсивного износа или участок приработки – участок № 1, участок нормального износа – участок № 2 и участок катастрофического износа – участок № 3, вызванный «прорывом» перемычки.

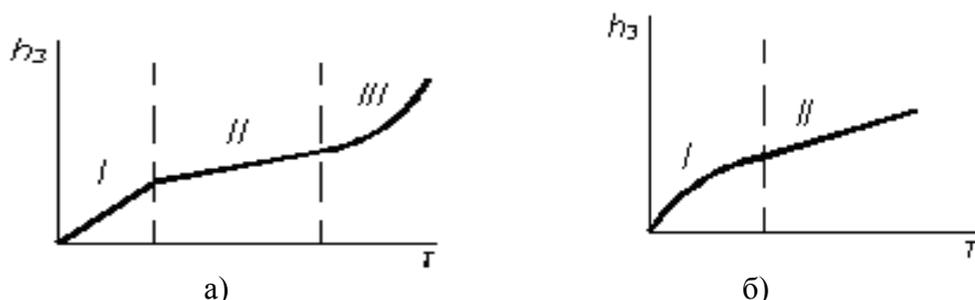


Рис. 10.7. Зависимость фаски износа по задней поверхности (h_3) от времени работы (τ) быстрорежущего (а) и твердосплавного (б) инструментов

Твердосплавные инструменты работают на скоростях резания, при которых нарост не образуется. Поэтому при его износе край лунки сливается с режущей кромкой и перемычка отсутствует (рис. 10.6, б). При этом по мере работы инструмента происходит опускание вершины режущего клина инструмента. На кривой зависимости величины износа по задней поверхности от времени работы твердосплавного инструмента имеется только два участка – участок приработки и участок нормального износа (рис. 10.7, б).

10.5. Критерии износа режущего инструмента

Выбрать критерий износа режущего инструмента – это значит определить время, когда его необходимо отдать на переточку. Используют два основных критерия износа: критерий оптимального износа и критерий технологического износа. В обоих критериях за основу принимают износ по задней поверхности, так как задняя поверхность инструмента изнашивается при любых условиях резания и измерение фаски износа h_3 значительно проще, чем глубины лунки износа по передней поверхности.

Критерий оптимального износа. Инструмент считается затупленным, когда величина износа по задней поверхности достигает значения, равного оптимальному износу. Под оптимальным износом понимается такой, при котором полный период стойкости режущего инструмента получается максимальным. Для определения оптимального износа строится зависимость полного периода стойкости ΣT от изменения величины фаски износа (рис. 10.8). Величина фаски износа по задней поверхности, при которой полный период стойкости будет максимален, и будет оптимальным износом.

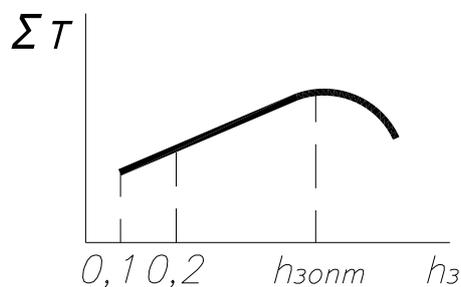


Рис. 10.8. Зависимость полного периода стойкости инструмента от величины износа по задней поверхности

Критерий технологического износа. Данный критерий используется для режущего инструмента, предназначенного для чистовой (окончательной) обработки. Режущий инструмент считается затупленным, когда обработанная поверхность заготовки перестает отвечать технологическим требованиям, заданным на ее изготовление. К ним относятся требования по шероховатости и точности. Для определения величины износа по задней поверхности, соответствующего критерию технологического износа, строится зависимость параметра шероховатости обработанной поверхности R_a от времени работы инструмента (рис. 10.9). При этом задаются величиной R_a , при превышении значения которой инструмент отдают на переточку (например, по рис. 73 при величине R_a , равной 3,2 мкм). Величина фаски износа по задней поверхности, соответствующая времени работы инструмента до заданного параметра шероховатости, и будет соответствовать критерию технологического износа.

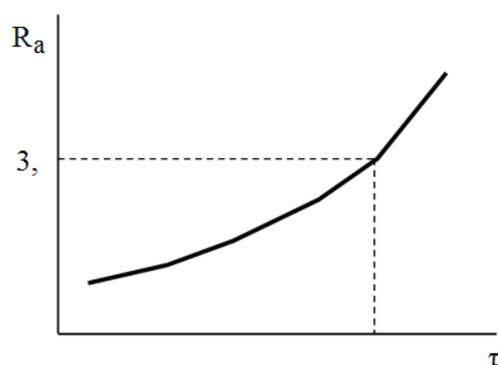


Рис. 10.9. Зависимость высоты микронеровностей R_a от времени работы режущего инструмента

10.6. Влияние различных факторов на износ и стойкость режущего инструмента

Все факторы, действующие в сторону увеличения температуры резания, увеличивают износ инструмента и снижают период стойкости режущего инструмента.

Для инструмента из быстрорежущей стали повышение скорости резания вызывает монотонное снижение периода стойкости (рис. 10.10, а, кривая 2). Это объясняется тем, что увеличение скорости резания ведет к росту интенсивности износа (рис. 10.10, б, кривая 2).

Для инструмента из твердого сплава зависимость между скоростью резания и периодом стойкости имеет более сложный характер (рис. 10.10, а, кривая 1). Период стойкости с увеличением скорости резания сначала уменьшается, затем увеличивается и вновь снижается. Наличие перегибов на данной зависимости связано с изменением интенсивности адгезионного износа (минимум периода стойкости на кривой $T=f(V)$) и переходом адгезионного износа в диффузионный (максимум периода стойкости на кривой $T=f(V)$).

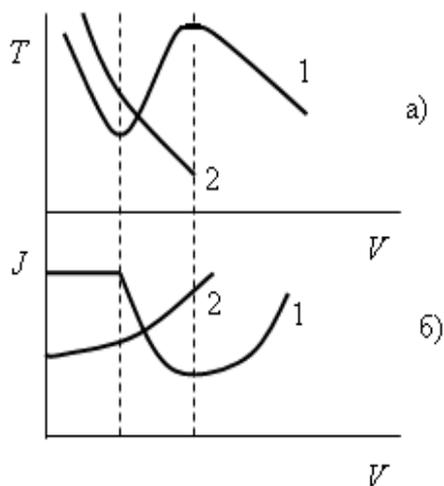


Рис. 10.10. Влияние скорости резания на период стойкости (а) и интенсивность износа (б) режущего инструмента:
 1 – твердосплавный инструмент, 2 – быстрорежущий инструмент

Увеличение подачи и глубины резания повышает силы резания и количество образующейся теплоты, что ведет к росту температуры резания, увеличению износа инструмента и уменьшению его периода стойкости (рис. 10.11, а).

Из геометрических параметров на износ и стойкость режущего инструмента влияют передний угол, главный задний угол и главный угол в плане. Увеличение переднего угла снижает силы резания, количество теплоты и температуру резания.

В результате износ инструмента снижается, а период стойкости возрастает. При дальнейшем росте угла γ массивность режущего клина снижается, что ведет к росту температуры резания, увеличению износа и снижению периода стойкости инструмента (рис. 10.11, б). Влияние главного заднего угла α на величину износа и период стойкости инструмента аналогично влиянию переднего угла.

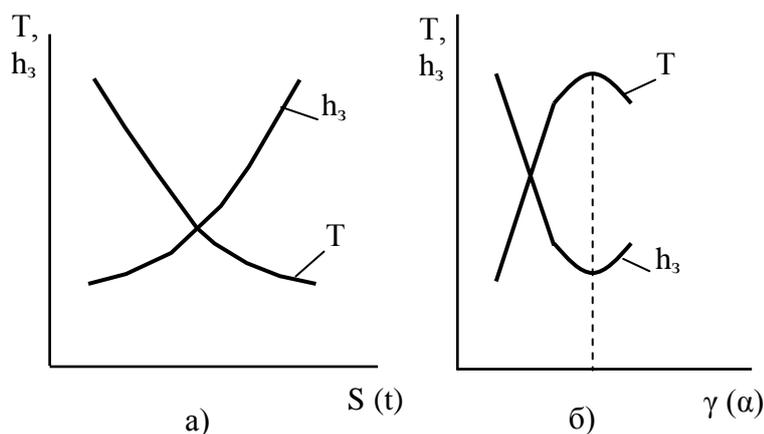


Рис. 10.11. Влияние различных факторов на износ (h_3) и период стойкости (T) инструмента

Увеличение главного угла в плане ϕ вызывает рост температуры резания. Это в свою очередь увеличивает износ инструмента и снижает его период стойкости (рис. 10.12, а).

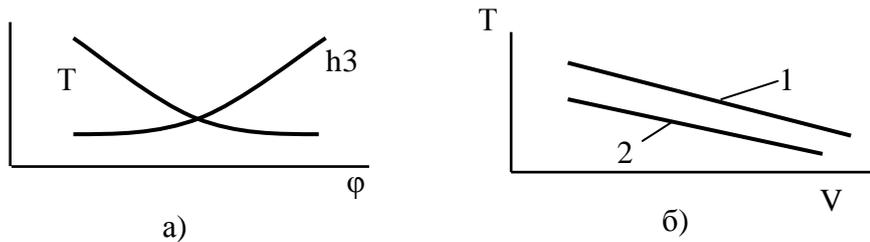


Рис. 10.12. Влияние главного угла в плане φ (а) и инструментального материала (б) на период стойкости инструмента

Влияние инструментального материала на период стойкости инструмента проявляется через его фрикционные и теплофизические свойства. Так, например, нанесение износостойких покрытий приводит к снижению коэффициента трения на передней поверхности, что вызывает уменьшение источника теплоты трения на передней поверхности и в конечном итоге увеличивает период стойкости инструмента (рис. 10.12, б: кривая 1 – инструмент с покрытием, кривая 2 – инструмент без покрытия).

Модуль 11. Скорость резания, допускаемая режущими свойствами режущего инструмента

11.1. Понятие допускаемой скорости резания

Скорость резания, допускаемая режущими свойствами инструмента ($V_{\text{доп}}$), это скорость, которая выбирается исходя из режущих свойств инструмента для обеспечения заданного периода стойкости при принятом критерии износа.

Допускаемая скорость резания определяется по формуле:

$$V_{\text{доп}} = \frac{C_v}{T^m \cdot f^{x_v} \cdot s^{y_v}} \cdot K_v,$$

где C_v – коэффициент, зависящий от свойств инструментального и обрабатываемого материалов и условий обработки, T – период стойкости инструмента, m – показатель относительной стойкости, x_v , y_v – показатели степени влияния соответственно глубины резания и подачи на допускаемую скорость, K_v – поправочный коэффициент на измененные условия резания.

11.2. Влияние различных факторов на допускаемую скорость резания

Рассмотрим влияние различных факторов на допускаемую скорость резания. Независимо от вида механической обработки все факторы, повышающие температуру резания и износ инструмента, будут вызывать снижение допускаемой скорости резания. Влияние обрабатываемого и инструментального материала на скорость $V_{\text{доп}}$ проявляется через их механические и теплофизические свойства. Так повышение прочности и твердости обрабатываемого материала заставляет снижать допускаемую скорость, а повышение коэффициента теплопроводности наоборот позволяет ее повысить. Применение инструментального материала, обеспечивающего меньший коэффициент трения на контактных площадках инструмента, также позволит повысить допускаемую скорость резания. С ростом подачи и глубины резания увеличивается количество выделяемой при резании теплоты, что вызывает повышение износа инструмента, и допускаемая скорость резания будет уменьшаться. Влияние переднего угла, главного заднего угла и главного угла в плане на допускаемую скорость резания аналогично их влиянию на износ инструмента. Так с увеличением угла γ уменьшаются силы резания и количество, образующейся теплоты при резании, что позволяет повысить допускаемую скорость, дальнейший рост переднего угла ведет к повышению температуры из-за ухудшения теплоотвода в тело инструмента и допускаемую скорость следует снижать. Повышение главного угла в плане вызывает рост температуры резания и, следовательно, допускаемая скорость резания должна уменьшаться.

Применение смазывающей охлаждающей жидкости повышает период стойкости инструмента, следовательно, скорость $V_{\text{доп}}$ можно увеличить.

На допускаемую скорость резания оказывает влияние вид токарной обработки (рис. 11.1). Условия работы отрезного резца (резец № 1) и расточного (резец № 3) с точки зрения тепловой напряженности хуже, чем проходного резца (резец № 2). Поэтому значение допускаемой скорости для них должно быть меньше. Условия работы подрезного резца (резец № 4) по сравнению с проходным резцом лучше, поэтому допускаемую скорость резания для него будет выше.

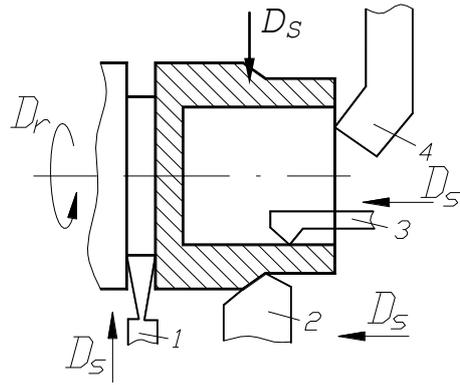


Рис. 11.1. Влияние вида токарной обработки на запускаемую скорость резания

Модуль 12. Особенности процесса резания при шлифовании

12.1. Строение шлифовального круга и абразивные зерна, участвующие в процессе резания

Шлифование относится к абразивной обработке и занимает важное место в современном машиностроении.

Шлифование это процесс снятия стружки с помощью шлифовального круга состоящего из абразивных зерен, связки и пор (рис. 12.1).

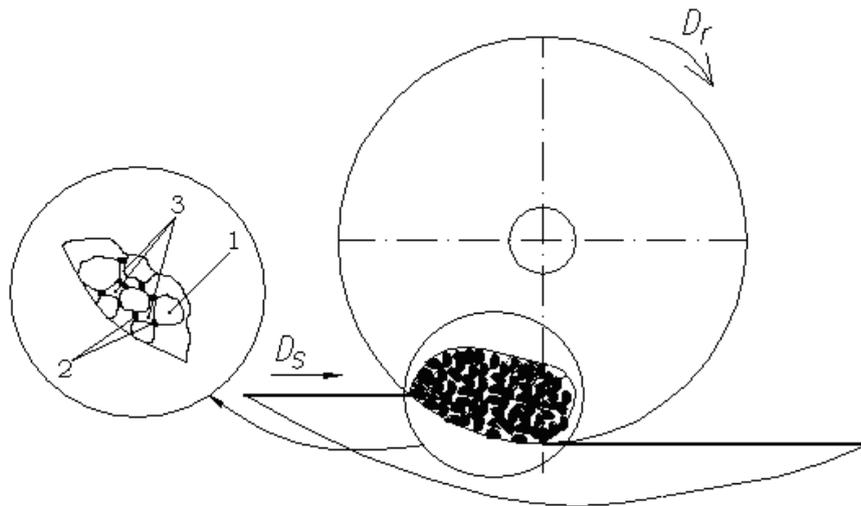


Рис. 12.1. Схема резания при шлифовании и строение шлифовального круга:
1 — абразивное зерно; 2 — связка; 3 — поры

Особенности процесса шлифования:

1. Абразивные зерна имеют неправильную форму, и расположение их в круге вызывает отрицательные и непостоянные по величине передние углы (рис. 12.2).
2. Беспорядочное расположение абразивных зерен в шлифовальном круге.
3. В процессе резания шлифовальный круг может самозатачиваться, т.е. под действием сил резания абразивные зерна раскалываются или выкрашиваются, обнажая новые острые режущие кромки.
4. Время контакта абразивного зерна с заготовкой очень мало и составляет $10^{-4} - 10^{-5}$ сек.
5. Из-за наличия радиуса округления вершины абразивного зерна и малой толщины срезаемого слоя до момента срезания стружки происходит интенсивное трение зерен о поверхность резания. Следовательно, абразивные зерна снимают стружку с материала не с исходными свойствами, а упрочненного вследствие контакта с предыдущими зернами.

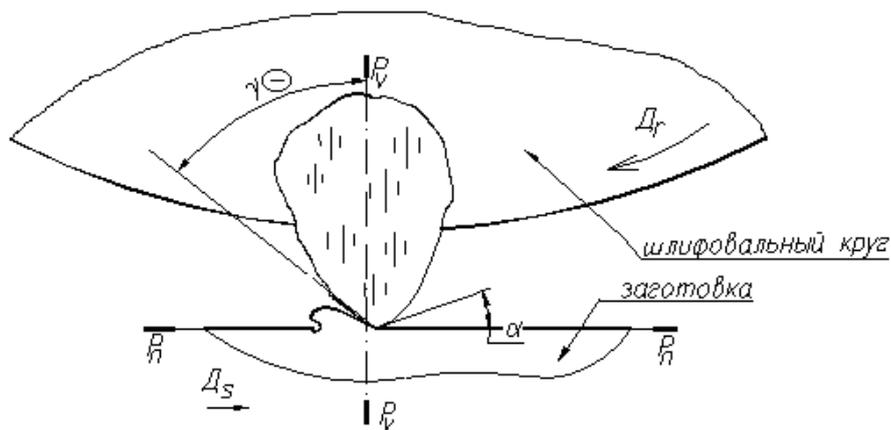


Рис. 12.2. Геометрические параметры абразивного зерна

Процесс шлифования осуществляется большим количеством абразивных зерен, одновременно участвующих в процессе резания-царапания. Все зерна, участвующие в процессе резания, делятся на режущие, давящие и не режущие (рис. 12.3).

Часть зерен, врезаясь в металл, снимает стружку, другие из-за малой глубины резания осуществляют только пластическое оттеснение, а третья часть зерен, имеющих еще меньшую глубину врезания, производят лишь упругопластическую деформацию обрабатываемой поверхности. Установлено, что 85 – 90% абразивных зерен не режет, а лишь пластически деформирует очень тонкий поверхностный слой и большая часть энергии затрачивается на пластическую деформацию и упрочнение (наклепывание) поверхности.

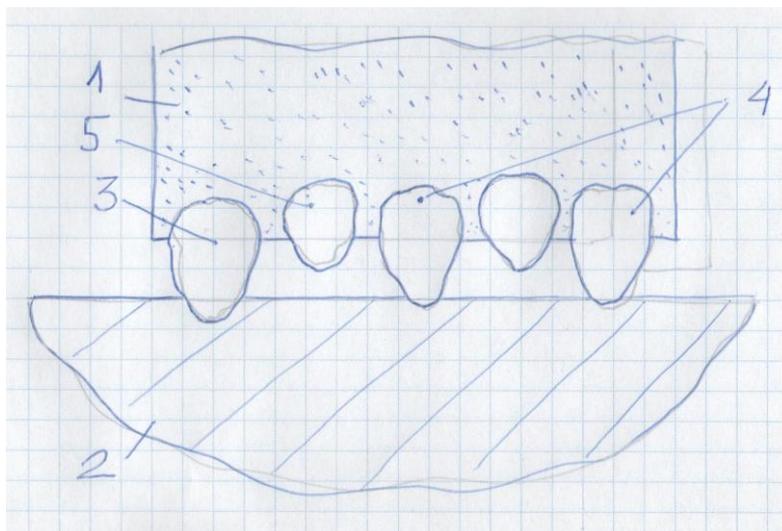


Рис. 12.3. Зерна шлифовального круга участвующие в резании:

- 1 – шлифовальный круг, 2 – заготовка, 3 – режущее зерно,
4 – давящее зерно, 5 – не режущее зерно

На эффективность шлифования большое влияние оказывает толщина срезаемого слоя и площадь среза, определяемая площадью контакта шлифовального круга с заготовкой. Они определяют величину нагрузки на абразивные зерна, что в конечном итоге определяет силы резания, период стойкости круга и качество поверхностного слоя.

12.2. Силы резания, тепловой баланс и износ шлифовальных кругов

Равнодействующую силу при шлифовании, как и при точении, можно разбить на три составляющие P_z (касательная составляющая – определяет мощность резания), P_y (радиальная составляющая – оказывает влияние на точность обработки и виброустойчивость процесса резания) и P_x (осевая составляющая – определяет мощность привода подачи) (рис. 12.4).

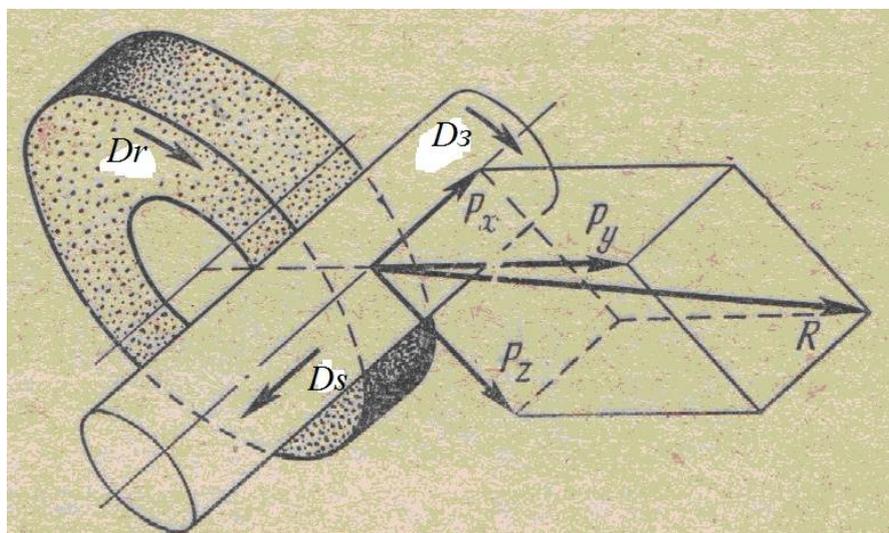


Рис. 12.4. Силы резания при наружном круглом шлифовании

Значительные радиусы округления абразивных зерен, большие отрицательные передние углы и малые толщины среза являются причиной того, что сила P_y в 1,5 – 3 раза больше силы P_z .

Поверхностный слой на заготовке при шлифовании формируется на заключительной стадии шлифования – выхаживании (обработки при отсутствии поперечной подачи). При выхаживании количество режущих абразивных зерен уменьшается, а количество давящих зерен увеличивается. Это приводит к интенсивному абразивному наклепу поверхности, что сопровождается повышением ее микротвердости на 15 – 20%.

Тепловой баланс при шлифовании отличается по сравнению с лезвийной обработкой. Образующее тепло частично (3 – 5%) уходит со стружкой, небольшая часть (9 – 13%) уходит в шлифовальный круг и основная часть (до 84%) уходит в заготовку. Большое количество теплоты, поступающей в заготовку, может привести к структурным превращениям в поверхностном слое и вызвать «прижоги».

В зависимости от условий шлифования круг может работать как в режиме затупления, так и в режиме замозатачивания. Под замозатачиванием понимается способность круга обновлять свою рабочую поверхность под воздействием сил резания. Основными видами износа круга являются: истирание вершин абразивных зерен; раскалывание и выкрашивание зерен – износ замозатачиванием; истирание связки; вырывание абразивных зерен; забивание пространства между зернами частицами обрабатываемого материала – засаливание круга. В зависимости от условий резания могут происходить все виды износа или один вид является преобладающим.