друга. Поэтому окончательное значение постоянной в формуле принимается как среднее арифметическое двух полученных значений:

$$C_{p_z} = \frac{C_{p_z}^{I} + C_{p_z}^{II}}{2}.$$

Недостатком изложенного графического метода является субъективность в проведении аппроксимирующей прямой, наиболее соответствующей нанесенным на график опытным точкам. Этот недостаток устраняется при применении аналитической аппроксимации, основанной на методе наименьших квадратов.

Следует особо отметить, что, несмотря на широкое распространение в теории резания степенных зависимостей, всякий раз к их употреблению надо подходить с большой осторожностью, так как они могут применяться только в том диапазоне изменения факторов, где они были получены, и по существу своему они не могут отразить всеобщей связи и взаимозависимости явлений.

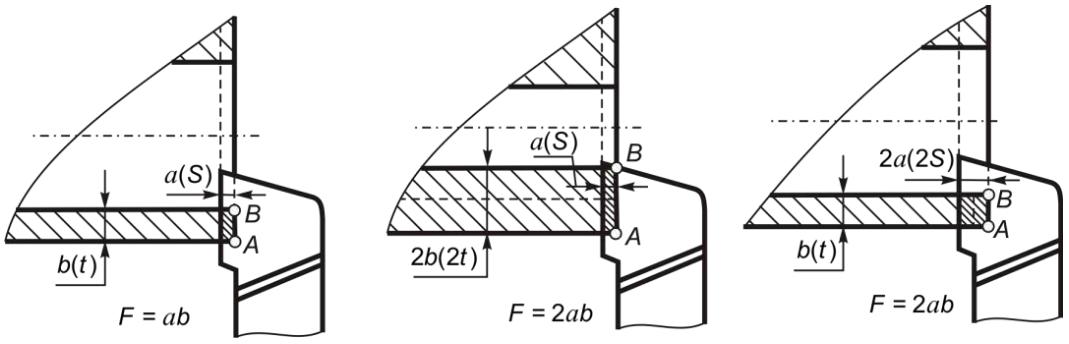
Лекция 2. Закономерности влияния условий резания на его силу и мощность

Поскольку для острого инструмента величина участка контакта по передней поверхности намного больше, чем по задней, то основной вклад в величину общей силы резания вносят силы, действующие на передней поверхности.

Влияние глубины резания и подачи. При увеличении t и S (или b и a) пропорционально возрастает площадь поперечного сечения срезаемого слоя, а, значит, и нагрузка на переднюю поверхность, однако влияние этих факторов на коэффициент усадки разный. Изменение t (или b) практически не влияет на коэффициент усадки, потому что в зону резания вводятся лишь новые участки режущей кромки с аналогичными условиями резания (рис. 4.10 *б*). Следовательно, во столько же раз увеличивается нагрузка на резец, вызываемая силами, действующими на переднюю и заднюю поверхности инструмента.

Увеличение же S или толщины срезаемого слоя a (рис. 4.10 *в*) при такой же ширине b приводит к уменьшению степени пластической деформации. Одновременно силы на задней поверхности остаются неиз-

менными. Поэтому результирующее влияние глубины резания на силу больше, чем подачи (рис. 4.11).



а *б* *в*

Рисунок 4.10 – К определению влияния *a* и *b* на силу резания:
а – ширина срезаемого слоя *b*, толщина срезаемого слоя *a*;
б – ширина срезаемого слоя 2*b*, толщина срезаемого слоя *a*;
в – ширина срезаемого слоя *b*, толщина срезаемого слоя 2*a*

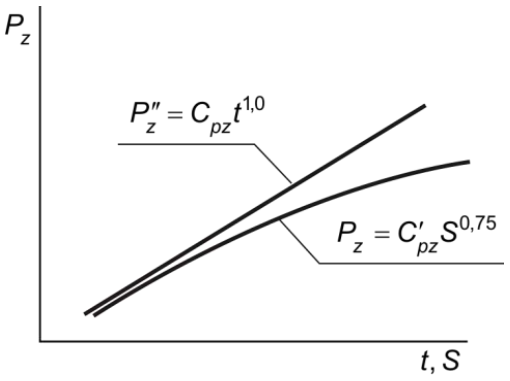


Рисунок 4.11 – Влияние изменения глубины резания *t* (*b*) и подачи *S* (*a*) на силу резания

Влияние скорости резания. Ранее считалось, что скорость резания практически не влияет на силу. Объясняется это проведением опытов в сравнительно узком диапазоне скоростей, а также недостаточной чувствительностью используемых при этом динамометров. В настоящее время известно, что в более широком диапазоне скоростей резания это влияние проявляется через изменение коэффициента усадки стружки, который, как правило, уменьшается с ростом скорости, за исключением зоны наростообразования. Поэтому зависимость $P_z - V$ будет разной для материалов склонных (рис. 4.12) и не склонных (рис. 4.13) к наростообразованию. Для первых минимальные значения силы на кривых $P_z = f(V)$ соответствуют максимально возможному наросту.

Резание на высоких скоростях приводит к значительному повышению температуры резания, исчезновению нароста, в результате чего уменьшается коэффициент трения, коэффициент усадки, а, следовательно, и P_z. Аналогично выглядят зависимости $P_z = f(V)$ для материалов, не склонных к наростообразованию – меди, жаропрочных и нержавеющих

сталей и сплавов, титановых сплавов (см. рис. 4.13). Все сказанное относится и к изменению силы P_x.

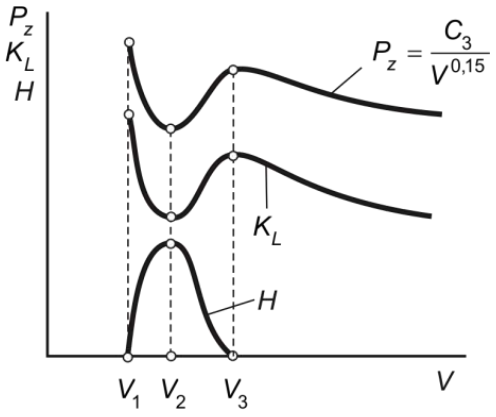


Рис. 4.12 – Влияние скорости резания на высоту нароста, коэффициент усадки и силу резания для материалов, склонных к наростообразованию

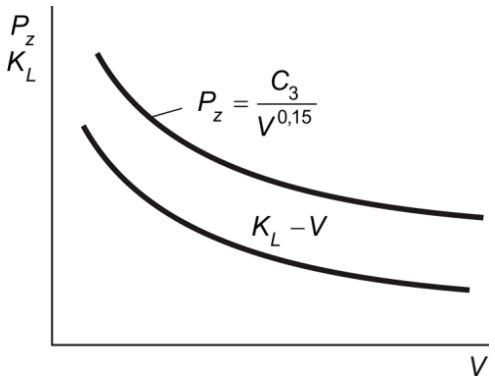


Рис. 4.13 – Влияние скорости резания на силу резания для материалов, не склонных к наростообразованию

Влияние угла в плане инструмента. Главный угол в плане инструмента изменяет соотношение между шириной и толщиной срезаемого слоя b/a и положение режущей кромки относительно направления движения подачи. Поэтому для свободного резания или, если радиус вершины инструмента равен нулю, из-за более сильного влияния на силу резания $b(t)$, чем $a(S)$, с увеличением φ сила резания падает. Это хорошо подтверждается экспериментом при резании любых пластичных материалов (рис. 4.14, кривые *2* и *3*).

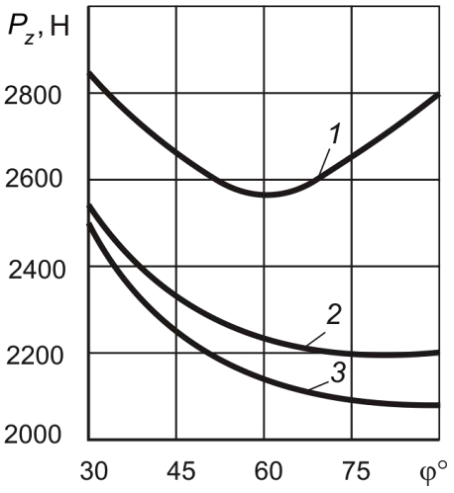


Рисунок 4.14 – Влияние главного угла в плане φ на силу P_z при точении (сталь; t = 2 мм; S = 0,48 мм/об): *1* – несвободное точение резцом с r = 2 мм при V = 40 м/мин; *2* – несвободное точение резцом с r = 0 при V = 40 м/мин; *3* – свободное точение при V = 40 м/мин

Увеличение радиуса r кривизны вершины лезвия вызывает уменьшение переходных углов в плане в различных точках вершины лезвия. Кроме того, увеличение длины переходного лезвия ухудшает условия стружкообразования у вершины резца. Вследствие этого силы P_z и P_y при уве-

личении радиуса r возрастают, а сила P_x уменьшается.

При расчете составляющих силы резания влияние радиуса r учитывают поправочным коэффициентом – k_r, отдельным для каждой составляющей.

Влияние переднего и заднего углов инструмента. В любом случае уменьшения переднего угла всегда вызывает рост степени деформации стружки (коэффициента усадки), а, значит, и силы резания. И из всех составляющих наиболее сильный рост наблюдается у силы P_x.

При расчете составляющих силы резания влияние переднего угла учитывают поправочным коэффициентом – k_γ, отдельным для каждой составляющей.

Задняя поверхность инструмента в стружкообразовании непосредственно не участвует. Следовательно, влияние заднего угла на составляющие силы резания может проявляться только через изменение сил, действующих на задней поверхности. Эксперименты показывают, что если задний угол резца больше 8–10°, то составляющие силы резания от величины заднего угла не зависят. При меньших углах уменьшение заднего угла вызывает незначительное возрастание сил P_z, P_x и особенно – P_y, которая отталкивает инструмент от обработанной поверхности.

Угол наклона главной режущей кромки λ изменяет направление схода стружки, увеличивает рабочую длину главной кромки и, вне зависимости от знака угла λ, приводит к дополнительной поперечной деформации стружки вдоль режущей кромки, увеличивая тем самым ее общую степень деформации. На главную составляющую силы резания изменение угла λ влияет сравнительно мало: увеличение отрицательного угла λ практически не сказывается на изменении силы P_z; при увеличении положительного угла λ сила P_z несколько возрастает, при λ >30° (вследствие увеличения степени деформации срезаемого слоя). Так как у большинства токарных резцов изменение угла λ не выходит за пределы ±10°, то его влиянием на силу P_z можно пренебречь. На силы P_y и P_x угол λ влияет значительно сильнее. При переходе от отрицательных углов λ к положительным через изменение угла направления схода стружки сила отталкивания P_y возрастает, а сила подачи P_x – уменьшается.

При расчете составляющих силы резания влияние угла λ учитывают поправочным коэффициентом – k_λ, отдельным для каждой составляющей.

Влияние свойств обрабатываемого и инструментального материалов. С одной стороны увеличение прочности обрабатываемого материала уменьшает коэффициент усадки, а, значит, средние напряжения на передней поверхности. Но с другой – увеличиваются сдвиговые напряжения в плоскости сдвига, которые вызывают рост средних напряжений на передней поверхности и силы стружкообразования. В зависимости от того, какой фактор является преобладающим, силы P_z, P_y и P_x могут при увеличении прочности обрабатываемого материала как возрастать, так и уменьшаться.

Влияние обрабатываемого материала на величину составляющих силы резания учитывают поправочным коэффициентом – $k_м$.

Инструментальный материал влияет через изменение коэффициента внешнего трения на передней и задней поверхностях, а также через теплопроводность и адгезионную способность поверхности инструмента к материалу заготовки. Последний фактор изменяет длину контактного участка трения на передней поверхности, перераспределяя на нем нормальные и касательные напряжения. Поэтому силы резания при обработке алмазным резцом всегда меньше (при других равных условиях), чем резцом из быстрорежущей стали, которая имеет больший коэффициент трения и адгезионную способность к обрабатываемому материалу. Этим же фактом объясняется снижение сил при резании инструментами с покрытиями.

Влияние СОТС. Смазочно-охлаждающие вещества совершают двоякое воздействие на процесс резания. С одной стороны они уменьшают коэффициент внешнего трения, а также, проникая в зону контакта, уменьшают силы адгезионного схватывания с заторможенным слоем, укорачивая его и общую длину контакта. С другой стороны, охлаждающее действие СОТС приводит к снижению температуры резания и увеличению предела прочности на сдвиг материала стружки в зоне вторичной пластической деформации. Как правило, первое действие преобладает, поэтому использование СОТС уменьшает силы резания. При этом в большей степени снижаются горизонтальные составляющие P_y и P_x. Например, применение масляной жидкости снижает силу P_z на 20%, а P_y и P_x – на 30–40%.

Влияние СОТС на снижение сил резания учитывают поправочным коэффициентом – $k_ω$, отдельным для каждой составляющей.

Увеличение износа инструмента (рост площадки износа по задней поверхности) приводит к повышению силы резания, особенно ее горизонтальных составляющих P_y и P_x.

Это влияние при расчете силы резания учитывают поправочным коэффициентом – k_h отдельным для каждой составляющей.

Обобщенные эмпирические формулы для расчета составляющих силы резания. Практика применения обобщенных эмпирических формул показала, что параметры режима резания *t, s* и *V* наиболее удобно учитывать непосредственно, а остальные – косвенно, через обобщенный поправочный силовой коэффициент – k_p.

Например, для точения обобщенная эмпирическая формула при расчете составляющей силы резания P_z, Н, будет иметь вид:

$$P_z = 9{,}8C_{P_z} t^{xP_z} S^{yP_z} V^{zP_z} k_{P_z},$$

где $9{,}8C_{P_z}$ – коэффициент, учитывающий влияние на силу P_z различных условий в диапазоне изменения режимов резания *t*, *S* и *V*, когда $k_{P_z}=1$ (число 9,8 вводится для перевода табличных значения в справочниках из кГс в Н); x_{P_z}, y_{P_z}, z_{P_z} – показатели степеней, определяющие влияния режимов резания *t*, *S* и *V* на изменение силы P_z; k_{P_z} – обобщенный поправочный силовой коэффициент, который определяется зависимостью:

$$k_{pz} = k_{мP} k_{\varphi P_z} k_{\gamma P_z} k_{\lambda P_z} k_{rP_z},$$

где произведение силовых поправочных коэффициентов учитывает влияние на силу резания: $k_{мP}$ – обрабатываемого материала; $k_{\varphi P_z}$ – главного угла в плане; $k_{\gamma P_z}$ – переднего угла; $k_{\lambda P_z}$ – угла наклона главной режущей кромки; k_{rP_z} – радиуса закругления вершины инструмента и других факторов.

Все коэффициенты и показатели степеней находятся по таблицам из справочников или определяются экспериментально. Формулы для определения сил P_y и P_x имеют аналогичный вид.

Существенным недостатком всех эмпирических формул является то, что они не учитывают взаимосвязи влияния различных факторов на составляющие силы резания.

Мощность, затрачиваемая при резании. Для того чтобы подсчитать эффективную мощность, расходуемую на резание, необходимо сложить мощности на преодоление каждой силы P_z, P_y и P_x, т. е.:

$$N_{\text{рез}} = N_{P_z} + N_{P_y} + N_{P_x}.$$

Так как мощность есть произведение силы на скорость перемещения в направлении ее действия, то, вводя соответствующие переводные коэффициенты, получим, кВт:

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z V}{60 \cdot 1000} + \frac{P_y V_y}{60 \cdot 1000} + \frac{P_x S n}{60 \cdot 1000 \cdot 1000}.$$

По определению, никаких перемещений в направлении действия силы P_y или в обратном ему нет, т. е. $V_y = 0$, а, следовательно, равно нулю и второе слагаемое. Третье слагаемое, представляющее собой мощность, затрачиваемую на движение подачи, достаточно мало (1–2 % от N_{P_z}), и им можно пренебречь. Тогда, кВт:

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z V}{60 \cdot 1000}.$$

Для реализации процесса резания на заданном станке необходимо, чтобы мощность электродвигателя станка $N_{\text{э.д}}$ была больше (или, в крайнем случае, равна) расчетной мощности резания, с учетом КПД коробки скоростей станка $\eta \approx 0{,}8...0{,}85$:

$$N_{\text{э.д}} \geq \frac{N_{\text{рез}}}{\eta}.$$

Действие сил резания на резец. Сила P_z изгибает резец в вертикальной плоскости, сила P_y стремится оттолкнуть резец от заготовки, а сила P_x стремится изогнуть резец в горизонтальной плоскости и вывернуть его из резцедержателя (см. рис. 4.4).

Очевидно, что чем больше вылет резца l, тем больше будет изгибающий момент $M_{\text{изг}} = P_z l$, тем, следовательно, большим должно быть сечение державки резца. Во избежание смещения резца под действием сил P_y и P_x он должен быть прочно закреплен в резцедержателе.

Напряжения, вызванные в державке силами P_z, P_y и P_x, не должны превышать напряжений, допускаемых материалом державки по его проч-

ности и жесткости. Наряду с напряжениями в державке резца сила P_z создает большие напряжения в режущей части инструмента – в пластинке. В зависимости от значения переднего угла пластинка может испытывать деформации изгиба и среза или деформации сжатия. Для каждого резца сила P_z должна быть не больше определенной величины, иначе напряжения, вызванные этой силой, достигнут предела прочности пластинки, и она разрушится. Это особенно важно для резцов из твердого сплава, минералокерамических, алмазов и композитов (вследствие их большей хрупкости).

Действие сил резания на заготовку. На заготовку действуют такие же силы P_z', P_y' и P_x', но противоположные по направлению силам, действующим на резец (рис. 4.15).

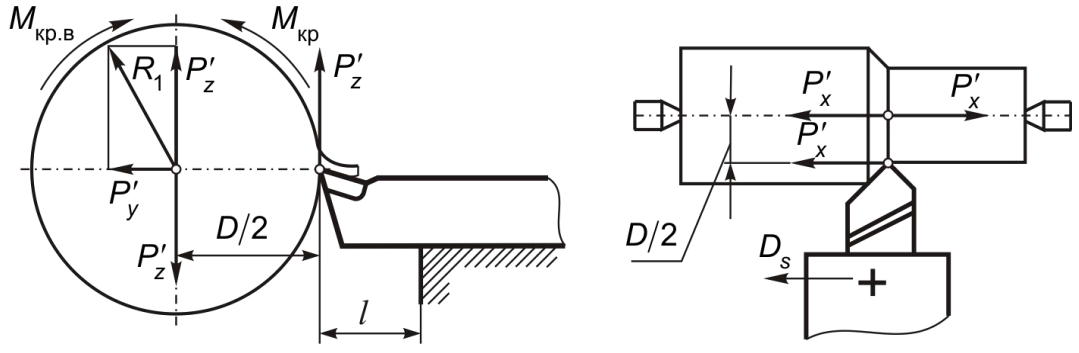
Перенося в центр обрабатываемой заготовки две равные и противоположно направленные силы P_z', видим, что создается пара сил и крутящий момент сопротивления резанию:

$$M_{\text{кр}} = \frac{P_z' D}{2}.$$

Кроме скручивания заготовки действием силы P_z создается момент, изгибающий заготовку в вертикальной плоскости. Для резания необходимо, чтобы крутящий момент станка на выбранной ступени числа оборотов был бы больше или, в крайнем случае, равен крутящему моменту сопротивления резанию: $M_{\text{кр.ст}} \geq M_{\text{кр}}$.

Крутящий момент, Нм, можно определить через мощность резания $N_{\text{рез}}$ и число оборотов шпинделя станка – n:

$$M_{\text{кр}} = 9750 \frac{N_{\text{рез}}}{n}.$$



а *б*

Рисунок 4.15 – Схема действия сил P_z', P_y' и P_x', на заготовку

Тема 5
ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

Лекция 1. Источники выделения теплоты и ее баланс при резании материалов

Источником выделения теплоты при снятии стружки есть механическая работа, затраченная на ее срезание. Как установлено исследованиями, до 99,5 % механической работы преобразуется в тепло и лишь 0,5 % уходит на преобразование кристаллической структуры обрабатываемого материала. Механическая работа, а, значит, выделение тепла, происходит в зоне первичной пластической деформации, зонах трения по передней и задней поверхностям.

Тепло $Q_д$, $Q_{1т}$, $Q_{2т}$, выделяемое в указанных трех зонах, распространяется к менее нагретым участкам инструмента, заготовки и стружки, а также рассеивается в окружающей среде. Пути распространения тепловых потоков без учета искусственного охлаждения инструмента и детали приведены на рис. 5.1 *а*.

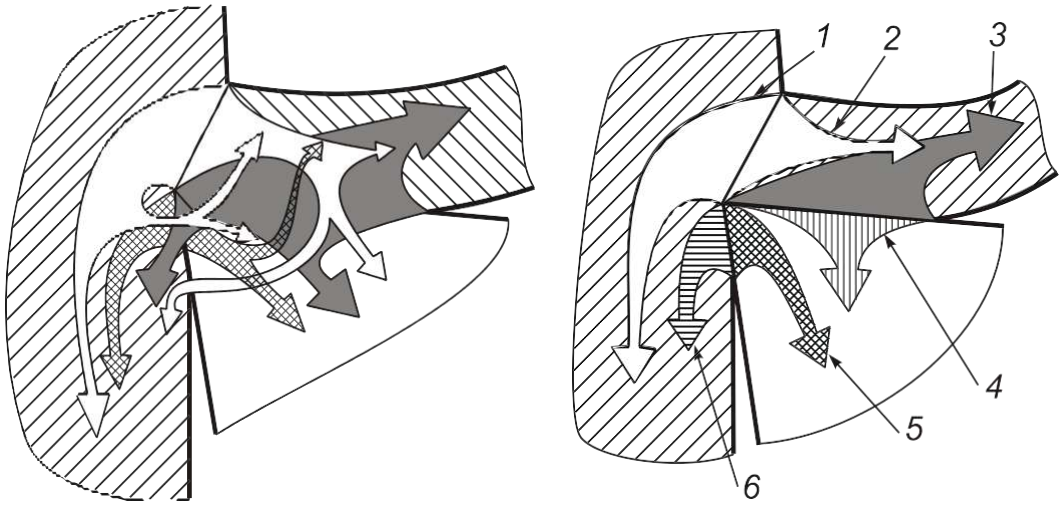


Рисунок 5.1 – Схемы движения тепловых потоков при резании без охлаждения:

1 – доля теплоты деформации $Q_{д.з}$, уходящей в заготовку; *2* – доля теплоты деформации $Q_{д.с}$, уходящей в стружку; *3* – количество теплоты $Q_{1т}$, возникающей в результате трения между стружкой и передней поверхностью инструмента; *4* – итоговый поток теплоты Q_1, возникающий в результате теплообмена на площадке контакта прирезцовой стороны стружки с передней поверхностью инструмента; *5* – итоговый поток теплоты Q_2, возникающий в результате теплообмена на площадке контакта поверхности резания с задней поверхностью инструмента; *6* – количество теплоты $Q_{2т}$, возникающей в результате трения между заготовкой и задней поверхностью инструмента

Как видно, при резании наблюдается сложное переплетение тепловых потоков, поскольку теплота от каждого из трех основных источников, действующих независимо один от другого, может распределяться между всеми телами, участвующими в резании. Схему эту можно значительно упростить (рис. 5.1 *б*), введя понятие итоговых тепловых потоков, проходящих через контактные поверхности инструмента.

Зная количество теплоты, выделяемой в процессе резания и распространяемой между стружкой, обрабатываемой заготовкой, инструментом и средой, можно записать уравнение баланса тепловой энергии при резании:

$$Q = Q_{\text{д}} + Q_{1\text{т}} + Q_{2\text{т}} = Q_{\text{с}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{з}} + Q_{\text{ср}},$$

где $Q_{\text{с}}$, $Q_{\text{и}}$, $Q_{\text{з}}$, $Q_{\text{ср}}$ – количество теплоты, переходящее соответственно в стружку, инструмент, заготовку и окружающую среду.

Эксперименты показывают, что при обработке обычных конструкционных сталей с небольшой скоростью резания (до 30...40 м/мин) относительное количество теплоты составляет: $Q_{\text{с}}$ = 60...70 %; $Q_{\text{и}}$ = 3 %, $Q_{\text{з}}$ = 30...40 %; $Q_{\text{ср}}$ = 1...2 %. Установлено, что чем ниже теплопроводность обрабатываемого материала, тем больше теплоты уходит в инструмент (рис. 5.2).

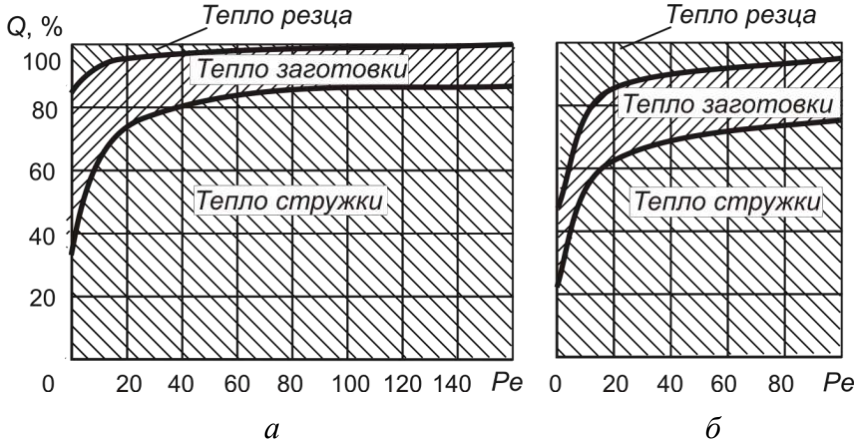


Рисунок 5.2 – Баланс теплоты при точении стали 45 (*а*) (резец из Т15К6) и сплава ВТ3-1 (*б*) (резец из ВК8)

Использование технологических сред позволяет значительно повысить $Q_{\text{ср}}$ в общем тепловом балансе. В зависимости от условий подвода среды соответственно уменьшаются $Q_{\text{с}}$, $Q_{\text{и}}$, $Q_{\text{з}}$. По мере увеличения скорости резания значительно растет относительное количество теплоты, уходящей в стружку (см. рис. 5.2).

Уменьшение доли тепла, переходящего в заготовку при увеличении скорости резания, вызвано изменением соотношения между скоростью резания и скоростью распространения тепла из зоны деформации. Из очага теплообразования на условной плоскости сдвига (см. рис. 5.1) в заготовку течет тепловой поток $Q_{д.з}$. Скорость распространения тепла зависит от градиента температур на условной плоскости сдвига и в заготовке и теплопроводности обрабатываемого материала. Если скорость резания, т. е. скорость, с которой режущее лезвие инструмента пересекает тепловой поток, мала, тепло от условной плоскости сдвига беспрепятственно перейдет в заготовку. По мере увеличения скорости резания лезвие инструмента все быстрее пересекает тепловой поток, и поэтому в заготовку успевает перейти меньшее количество тепла и все большее количество тепла остается в стружке. Уменьшение доли тепла, уходящего в инструмент при увеличении скорости резания связано с уменьшением ширины площадки контакта на передней поверхности, через которую тепло из стружки переходит в инструмент.

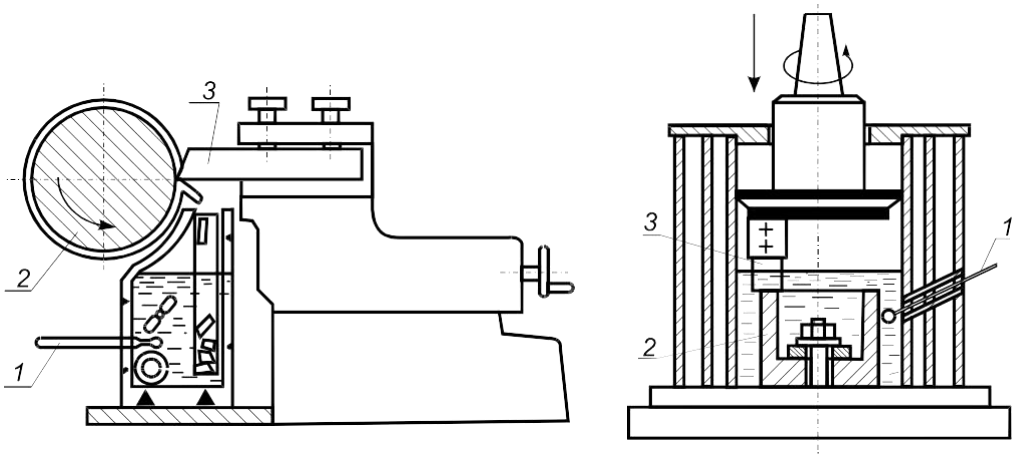
Несмотря на то, что доля тепла, уходящего в инструмент, очень мала, инструмент является неподвижным телом и даже небольшая относительная часть тепла, действуя длительное время, прогревает его до высокой температуры. Поэтому средняя температура на передней поверхности инструмента в несколько раз превосходит среднюю температуру стружки.

Лекция 2. Экспериментальные методы исследования тепловых процессов при резании

Используемые в настоящее время экспериментальные методы исследования тепловых процессов в зоне резания чрезвычайно разнообразны и благодаря их надежности и простоте являются основным направлением исследования. С их помощью можно определить количество выделяемой теплоты и ее распределение между стружкой, заготовкой и инструментом; температуру контактных площадок инструмента; температурные поля в зоне деформации и режущем лезвии инструмента. Рассмотрим некоторые из них.

Калориметрический метод позволяет определить количество теплоты, переходящей в стружку, заготовку и инструмент, а также их средние температуры. Например, улавливая в калориметр горячую стружку, зная массы стружки и воды в калориметре и изменение температуры воды,

можно определить среднюю температуру стружки (рис. 5.3 *а*). Есть также калориметры, в которые погружают заготовку и инструмент (рис. 5.3 *б*).



а *б*

Рисунок 5.3 – Схемы калориметров: *1* – термометр, *2* – заготовка, *3* – резец

Метод плавящихся пленок заключается в том, что на контактные площадки инструмента наносится в вакууме тонкий слой чистого металла с известной температурой плавления. Теплота, выделяющаяся при резании, оплавляет пленку в области, где достигается температура ее плавления, и тем самым обозначает соответствующую изотерму (рис. 5.4). Если нанести несколько пленок из различных металлов, то можно построить изотермы температурного поля инструмента.

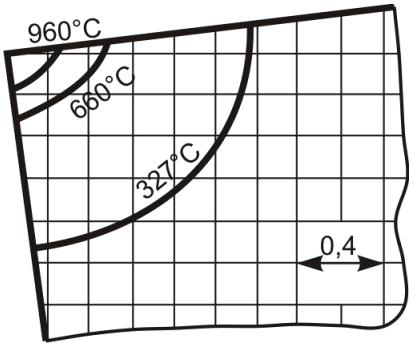


Рисунок 5.4 – Изотермы на резце из минералокерамики при точении стали 45 в течение 1 мин: V = 500 м/мин, толщина металлической пленки 0,05 мкм

Метод термокрасок принципиально аналогичен методу пленок, но вместо чистых металлов используются специальные составы, изменяющие свой цвет под действием температур. В некоторых случаях эти составы наносят в специальные канавки в плоскости разъема разрезного резца. Это дает возможность определить температурное поле внутри инструмента.

Метод термопар заключается в том, что если нагреть место спая двух проводников из различных металлов, оставляя при этом свободные концы при более низкой температуре, на последних возникает термоЭДС

(ТЭДС), которая зависит от разности температур спая и более холодных концов. Замыкая цепь через милливольтметр, можно измерить ТЭДС. Такая цепь называется термоэлектрической. Этот метод является наиболее распространенным и подразделяется на несколько разновидностей.

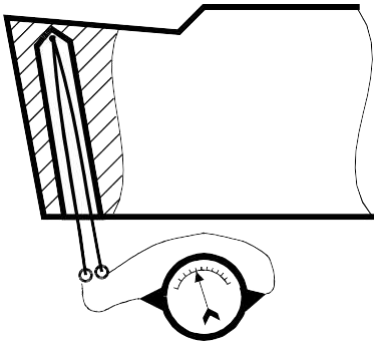


Рисунок 5.5 – Схема измерения температуры резания методом искусственной термопары

Метод искусственной термопары заключается в том, что в инструменте просверливается отверстие малого диаметра, не доходящее до определенной точки передней или задней поверхности примерно на 0,2...0,5 мм. В отверстие вставляется изолированная термопара (рис. 5.5). Температура в точке соприкосновения термопары и инструмента регистрируется включенным в цепь термопары гальванометром.

Этот метод дает возможность определить температуру различных точек на передней и задней поверхностях инструмента и на поверхности стружки, т. е. найти температурное поле. Основным преимуществом метода искусственной термопары является известная зависимость ТЭДС–°С как ее стандартная характеристика.

Недостатками классической схемы искусственной термопары является сложность устройства и невозможность определить наивысшую температуру, так как измерение температуры фактически производится не на поверхности контакта инструмента и стружки, а на некотором удалении от нее. Кроме того показания прибора изменяются со временем из-за износа перемычки, отделяющей термопару от поверхности контакта.

Более точные значения температур можно получить, используя ***скользящие*** по прирезцовой поверхности сходящей стружки (рис. 5.6).

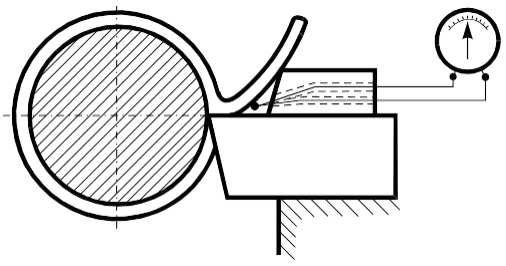


Рисунок 5.6 – Схема термопары, скользящей по прирезцовой стороне стружки

В методе полуискусственной термопары в качестве одного из ее проводников используется токопроводящие инструмент или заготовка. Второй частью термопары является традиционный проводник, подсоединенный к тем же инструменту или заготовке (рис. 5.7).

Метод полуискусственной термопары дает более точные результаты, чем метод искусственной, но, обеспечивая

измерение температур в данных точках поверхности, не дает возможности изучить закономерности влияния элементов режима резания на наивысшую температуру процесса резания. Кроме того, этот метод требует знания тарировочных зависимостей для каждого обрабатываемого или инструментального материала.

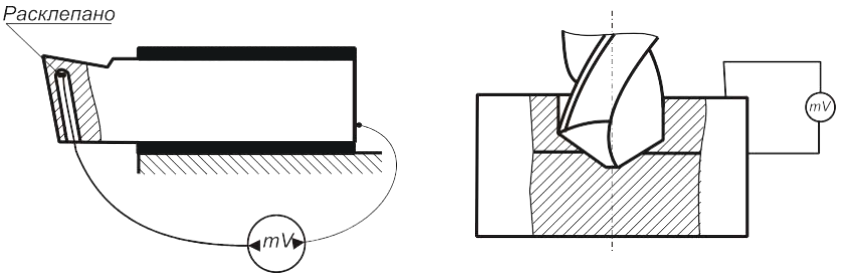


Рисунок 5.7 – Схемы полуискусственной термопары:
а – инструмент-проводник; *б* – заготовка-проводник

В методе естественной термопары (предложенный Е. Гербертом и К. Готвейном) элементами термопары служат заготовка и инструмент, которые, будучи разнородными металлами, в процессе резания имеют сильно нагретый контакт, фактически являющийся спаем этой термопары. Концы инструмента и заготовки имеют значительно более низкую температуру. Одна из распространенных схем естественной термопары приведена на рис. 5.8. Заготовка *1* изолируется от патрона *3* станка при помощи диэлектрических прокладок *5* и текстолитовой вставки *5* в заготовку, на которую опирается задний центр станка. Резец *2* изолируется от резцедержателя станка при помощи текстолитовых прокладок *5*.

Для замыкания контакта с заготовкой в нее ввертывается стержень *10*, диаметр которого меньше, чем отверстие в шпинделе. Этот стержень при выходе из шпинделя *4* проходит через текстолитовую втулку *5*, чтобы избежать соприкосновения со станком. На конце стержня установлен токосъемник *7*, *8*, которым обеспечивается надежное замыкание вращающегося и неподвижного участков цепи. Возникающая в процессе резания термоЭДС регистрируется гальванометром *9*.

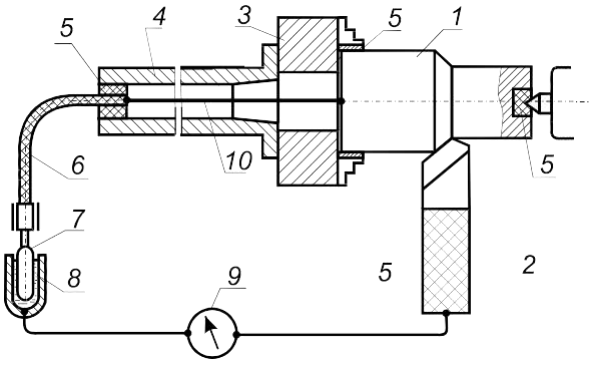


Рисунок 5.8 – Схема измерения температуры резания методом естественной термопары

Изоляция заготовки и инструмента от станка выполняется для устранения влияния дополнительных паразитных термопар, возникающих в местах стыка деталей станка с заготовкой. При исследованиях, не требующих высокой точности, заготовку не изолируют от станка, считая, что роль возникающей дополнительно термопары ничтожна из-за слабого разогревания заднего центра по сравнению с резцом. В связи с этим провод, ранее присоединяемый к заготовке, можно присоединить к любой точке станка.

Естественные термопары могут также применяться для измерения средних температур на каждой из контактных площадок в отдельности и для изучения закона распределения температур на поверхности соприкосновения стружки с инструментом.

Большим недостатком метода естественной термопары является необходимость наличия тарировочных графиков ТЭДС–°С для каждой комбинации обрабатываемый и инструментальный материал. Эти графики получаются при помощи достаточно трудоемких экспериментов на специальных установках, вид одной из которых приведен на рис. 5.9.

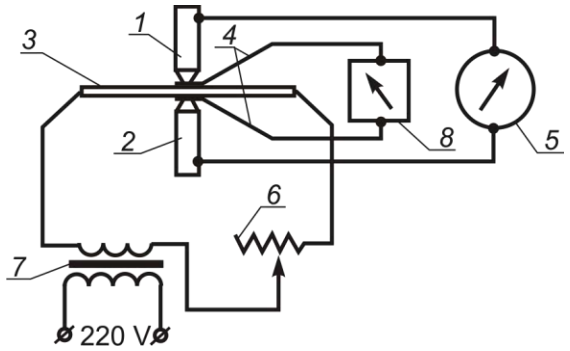


Рисунок 5.9 – Схема установки для тарирования естественной термопары контактным способом

Стержни *1* и *2* из обрабатываемого и инструментального материалов с определенной силой прижимаются к нагревателю *3*. Одновременно к нагревателю в том же месте приварена контрольная термопара *4*. Задавая различную температуру нагрева реостатом *6*, сравнивают показания гальванометров *8*, подключенного к контрольной термопаре *4* и *5* – испытываемой термопары. Эти данные являются основой для тарировочного графика.

Последние исследования показывают, что естественная термопара дает показания ТЭДС, лишь примерно соответствующие некоторой усредненной температуре, возникающей на передней и задней поверхностях. Величина этой температуры зависит от соотношения длин контактных площадок и температур, на них возникающих. Учитывая, что и отношение этой средней температуры к максимальным на передней или задней поверхностях тоже непостоянно, использовать результаты метода естественной термопары можно лишь для очень приближенных, сравнительных экспериментов.

Метод бесконтактного измерения температур представляет собой регистрацию теплового излучения отдельных участков детали или инструмента в процессе обработки. Он основан на принципе собирания теплового излучения с участка нагретой поверхности *1* с помощью линз *2* и направления его на фотоэлемент *3* (рис. 5.10). Под действием теплового излучения в фотоэлементе возникает ток, который повышается усилителем *4* и регистрируется измерительным устройством *5*. Наименьшая разрешающая способность такого прибора (пирометра) достигает 1 мм^2. Фотоэлектрический метод позволяет измерять температуру различных участков зоны резания и определять температурные поля передней и задней поверхности резца.

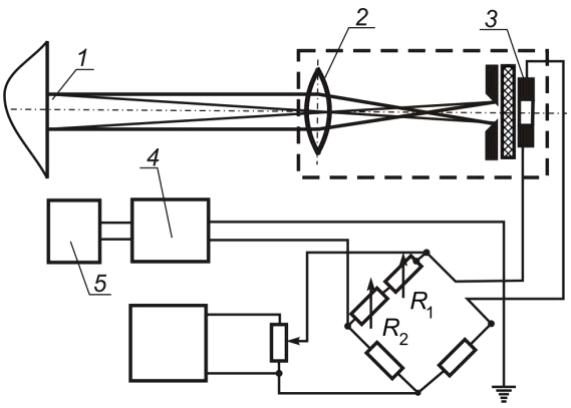
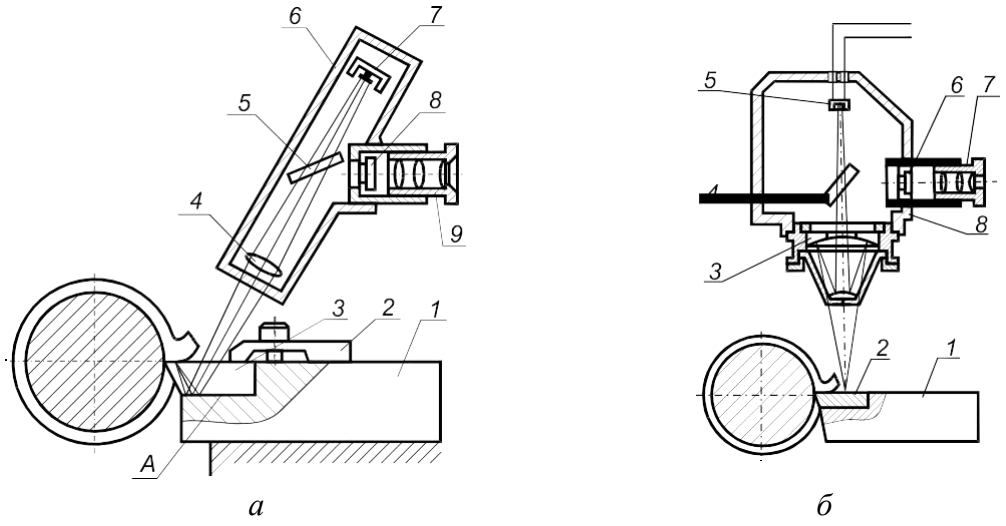


Рисунок 5.10 – Схема фотоэлектрического пирометра для измерения температуры инструмента, детали и стружки

На основании приведенной общей схемы разработана конструкция и изготовлен прибор для измерения температуры в любой точке зоны резания (рис. 5.11 *а*). Прибор состоит из корпуса *6*, объектива *4*, подвижного зеркала *5*, фотоэлемента *7*, окуляра *9* с сеткой *8*. Кроме того, применен специальный резец *1* с прихватом *2* и пластиной *3* из прозрачного для инфракрасной области спектра материала (например, из лейкосапфира) с полированными передней и нижней (опорной) плоскостями, причем опорная плоскость *А* выполнена зеркальной.



а *б*

Рисунок 5.11 – Схемы приборов для измерения температуры при точении: *а* – прозрачным; *б* – непрозрачным инструментом

Инфракрасные лучи из заданной точки зоны резания, отражаясь от опорной зеркальной плоскости *A*, фокусируются объективом на приемник инфракрасного излучения. Визуальное наблюдение за зоной резания обеспечивается окуляром с сеткой и подвижным зеркалом. Прибор позволяет измерять температуру в любой точке от 150 до 1200°С. Высокая точность измерения (± 2 ... 3 %) обеспечивается специальным зеркальным объективом, а также электронной схемой усилителя. Приемник инфракрасного излучения принимает сигналы с площадки размером 0,04 × 0,07 мм^2. Таким образом, имеется возможность измерять температуру в любой точке зоны резания на режущей кромке, на передней и задней поверхностях инструмента и т. д.

Приборы такого типа могут быть использованы для измерения температуры не только на площадке контакта, но и в любой точке режущей части резца (см. рис. 5.11 *б*). Это используется в тех случаях, когда инструментальный материал не прозрачен для инфракрасных лучей или когда сходящая стружка закрывает контактную площадку. Зная температуру в точках вне площадки контакта и используя известные закономерности распределения температур, можно теоретически рассчитать температуру в любой точке режущей кромки.

Рассмотренные ранее приборы позволяют измерять температуру в ограниченной зоне, практически в точке. Однако оптимизировать технологический процесс или оценивать термический режим объекта по температуре в отдельной точке весьма затруднительно. В этих случаях желательно иметь значительно больший объем информации, которую можно было бы получать, располагая тепловым изображением объекта. В последние годы для этой цели все чаще используют инфракрасную (ИК) аппаратуру, в частности, тепловизоры, позволяющие с достаточно высокой точностью фиксировать температурное поле тела.

Лекция 3. Влияние на температуру основных факторов процесса резания

Влияние скорости резания. С увеличением V увеличивается мощность резания (P_zV), а, значит, и мощность тепловых источников. Однако эта зависимость не прямо пропорциональная, так как при увеличении V составляющая P_z снижается через уменьшение коэффициента усадки. Кроме того, уменьшается часть тепла, которая переходит в инструмент из-за уменьшения длины площадки контакта по передней поверхности

инструмента, т. е. большая часть тепла уносится со стружкой. Поэтому рост θ от V в дальнейшем замедляется (рис. 5.12).

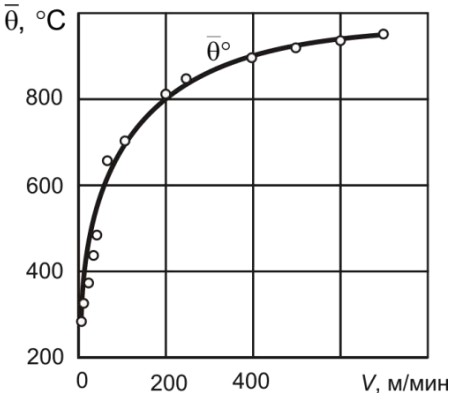


Рисунок 5.12 – Влияние скорости резания V на температуру резания θ при точении стали 40Х резцом из твердого сплаваТ60К6: t = 1,5 мм; S = 0,12мм/об

С увеличением глубины резания t (или ширины срезаемого слоя – b) сила резания, а, значит, мощность (P_zV) растет почти прямо пропорционально, однако одновременно пропорционально увеличивается активная длина режущего лезвия и площадь контакта (рис. 5.13 *а*), через которую возрастает отвод тепла в тело инструмента. Поэтому с увеличением t средняя температура возрастает незначительно.

С увеличением подачи S (толщины срезаемого слоя – a) P_z возрастает, хотя не так сильно, как при росте t, а, значит, и возрастает мощность тепловых источников. Одновременно увеличивается площадь зоны контакта резца со стружкой. Однако, в отличие от случая с глубиной резания, этот участок концентрируется вблизи вершины – наиболее термически нагруженной зоны (см. рис. 5.13 *б*), отвод тепла от которой более затруднен. Поэтому влияние подачи на температуру более сильное, чем глубины резания, хотя скорость роста θ отстает от скорости роста S.

Неодинаковое влияние ширины и толщины срезаемого слоя на температуру резания позволяет сделать следующий важный вывод: для уменьшения температуры резания при заданной площади сечения срезаемого слоя необходимо работать с возможно большим отношением t/S или b/a, т. е. с широкими и тонкими стружками.

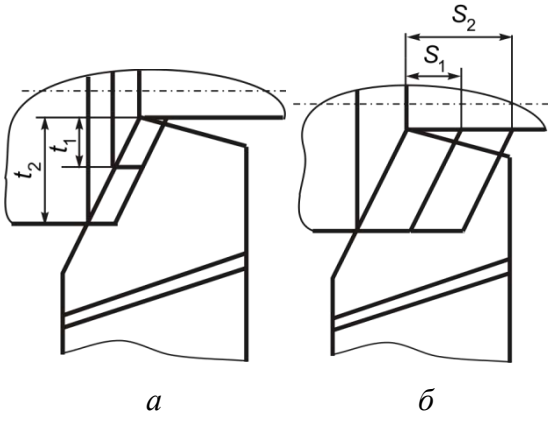


Рисунок 5.13 – Особенности влияния глубины резания (*а*) и подачи (*б*) на теплоотвод при резании

Обобщенную зависимость $\theta = f(V,S,t)$ получают экспериментальным путем и записывают в виде статистической формулы:

$$\overline{\theta} = C_\theta V^m S^n t^q k_\theta ,$$

где C_θ – коэффициент, который зависит от обрабатываемого материала;

m, n, q – показатели степени; k_θ – коэффициент, учитывающий геометрию инструмента.

Обычно $m \geq n \geq q$, то есть влияние этих факторов слабеет от V к t. Итак, для уменьшения θ необходимо работать с максимальной глубиной t, уменьшая S и еще больше уменьшая V.

Влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала. На силы резания, а, следовательно, на работу резания и количество выделяющейся теплоты, а также на условия теплоотвода оказывают влияние физико-механические свойства обрабатываемого материала. На температуру резания они влияют так же, как и на силу P_z, т. е. имеется тенденция к увеличению θ с повышением прочности, твердости и пластичности обрабатываемого материала. Большое воздействие на температуру резания оказывает теплопроводность обрабатываемого материала. Чем она выше, тем ниже θ, так как отвод теплоты от места ее выделения в стружку и в заготовку более интенсивен. В то же время при обработке малотеплопроводных жаропрочных, нержавеющих и других труднообрабатываемых сталей температура резания значительно выше, чем при обработке обычных сталей. Еще меньше теплопроводность титановых сплавов, а поэтому θ при обработке их очень высокая.

Влияние геометрических параметров инструмента. С увеличением γ уменьшается сила, а, следовательно, и работа резания, а также количество выделившейся теплоты. Однако при этом ухудшаются условия ее отвода, так как уменьшается угол заострения β, т. е. массивность режущего лезвия. При некотором угле $\gamma_{опт}$ условия теплоотвода от контактной зоны ухудшаются настолько, что θ начинает повышаться, хоть сила и мощность резания падают (рис. 5.14). Аналогично влияет на температуру также задний угол α.

С уменьшением главного угла в плане φ увеличивается угол при вершине инструмента ε, что приводит к возрастанию массы головки резца и улучшению теплоотвода. Одновременно увеличивается соотношение между шириной и толщиной срезаемого слоя b/a. Оба эти фактора приводят к уменьшению θ (рис. 5.15).

При постоянной мощности тепловых источников температуру резания можно понизить, интенсифицируя отвод тепла в заготовку и инструмент. Этого можно достигнуть, охлаждая заготовку, стружку, инструмент струей смазочно-охлаждающей жидкости. Так как в большинстве случаев скорость стружки превышает скорость распространения тепла в материале обрабатываемой заготовки, то, направляя струю жидкости на отделяющуюся от детали стружку, можно добиться понижения температуры

только ее свободных открытых слоев. Температура резания при этом понижается незначительно.

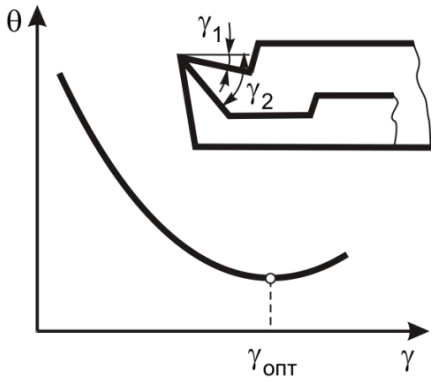


Рисунок 5.14 – Влияние переднего угла на среднюю температуру резания

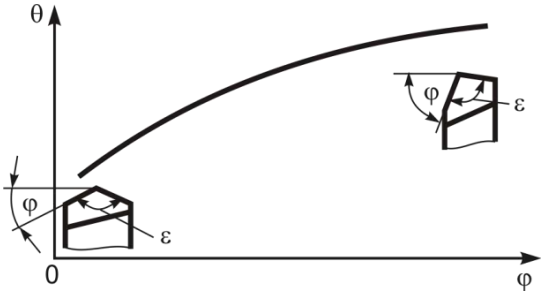


Рисунок 5.15 – Зависимость температуры резания от главного угла в плане инструмента

Значительно больший эффект можно получить, если струя жидкости будет омывать участки, близкие к контактным зонам инструмента, и тем самым повышать теплообмен между инструментом и окружающей средой. Чем больше тепла перейдет в инструмент или через него в окружающую среду, тем ниже будет температура резания.

Применение инструментальных материалов, обладающих высокой теплопроводностью, также способствует понижению температуры резания. С более низкой температурой резания работают инструменты, имеющие внутреннее охлаждение режущей части.

В 1935 году М. Ф. Семко сформулировал положение о «существовании таких температур, в интервалах которых обрабатываемость металла является наилучшей».

В 1936 году В. Рейхель предложил методику определения стойкости резца и обрабатываемости материалов, согласно которой определенному периоду стойкости резца для пары инструмент-заготовка отвечает одна и та же температура резания, которая не зависит от комбинации элементов режима резания.

А. Д. Макаров в своих работах указал на видимые недостатки положений В. Рейхеля и разработал теорию, согласно которой оптимальным скоростям резания (V_0) для произвольной пары материалов инструмент-заготовка при разных комбинациях скорости резания, подачи, глубины и геометрии режущей части соответствует одна постоянная средняя температура в зоне резания. Под оптимальной скоростью понимают такую, которая отвечает максимуму пути резания или площади обработанной

поверхности. При резании с такой скоростью наблюдается минимальная шероховатость обработанной поверхности, наилучшие свойства его поверхностного слоя и т. п.

Из этого положения вытекает ряд важных выводов: точкам минимума кривых, выражающих зависимость интенсивности изнашивания от скорости резания при любых соотношениях остальных параметров процесса резания, соответствует одна и та же оптимальная температура резания, хотя уровень оптимальных скоростей резания может существенно колебаться.

Современными исследованиями установлено, что для каждого вида напряженно – термического состояния контактной площадки инструмента устанавливается своя, наиболее подходящая для этих условий, износостойкая структура поверхностного слоя инструмента.

В своих работах Ф. Я. Якубов предложил теорию формирования износостойких структур на контактных поверхностях режущего инструмента благодаря приращению скрытой (внутренней) энергии, которая выделяется непосредственно при резании.

Отмечается, что «...оптимальная температура резания понижает относительный износ за счет создания наиболее оптимальной износостойкой контактной поверхности в период работы, независимо от метода достижения этой температуры: искусственным нагревом или от естественной температуры резания...».

Тема 6
РАЗРУШЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТОВ. СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТОВ

Лекция 1. Работоспособность инструментов

Работоспособное состояние режущего инструмента (лезвия) («***работоспособность***») характеризуется таким, при котором он способен выполнять обработку резанием при установленных в нормативно-технической документации (НТД) условиях и с установленными требованиями.

Неработоспособным состоянием режущего инструмента («***неработоспособность***»), характеризуемого его «***отказом***», может быть отклонение от установленных значений хотя бы одного из параметров режущего инструмента, требований или характеристик обработки, выполняемой этим инструментом.

В процессе резания инструмент теряет свою работоспособность в результате разрушения или изнашивания лезвия.

На рис. 6.1 приведена схема современных представлений о влиянии различных условий на выход инструмента из строя.

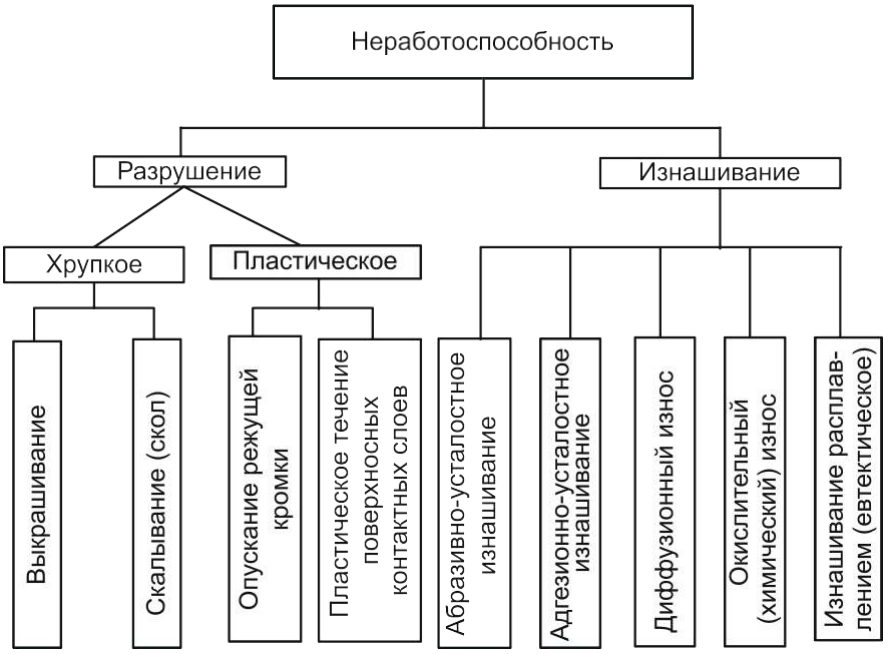


Рисунок 6.1 – Схема современных представлений о причинах потери работоспособности режущих инструментов

Изучение физических закономерностей отказа инструмента позволяет сформулировать требования, предъявляемые к инструментальным материалам и определить области их эффективного применения.

При недостаточной прочности лезвия инструмента его выход из строя («***внезапный отказ***») происходит путем хрупкого разрушения (скалывания и выкрашивания) или в результате пластической деформации и последующего срезания поверхностного слоя лезвия.

Хрупкое разрушение лезвия является результатом постепенного развития и накопления усталостных микротрещин, которые впоследствии, с увеличением внешней нагрузки сливаются в макротрещину. Процесс зарождения и развития трещин происходит во времени, т. е. зависит от величины и продолжительности приложения нагрузки. Встречаются два вида хрупкого разрушения лезвия: выкрашивание режущих кромок; сколы режущего лезвия (рис. 6.2).

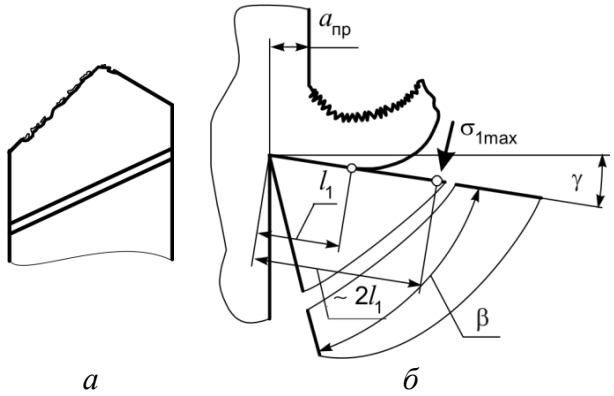


Рисунок 6.2 – Хрупкое разрушение режущего лезвия:
а – выкрашивание; б – скалывание

Выкрашиванием называется отделение мелких частиц режущей кромки, при котором размеры разрушений, как правило, меньше контактного участка передней поверхности со стружкой (рис. 6.2 *а*). Оно связано чаще всего с поверхностными дефектами, дефектами заточки, неоднородностью структуры инструментального материала, остаточными напряжениями и др.

Инструмент с выкрошенной режущей кромкой может продолжать снятие стружки, однако такое резание будет предаварийным. Частным случаем выкрашивания является «осыпание» режущей кромки. Под осыпанием режущей кромки понимают частичное или сплошное разрушение ее участков размерами не более 0,3 мм.

***Скалывание* (*сколы*)** – это отделение сравнительно крупных объемов режущего лезвия, которые превышают размеры контакта передней поверхности со стружкой (рис. 6.2 *б*). После этого резание инструментом становится невозможным.

Вероятность скалывания зависит от величины напряжений, формирующихся в режущем лезвии, которые главным образом определяются углом заострения β, передним γ и задним α углами, и главным углом в

плане φ, так как именно эти параметры определяют как размеры сечения режущего лезвия, так и величину давления стружки на переднюю поверхность. Из режимов резания наибольшее влияние на скалывание оказывает толщина срезаемого слоя *a* и в значительно меньшей мере ширина *b*. Скорость резания может оказывать существенное влияние на этот вид хрупкого разрушения, как правило, через изменение динамического состояния технологической системы, например, при возникновении вибраций.

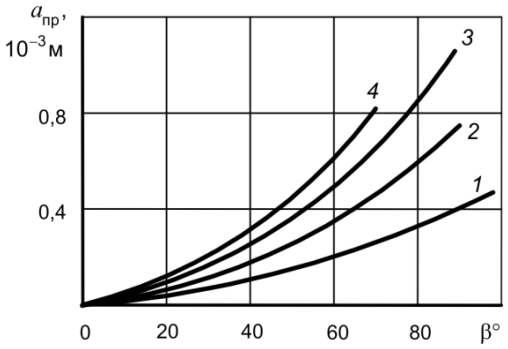


Рисунок 6.3 – Влияние угла заострения на предельную толщину срезаемого слоя при обработке различных обрабатываемых материалов резцами из ВК8 (V = 0,026 м/с):*1* – 110Г13Л; *2* – ХН60Т; *3* – 12Х18Н10Т; *4* – ШХ15

Для определенного инструментального материала и размеров лезвия мгновенный скол происходит при достижении толщиной срезаемого слоя некоторого предельного значения $a_{пр}$ (***предельная толщина срезаемого слоя*** или ***ломающая подача***).

Установлено, что с уменьшением угла заострения предельная толщина срезаемого слоя $a_{пр}$, при которой наступает скалывание (рис. 6.3), уменьшается (независимо от свойств обрабатываемого материала), что объясняется возрастанием напряжений в режущем лезвии за счет уменьшения площади его опасного сечения.

С увеличением переднего угла γ при β = const (т. е. при одновременном уменьшении заднего угла α), величина предельной толщины срезаемого слоя $a_{пр}$ увеличивается (рис. 6.4). Это связано с тем, что при неизменной прочности лезвия с увеличением переднего угла силы резания, а соответственно и напряжения в режущем лезвии уменьшаются.

Увеличение главного угла в плане φ вызывает уменьшение предельных толщин срезаемого слоя, что связано с увеличением давления стружки на переднюю поверхность (через рост толщины срезаемого слоя при постоянной подаче), а, следовательно, и напряжений в режущей части.

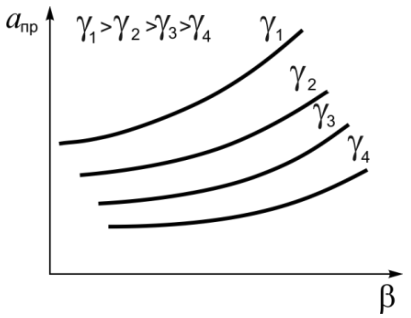


Рисунок 6.4 – Зависимость предельной толщины срезаемого слоя от угла заострения β и переднего угла γ

Прочность обрабатываемого материала определяет сопротивление пластической деформации при резании, т. е. уровень каса-

тельных напряжений по условной плоскости сдвига τ_φ. Поэтому ее повышение вызывает увеличение нормальных напряжений на передней поверхности и снижение $a_{\text{пр}}$.

В качестве характеристики сопротивления хрупкому разрушению инструментального материала может служить предел его прочности при одноосном растяжении R_m. При увеличении R_m предельные толщины срезаемого слоя возрастают и наоборот. Уменьшение $a_{\text{пр}}$ в зависимости от марки инструментального материала имеет место в следующем порядке: быстрорежущая сталь, твердые сплавы группы ВК и ТТК, далее группа ТК, БВТС, режущая керамика и СТМ.

Экспериментально установлена приблизительно линейная зависимость между пределом прочности на растяжение R_m инструментального материала и предельной толщиной срезаемого слоя $a_{\text{пр}}$, при которой происходит разрушение режущей части инструмента. Если R_m для быстрорежущей стали составляет 1800…2000 МПа, для твердых сплавов – 500…800 МПа, для режущей керамики – 150…200 МПа и для алмаза – 100…150 МПа, то при прочих равных условиях величина $a_{\text{пр}}$ для быстрорежущего инструмента будет в 3 раза больше, чем для твердых сплавов, в 8…10 раз больше, чем для режущей керамики, и в 15…20 раз больше, чем для алмаза. Поэтому инструменты из алмаза и режущей керамики применяют лишь для чистовых операций, когда толщины срезов малы и в режущей части инструмента преимущественно действуют напряжения сжатия.

Величина предельной толщины срезаемого слоя меняется со временем работы, так как процесс развития трещин в режущей части инструмента зависит и от времени резания (усталостное разрушение).

Силовая нагрузка на инструмент является основной причиной скалывания при непрерывном резании, при прерывистом же имеют место две дополнительные причины хрупкого разрушения:

- термические циклические напряжения;
- условия выхода инструмента из зоны резания.

Первая причина, характерная для твердых сплавов, впервые была объяснена Н. Н. Зоревым и Н. П. Вирко. Известно, что обработка при фрезеровании состоит из цикла резания и холостого хода.

Цикл резания. Поверхностные слои нагреваются, а внутренние – еще холодные (рис. 6.5), вследствие чего внешняя поверхность, стремясь расшириться, подвергается напряжениям сжатия.

Цикл холостого хода. Внутренние слои прогрелись, а внешние охлаждаются, сокращаясь. Они подвергаются напряжениям растяжения. Таким образом, за один цикл резания имеют место знакопеременные напряжения растяжения–сжатия. Это вызывает появление усталостных трещин, которые располагаются перпендикулярно режущей кромке и переходят на заднюю поверхность.

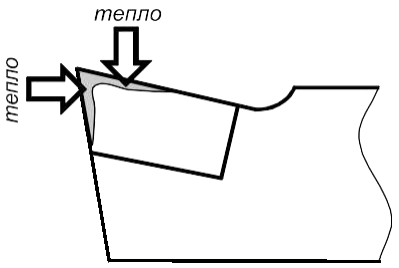


Рисунок 6.5 – Схема распределения нагретых и холодных слоев лезвия инструмента при рабочем ходе

***Предотвращение этих нежелательных влияний*:** уменьшение времени холостого хода, уменьшение температуры рабочего хода, увеличение температуры холостого хода (подогревание инструмента во время холостого хода).

Существует область условий резания, при которых свойства инструментального материала настолько изменяются, что инструмент не в состоянии срезать стружку, так как сам может подвергаться пластической деформации и срезу. Развитию этого процесса способствуют интенсивный разогрев (выше критической температуры теплостойкости) и размягчение инструментального материала при режимах резания, характеризующихся высокими силовыми и тепловыми нагрузками. Вторым фактором может быть всестороннее сжатие режущего лезвия, в результате чего пластичность материала инструмента в этой зоне существенно повышается. Пластическое течение поверхностных контактных слоев инструментального материала и их последующий срез преимущественно происходит вдоль задней поверхности (рис. 6.6).

В некоторых случаях для быстрорежущих сталей он может наблюдаться и вдоль передней поверхности лезвия.

Экспериментально доказано, что для предотвращения деформации режущего лезвия при срезании стружки должно соблюдаться соотношение

$$\frac{HV_{\text{и}}}{HV_{\text{стр}}} \geq 1,4 .$$

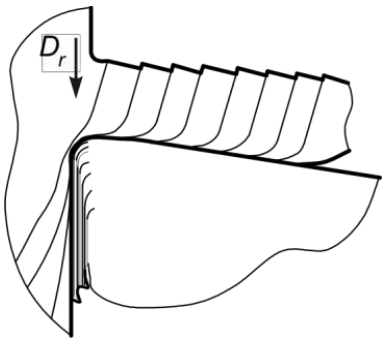


Рисунок 6.6 – Пластическое течение контактных слоев, прилегающих к задней поверхности

С увеличением скорости резания твердость основной массы стружки практически не изменяется, т. к. температура в зоне стружкообразования поднимается незначительно и составляет всего 100…300 °С. В то

же время в тонких контактных слоях инструментального материала температура может возрастать до величин, превышающих критическую температуру теплостойкости инструментального материала. Поэтому локальная твердость этих слоев с повышением температуры будет уменьшаться. В момент, когда соотношение твердости материалов инструментального и стружки будет ниже критического значения, начнется интенсивное пластическое деформирование поверхностных слоев режущего лезвия.

Если режущее лезвие инструмента формоустойчиво до температур плавления обрабатываемого материала, то в этом случае скорость резания не ограничивается по критерию пластической прочности. Обработка меди, латуни и бронзы твердосплавными, а алюминия быстрорежущими инструментами может быть реализована практически с любой скоростью резания. Высокая «горячая» твердость и отсутствие химического сродства кубического нитрида бора с железоуглеродистыми сплавами позволяет на порядок увеличивать скорости резания в сравнении с твердыми сплавами.

Для прерывистых процессов резания предельные по пластической прочности скорости резания имеют более высокие значения вследствие охлаждения инструмента при холостом ходе.

При обработке сталей, жаропрочных, титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов, имеющих низкую теплопроводность, скорость резания чаще всего ограничивается пределом пластической прочности инструментальных материалов. Поэтому резервом роста производительности обработки таких материалов является повышение предела пластической прочности (твердости при нагреве и теплопроводности) инструментального материала.

В процессе резания в результате взаимодействия стружки и поверхности резания с режущим лезвием контактные площадки на передней и задних поверхностях инструмента изнашиваются. Износ этих площадок происходит непрерывно, на протяжении всего процесса резания, практически при всех возможных условиях резания. Поэтому наряду с достаточной прочностью режущая часть инструмента должна обладать высокой износостойкостью.

Независимо от типа и назначения все инструменты могут изнашиваться преимущественно по задней поверхности (***первый вид износа***) (рис. 6.7 *а*), по задней и передней поверхностям одновременно (***второй вид износа***) (рис. 6.7 *б*). В некоторых случаях черновой обработки в условиях устойчивого наростообразования нарост предохраняет заднюю поверхность от контакта с поверхностью резания и от износа, поэтому

рассматривают ***третий вид износа*** – преимущественно по передней поверхности (рис. 6.7 *в*).

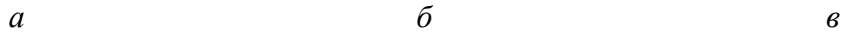


Рисунок 6.7 – Виды износа режущей части инструмента

При изнашивании по ***первому виду*** на задней поверхности инструмента образуется площадка износа шириной $h_з$. Очертания площадки износа в сечении главной секущей плоскостью приблизительно напоминают форму поверхности резания. Вдоль главной режущей кромки ширина площадки износа в общем случае неодинакова. Как правило, максимальная ширина площадки наблюдается у вершины инструмента (рис. 6.7 *а*, *б*). В некоторых случаях обработки заготовок с загрязненной или упрочненной поверхностной коркой локальный износ в виде проточины наблюдается в зоне контакта корки и режущей кромки (рис. 6.7 *а*).

При изнашивании по ***второму виду*** наряду с износом задней поверхности имеет место и износ передней поверхности в виде лунки. При наличии нароста лунка начинается на некотором расстоянии от режущей кромки (см. рис. 6.7 *в*), при его отсутствии – и фаска по задней поверхности, и лунка начинаются от режущей кромки.

Для оценки меры изношенности инструмента используются четыре параметра: ***линейный***, ***размерный***, ***массовый*** и ***относительный износ***.

Линейный износ $h_з$ представляет собой максимальную ширину площадки износа по задней поверхности без учета места ее расположения (см. рис. 6.7) или глубину лунки. Применяется в виде рекомендаций при назначении величины перетачивания инструмента.

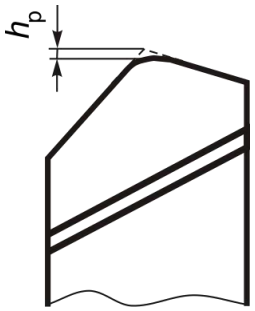


Рисунок 6.8 – Схема измерения размерного износа

При чистовых режимах определяющим становится ***размерный износ*** – $h_р$, который измеряется в направлении, перпендикулярном обработанной поверхности детали (рис. 6.8). Он определяет увеличение (наружное точение) или уменьшение (растачивание) исполнительного размера обрабатываемой детали.

С физической точки зрения более правильно оценивать величину износа через массу изношенной части инструмента в миллиграммах – ***массовый износ***, который пропорционален работе сил трения при изнашивании.

Графическое изображение закономерности изменения износа за время работы инструмента называют ***кривой износа*** (рис. 6.9). Для задней поверхности кривые износа принято строить для максимального значения ширины фаски износа на задней поверхности $h_з$ в зависимости от времени работы инструмента τ или пути резания L.

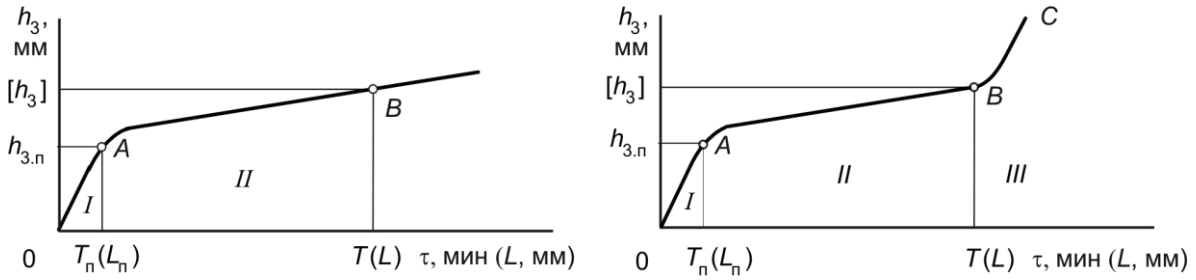


Рисунок 6.9 – Кривые износа инструмента: *а* – при преимущественном изнашивании по задней поверхности; *б* – при одновременном изнашивании по передней и задней поверхностям

Первый вид износа показан на рис. 6.9 *а*. Начальный участок кривой износа *ОА* характеризует интенсивный износ и называется участком приработки (*I* – период приработки). На этом участке площадь контакта задней поверхности лезвия с поверхностью резания относительно мала, вследствие чего на ней развиваются значительные удельные нагрузки, приводящие к интенсивному износу. Острозаточенный инструмент, интенсивно изна-

шиваясь, как бы «приспосабливается» к условиям работы. С появлением площадки контакта шириной $h_з$ = 0,05…0,1 мм действующие на нее напряжения снижаются и далее износ переходит в стадию рабочего (или нормального) изнашивания – участок *AB* (*II* – период нормальной работы). При достижении принятого значения износа (***критерия износа***) процесс обработки прекращают и производят замену изношенного лезвия. Время работы инструмента до этого момента называется ***периодом стойкости*** *T*.

Если инструмент изнашивается одновременно по задней и по передней поверхности (см. рис. 6.7 *б*), то на кривой износа появляется участок *BC* (рис. 6.9 *б*), называемый участком «катастрофического» износа (*III* – период катастрофического износа). В данном случае расширение и углубление лунки износа на передней поверхности и ширины площадки на задней могут приводить как к тепловому разупрочнению (потере твердости) и пластическому разрушению («смазыванию») режущей кромки лезвия за счет повышения температуры в этой зоне, так и к хрупкому разрушению – сколам и выкрашиванию.

Продолжение эксплуатации инструмента в зоне катастрофического износа нецелесообразно из-за значительного увеличения объемов разрушения лезвия, приводящих к уменьшению ресурса инструмента. Поэтому при достижении износа, величина которого приближается к его предельному значению, производят либо переточку инструмента, либо замену режущей кромки (при использовании сменных неперетачиваемых многогранных пластин).

Принципиальной особенностью условий контактирования (трения) при резании является наличие тонкого слоя обрабатываемого материала, заторможенного (прилипшего) на некоторой части контактных поверхностей инструмента. Причем с увеличением скорости резания (увеличением температуры) толщина этого слоя уменьшается и при очень высоких температурах резания он может переходить даже в жидкое состояние. Таким образом, контактирование обрабатываемого материаласинструментальным происходит, как правило, через взаимодействие с заторможенным слоем. Заторможенный слой может находиться в устойчивом состоянии схватывания с инструментальным материалом или (чаще всего) в неустойчивом состоянии, когда наблюдается его перемещение относительно инструментального материала. В условиях устойчивого состояния, когда нет относительного перемещения на границе «инструментальный материал–заторможенный слой», износ на этих участках отсутствует.

В условиях неустойчивого состояния, когда в заторможенном слое продолжаются пластические деформации сдвига и он, разрушаясь, перемещается по контактной поверхности инструментального материала, наблюдаются процессы, приводящие к изнашиванию в виде:

- постепенного усталостного вырывания микрочастиц;
- переноса (диффузии) химических компонентов, входящих в состав инструментального материала;
- взаимного растворения с контактным слоем обрабатываемого материала;
- образования жидкой фазы из более легкоплавких новых соединений, полученных в результате химического синтеза компонентов инструментального и обрабатываемого материалов, и газов из окружающей контакт среды.

Исходя из этого, природу изнашивания лезвий режущих инструментов можно объяснить следующими физическими явлениями (износами): ***абразивным***, ***адгезионно-усталостным***, ***диффузионным***, ***окислительным*** и ***износом оплавлением*** **(*эвтектическим*)**.

Абразивное изнашивание (*абразивный износ*)**.** Механизм абразивного износа состоит в том, что твердые включения в обрабатываемом материале, внедряясь в контактные поверхности инструмента, царапают эти поверхности, оставляя риски. Однако микрорезание со снятием стружки в данном случае происходит не всегда. Чаще всего возникновение рисок на инструментальном материале происходит в результате его пластического оттеснения в стороны при движении более твердой частицы. Таким образом, чем больше в составе обрабатываемого материала будет твердых фаз, тем большее число контактов с поверхностью лезвия инструмента произойдет при их взаимном перемещении. При каждом новом контакте будет происходить очередное «резание – царапание» или «оттеснение» инструментального материала, в результате чего поверхность трения в микрообъемах инструментального материала будет подвергаться процессам пластического передеформирования. Особенно сильно изнашивается из-за абразивного воздействия задняя поверхность, на которой появляются углубления в виде рисок и канавок, параллельных движению резания.

В рассматриваемом случае пластических деформаций с образованием рисок (следов деформации) наиболее вероятно проявление механизма малоцикловой усталости. Поэтому более точным названием для абразивного изнашивания является ***абразивно-усталостное изнашивание***.

Интенсивность абразивно-усталостного изнашивания возрастает при увеличении содержания в сталях цементита (100 HV) и сложных карбидов, в чугунах – цементита и фосфидов, в силуминах – карбида кремния, в жаропрочных сплавах – интерметаллидов, которые сохраняют высокую твердость даже при высоких температурах резания.

Из всех структурных составляющих стали наименьшей истирающей способностью обладает феррит (8 HV). За ним следует зернистый перлит (15…20 HV), истирающая способность которого тем меньше, чем меньше размеры зерен цементита. Пластинчатый перлит (20..35 HV) значительно интенсивнее изнашивает режущий инструмент, так как он обладает большой абразивной способностью в силу пилообразного характера трущейся поверхности с острыми карбидными кромками. Аустенитные стали с незначительным содержанием карбидов имеют слабую истирающую способность. Трудно обрабатываются стали мартенситного класса с высоким содержанием легирующих составляющих. Режущий инструмент особенно интенсивно изнашивается элементами, образующими твердые карбиды (VC, MoC; WC, TiC).

При обработке чугуна графит играет роль внутренней смазки, уменьшая тенденции к образованию нароста. Но наличие твердых фосфористых соединений и особенно цементита весьма сильно увеличивает истирающую способность чугуна.

Контактные поверхности инструмента могут также царапаться частицами периодически разрушающегося нароста, твердость которого значительно (в 2–3 раза) превосходит твердость материала, из которого он образован.

Абразивное изнашивание усиливается при резании в химически активных средах (например, в четыреххлористом углероде), ослабляющих сопротивляемость контактных поверхностей инструмента царапанию. Абразивное действие обрабатываемого материала становится тем сильнее, чем меньше отношение $HV_{и}/HV_{м}$. Вследствие этого абразивное изнашивание заметнее проявляется при работе инструментами из углеродистых и быстрорежущих сталей (65…70 HV), чем при работе твердосплавными инструментами, так как их твердость значительно выше (130…140 HV).

Этот вид износа может играть решающую роль при обработке заготовок с резко выраженными абразивными свойствами (чугунное литье, силумин, сварные швы, поковки со штамповочной коркой и др.). Абразивному износу подвергаются в основном режущие инструменты, рабо-

тающие при относительно низких скоростях и температурах резания (протяжки, метчики, плашки и т. п.).

Адгезионно-усталостное изнашивание (*адгезионный износ*)**.** Под адгезионным износом инструмента понимается отрыв удерживаемых силами адгезии («схватывания», холодного сваривания) мельчайших частиц инструментального материла в процессе его перемещения относительно обрабатываемого материала. Благоприятные для адгезии условия на контактных поверхностях инструмента создаются вследствие высоких давлений и образования ювенильных (химически чистых) поверхностей. Напряжения, возникающие при однократном разрыве адгезионной связи, как правило, недостаточны для разрушения микрообъема инструментального материала. Поэтому разрушения преимущественно возникают в отдельных зонах, где уже имеется значительное количество усталостных трещин, появляющихся в результате циклических нагрузок при создании и разрушении адгезионных мостиков сваривания. Таким образом, *отрыв частиц инструментального материала силой адгезии является всего лишь заключительным этапом разрушения*, совершающимся тогда, когда прочность связи частиц с основой снижается вследствие возникновения и развития усталостных явлений в поверхностном слое инструментального материала.

Адгезионно-усталостный износ частиц режущего инструмента может происходить либо путем отрыва, либо пластического среза, и соответственно механизм износа имеет либо хрупкую, либо пластическую природу.

Масса инструментального материала, удаляемого с контактных поверхностей инструмента на единицу пути резания, зависит от прочности и твердости обрабатываемого материала. При прочих равных условиях, чем меньше отношение твердостей $HV_{и}/HV_{м}$, тем интенсивнее изнашивание инструмента.

Адгезионный износ инструмента можно уменьшить, применяя жидкости, создающие на контактных поверхностях «защитные» пленки (окисные, масляные и др.), которые существенно уменьшают силы адгезии и препятствуют схватыванию обрабатываемого и инструментального материалов.

Окислительное изнашивание. Гипотеза окислительного изнашивания основывается на известном факте коррозии твердых сплавов при нагреве их в среде кислорода и при неизменности свойств поверхностных слоев сплавов при нагреве их в инертных газах (аргоне, азоте, гелии). Согласно этой гипотезе при температурах резания 700…800 °С кислород

воздуха вступает в химическую реакцию с твердым сплавом, причем из всех возможных составляющих (фаз) в нем (кобальт, карбиды вольфрама, титана, тантала) наиболее сильно окисляется кобальт. Карбид титана образует более прочную пленку окисла по сравнению с карбидом вольфрама. Вследствие значительной пористости металлокерамических твердых сплавов окислительным процессам подвергаются не только сами контактные поверхности инструмента, но и зерна твердого сплава, лежащие на некоторой глубине от этих поверхностей. Продуктами окисления кобальтовой фазы являются окислы Co_3O_4 и CoO, а карбидов – WO_3 и TiO_2. Их твердость в 40–60 раз ниже средней твердости твердых сплавов. В результате значительного размягчения кобальтовой связки нарушается «монолитность» сплава за счет ослабления связей между зернами карбидов. Это создает благоприятные условия для вырывания карбидных зерен силами трения и адгезии, действующими на передней и задней поверхностях лезвия, и резкого повышения интенсивности изнашивания этих поверхностей.

Вместе с тем в случае образования тонких и достаточно прочных окисных пленок адгезия происходит между пленками, что предохраняет инструмент от более интенсивного износа путем вырывания частиц инструментального материала. При образовании более толстых и рыхлых окисных пленок интенсивность износа лезвия резко увеличивается, так как такие пленки легко разрушаются при его взаимодействии с контактными поверхностями обрабатываемой детали и стружкой.

Склонность твердых сплавов к окислению определяется их химическим составом. Однокарбидные сплавы окисляются сильнее, чем двухкарбидные. С увеличением содержания кобальта в твердом сплаве интенсивность и скорость окисления возрастают. Развитию коррозионных явлений в значительной степени препятствует применение при резании инертных газовых сред, например, аргона, гелия, азота, что существенно уменьшает интенсивность изнашивания инструмента.

Диффузионное изнашивание. При температурах резания выше 800…850 °С изнашивание инструмента может преимущественно происходить в результате диффузионного растворения инструментального материала в обрабатываемом.

Интенсивному диффузионному растворению материалов инструмента и обрабатываемой детали при резании способствуют следующие факторы:

- высокие температуры, превышающие температуру начала химического взаимодействия твердого сплава с обрабатываемым материалом;

- большие пластические деформации контактных слоев, приводящие к полному контакту поверхностей по всей номинальной поверхности;
- ювенильность поверхностей детали и частично инструмента.

Различные компоненты твердого сплава диффундируют в обрабатываемый материал с разной скоростью. Наиболее быстро диффундирует углерод, медленнее – вольфрам, кобальт и титан. В результате неодинаковой скорости растворения между инструментом, стружкой и поверхностью резания образуется три диффузионных слоя. Наиболее удаленным от контактных поверхностей является науглероженный слой. Ближе к границе раздела расположен слой белого цвета, представляющий собой твердый раствор углерода и вольфрама или углерода, вольфрама и титана в γ-железе. Третий слой является интерметаллидом в виде железовольфрамового или более сложного карбида. Структурные превращения в этом слое, расположенном практически на границе раздела твердого сплава с обрабатываемым материалом, происходят в результате обеднения контактных поверхностей инструмента углеродом и диффузии в твердый сплав железа из обрабатываемого материала.

По сравнению с основным массивом твердого сплава третий слой является более хрупким и разупрочненным, что приводит к его срезу движущимися стружкой и поверхностью резания. Следовательно, диффузионный износ зависит не только от непосредственного переноса атомов инструментального материала в деталь и стружку. В результате диффузионных процессов в поверхностных слоях инструмента происходят структурные превращения, приводящие к охрупчиванию и разупрочнению рабочих поверхностей лезвия инструмента, которые срезаются и уносятся обрабатываемым материалом и стружкой. Таким образом, диффузионный износ необходимо рассматривать как результат двух процессов: собственно диффузионного растворения и диспергирования (измельчения) и разрушения разупрочненных контактных поверхностей.

При резании инструментами из однокарбидных сплавов в их диффузионном изнашивании в той или иной степени участвуют оба указанных процесса. Изнашивание же инструментов из двухкарбидных сплавов происходит несколько иначе. Титано-вольфрамовые карбиды в обрабатываемом материале растворяются значительно медленнее, чем вольфрамовые. Поэтому на контактных поверхностях образуются микровыступы еще не полностью растворившихся зерен из титано-вольфрамовых карбидов. Впадины между этими зернами заполняются обрабатываемым материалом

из контактных слоев стружки или поверхности резания, создавая очаги застоя, что увеличивает время диффузии и замедляет диффузионное растворение. При высоких скоростях (температурах) резания двухкарбидные сплавы имеют большую износостойкость, чем однокарбидные. Вместе с тем при температурах резания $\theta < 800$ °С, когда диффузионное растворение практически незначимо, износостойкость однокарбидных твердых сплавов мало отличается от износостойкости двухкарбидных, а иногда и превосходит ее. Интенсивность протекания диффузионных процессов заметно уменьшается при применении инструментальных материалов или износостойких покрытий, химически инертных по отношению к обрабатываемому материалу.

Изнашивание оплавлением **(*эвтектическое*)**. Такой механизм изнашивания довольно часто проявляется при обработке с высокими скоростями и температурами резания. Например, при обработке сталей инструментом из поликристаллов кубического нитрида бора температура резания может достигать значений 1200 °С и выше. В этом случае процесс резания сопровождается образованием на контактных поверхностях инструмента тонкого слоя соединений, температура плавления которых ниже, чем температуры плавления обрабатываемого и инструментального материалов. В результате этого контакт инструмента со стружкой и поверхностью резания происходит через слой расплавленной фазы, т. е. в зоне контакта реализуется механизм контактно-реактивного плавления. Это предположение подтверждается тем, что, например, эвтектика $Fe–Fe_2B$ плавится при температуре 1177 °С, а эвтектики CrB_3 и Fe_4N при 1000–1100 °С. Учитывая, что в контакте могут образовываться более сложные соединения, например тройные, температура их плавления может быть еще ниже. Дополнительной причиной образования жидкой фазы на контактных поверхностях инструмента является окисление инструментального материала, размягчение и плавление борного ангидрида, имеющегося в составе КНБ.

С одной стороны, образование жидкой фазы сопровождается уменьшением коэффициента трения, что способствует уменьшению относительного износа, а с другой – жидкая фаза, состоящая из химических элементов, входящих в состав инструментального и обрабатываемого материалов и компонентов окружающей контакт газовой среды, выносится из зоны контакта и оседает в виде «налета» на поверхностях инструмента вблизи контактных зон, а также распыляется в окружающую среду в виде мельчайших капель. То есть образование жидкой фазы сопровождается

разрушением контактных зон поверхностей лезвия и увеличением износа инструмента.

При эксплуатации инструмента по мере его изнашивания наступает момент, когда дальнейшее резание должно быть прекращено и требуется его замена. Характеристикой неработоспособного состояния режущего инструмента (лезвия) является «***отказ режущего инструмента***». ***Критерий отказа режущего инструмента* (*лезвия*)** определяется в зависимости от требований к обработке при выполнении конкретной технологической операции.

Частным случаем критерия отказа является достижение ***критерия затупления*** режущего инструмента (лезвия), под которым понимают сумму признаков (или один решающий признак), при которых работа инструментом должна быть прекращена. Чаще всего в качестве критерия отказа режущего инструмента принимается максимально допустимое значение износа задней поверхности лезвия, после достижения которого наступает его отказ. ***Время работы инструмента до достижения им критерия отказа называется периодом стойкости – T.***

Лекция 2. Стойкость инструмента и скорость резания, допускаемая его режущими свойствами

Свойство режущего инструмента сохранять работоспособными свои контактные поверхности и лезвия называют ***стойкостью инструмента***, а время T, в течение которого это происходит (как уже указывалось) – ***периодом стойкости***. Период стойкости равен времени работы инструмента между двумя его заточками или заменой режущей кромки. Период стойкости любого инструмента зависит от вида, механических и теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрии инструмента, параметров режима резания и применяемой СОТС. Стойкостные и скоростные зависимости в настоящее время устанавливают исключительно экспериментально.

Для установления связи между периодом стойкости T и, например, скоростью резания V все параметры процесса резания, кроме скорости, сохраняют постоянными. Затем последовательно изменяют скорость резания и при каждом ее значении изнашивают инструмент, получая кривые износа $h_з=f(\tau)$ (рис. 6.10).

Кривые износа являются основным экспериментальным материалом для получения зависимости $T = f(V)$. Задаваясь критерием износа задней поверхности $[h_з]$ = const для каждой скорости резания, по кривым износа находят соответствующие времена работы инструмента до достижения этого критерия, т. е. его периоды стойкости T. Такие опыты дублируют несколько раз, окончательно принимая период стойкости T_i как среднее значение результатов в каждом опыте.

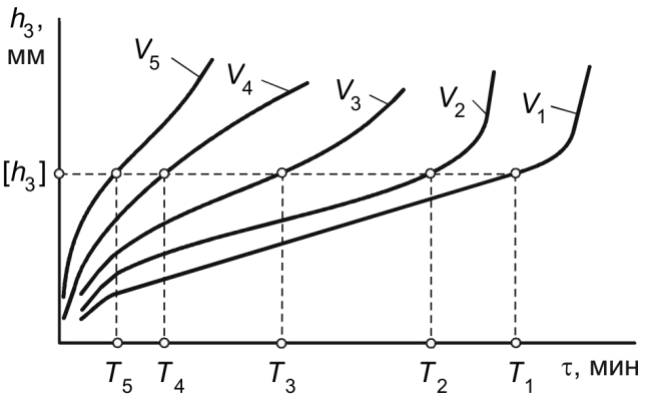


Рисунок 6.10 – Кривые износа инструментов

Связь между скоростью резания V и периодом стойкости T при обработке чугуна инструментами из быстрорежущих сталей и однокарбидных твердых сплавов выражается непрерывно убывающей кривой *1* (рис. 6.11), напоминающей гиперболу. Такой же кривой изображается связь между V и T при обработке углеродистых и легированных конструкционных сталей инструментами из быстрорежущих сталей. При обработке конструкционных углеродистых и легированных сталей, жаропрочных сталей и сплавов и некоторых других материалов инструментами из однокарбидных и двухкарбидных твердых сплавов связь между V и T изображается более сложной кривой *2*, имеющей несколько перегибов. Аппроксимацию кривой *1* и участка *вг* кривой *2* производят степенной функцией $T = \dfrac{C_1}{V^{m_1}}$, в которой показатель степени m_1 определяет силу влияния скорости резания на стойкость. Зависимость впервые была установлена Ф. Тейлором, поэтому носит название «***формула Тейлора***». Постоянная C_1 характеризует обрабатываемый и инструментальный материалы, геометрические параметры инструмента, применяемую СОТС, а также глубину резания и подачу, с постоянными значениями которых ведется обработка при получении этой эмпирической формулы, т. е. для заданных условий обработки C_1 = const, из чего следует, что $V^{m_1}T = \text{const}$.

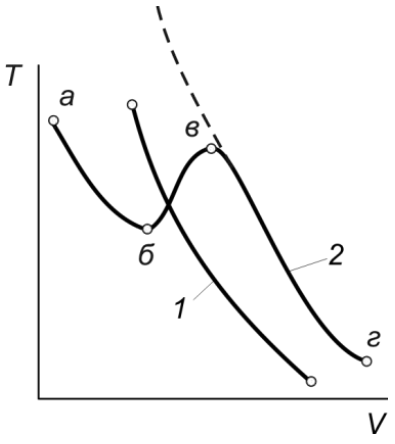


Рисунок 6.11 – Общий вид зависимости периода стойкости T инструмента от скорости резания V

Величину показателя m_1 легко определить графически, если применить метод выпрямления экспериментальных кривых путем логарифмирования функции. Если на координатных осях откладывать не абсолютные числовые значения V и T, а их логарифмы, то получим уравнение прямой $\lg T = \lg C_1 - m_1 \lg V$, тангенс угла наклона которой к оси $\lg V$ и есть искомый показатель степени m_1 (рис. 6.12): $m_1 = \operatorname{tg}\psi = \frac{a}{b}$.

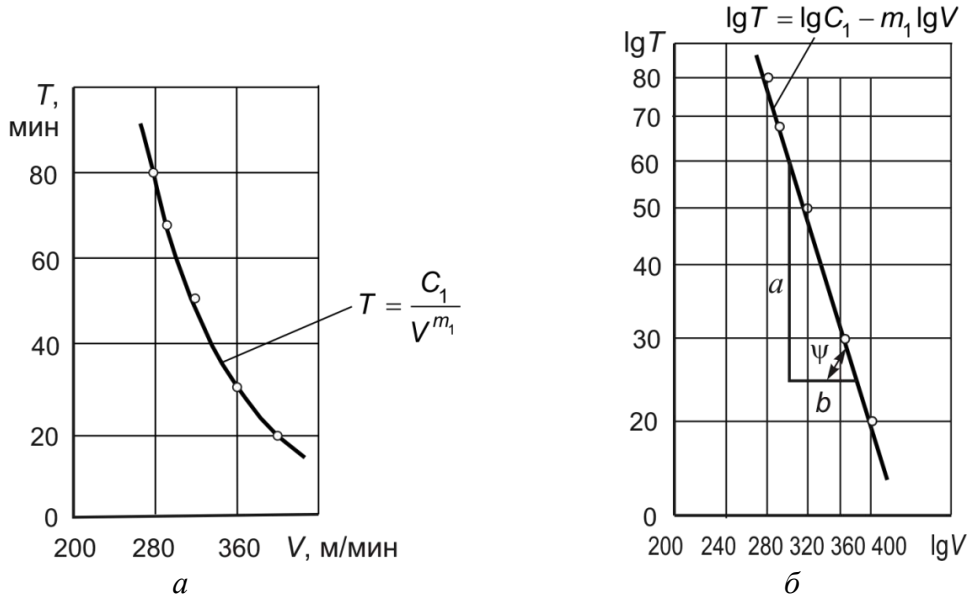


Рисунок 6.12 – Зависимость между скоростью резания и периодом стойкости:
а – в простых координатах; *б* – в логарифмических координатах
(сталь 45, R_m = 450 МПа, Т15К6, t =2 мм, S = 0,4 мм/об)

С физической точки зрения показатель степени m_1 характеризует «чувствительность» инструментального материала к изменению скорости резания при различных видах обработки: чем он меньше, тем в меньшей степени будет уменьшаться стойкость инструмента с увеличением скорости резания и наоборот. Показатель m_1 определяется опытным путем и зависит от обрабатываемого и инструментального материала, толщины срезаемого слоя, вида и условий обработки. Чем ниже износостойкость материала режущей части инструмента и тяжелее условия резания, вызывающие повышение тепловыделения и температуры, тем больше величина m_1. Для проходных, подрезных и расточных резцов из быстрорежущей стали при обработке стальных заготовок с охлаждением m_1 = 8; для инструментов, оснащенных пластинками из твердых сплавов, в зависимости от вида обработки m_1 = 3,3…8. Экспериментально установлено, что при точении

большинства обрабатываемых материалов инструментами из твердых сплавов $m_1 \approx 5$.

На участке $V_0 - V_1$, где интенсивность относительного (в основном – адгезионного) износа примерно постоянна (рис. 6.13), период стойкости T должен уменьшаться.

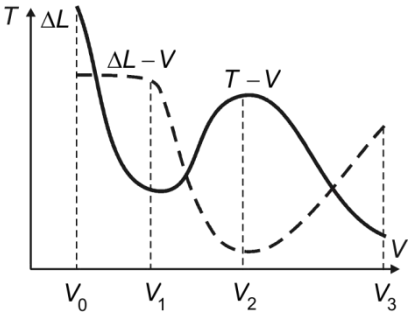


Рисунок 6.13 – Взаимосвязь между интенсивностью износа и стойкостью инструмента

При $V > V_1$ происходит размягчение зерен твердого сплава и точек адгезионного схватывания, увеличение циклической прочности и уменьшение относительного (адгезионного) износа. Поэтому T увеличивается.

При скоростях $V > V_2$ возрастает интенсивность диффузионных и окислительных процессов, интенсивность износа увеличивается и стойкость падает. Используя аналогичную методику стойкостных экспериментов, получают зависимости стойкости от подачи и глубины резания, аппроксимируемые степенными формулами вида:

$$T = \frac{C_2}{t^p} \text{ и } T = \frac{C_3}{S^q}.$$

Эти частные формулы могут быть объединены в одну общую, включающую все три параметра режима резания:

$$T = \frac{C_4}{V^{m1} S^q t^p}.$$

В производственных условиях чаще приходится решать задачу определения одного из составляющих режима резания для обеспечения заданного периода стойкости. Учитывая степень влияния режимных параметров, наиболее целесообразно определять скорость резания.

$$V = \frac{C_V}{T^m t^{xV} S^{yV}}.$$

Тема 7
КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Лекция 1. Качество обработанной поверхности

Под качеством поверхности и поверхностного слоя понимают их свойства, которые формируются в результате воздействия технологических методов обработки. Качество деталей определяется геометрией обработанных поверхностей и физико-механическими характеристиками поверхностного слоя.

К геометрическим показателям качества относят точность размеров, отклонение формы, волнистость, шероховатость. К физико-механическим характеристикам относят микротвердость, остаточные напряжения, структуру, химический состав.

Существенная часть требований к качеству обработки выполняется за счет непрерывного повышения точности изготовления. В зависимости от предельно достижимой точности процессы резания делят на обычные (традиционные, конвенциональные), точные (прецизионные) и чрезвычайно точные (ультрапрецизионные), которые рассматриваются соответственно в макро, микро и нано диапазонах точности. Возможности процессов резания в нанодиапазоне приближаются к критическим, т. к. теоретическим ограничением точности при разделении кристаллической решетки являются размеры молекул или атомов обрабатываемого материала (0,2–0,4 нм).

Существующие реальные процессы резания обеспечивают отклонение в пределах: лезвийная и абразивная обработка –10 мкм; тонкое точение, хонингование, суперфиниш, тонкое шлифование –1 мкм; алмазные и алмазноабразивные процессы –0,1 мкм; ультрапрецизионные процессы резания, шлифование, суперфиниширование, доводка и полирование – 0,01 мкм.

В зоне первичной пластической деформации обрабатываемый материал испытывает сначала упругую, а потом пластическую деформации. Причем нижняя граница зоны стружкообразования пересекает продолжение поверхности резания. То есть, пластическую деформацию испытывают слои металла, оставленные на обработанной поверхности. В результате такой деформации поверхностный слой металла под обработанной поверхностью упрочняется, изменяется его структура и свойства, что приводит к раздроблению зерен металла на мелкие частички, ориентированию

зерен в одном направлении (текстура), образованию внутренних напряжений в поверхностном слое. Учитывая образование несрезанных гребешков шероховатости на обработанной поверхности и искажение формы поверхности под действием сил резания и износа инструмента, можно констатировать, что обработка резанием влияет на основные показатели качества обработанной поверхности.

***Совокупность выступов и впадин на поверхности детали образует рельеф* (*макро- и микрогеометрию*)**. Профиль макро- и микрогеометрии поверхности характеризуется высотой H и шагом S (рис. 7.1). Условная классификация погрешностей такая: $S/H>1000$ – отклонения формы поверхности; $1000>S/H>40$ – волнистость поверхности; $S/H<40$ – шероховатость. Погрешности формы, волнистость и шероховатость поверхностей влияют на эксплуатационные и технологические показатели изделий (неравномерность припусков, удельного давления, зазоров, натягов, трение и т. п.).

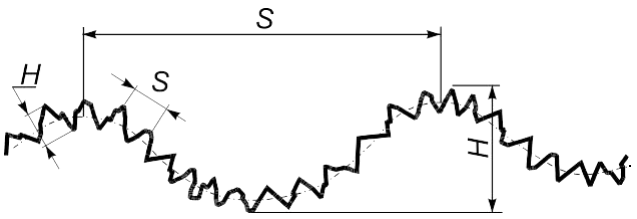


Рисунок 7.1 – Параметры макро- и микрогеометрии поверхности

Отклонением формы называется отклонение реальной поверхности (ограничивающей тело и отделяющей его от окружающей среды) от формы номинальной поверхности. Под номинальной понимается идеальная поверхность, форма которой задана чертежом.

При рассмотрении отклонений формы, например, цилиндрических поверхностей валов (ДСТУ 2498-94) различают отклонения формы в поперечном и продольном сечениях.

В продольном сечении отклонение формы может быть в виде конусности (*а*), бочкообразности (*б*) и седлообразности (*в*) (рис. 7.2).

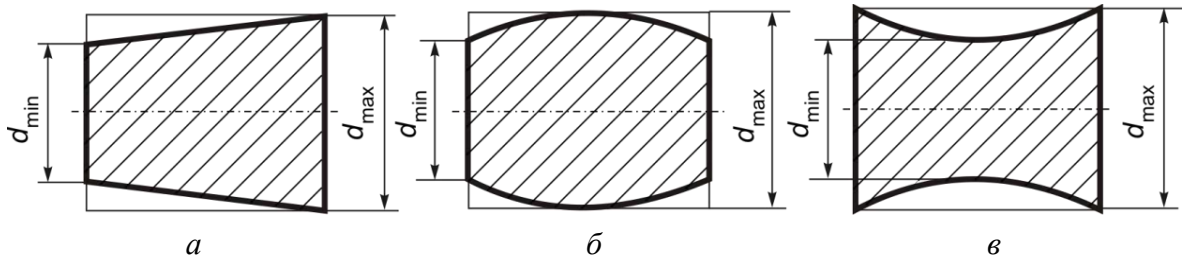


Рисунок 7.2 – Отклонение от цилиндричности в продольном сечении

Погрешности формы цилиндрических деталей (валов) есть следствие деформации заготовки или элементов системы СПИЗ под действием со-

ставляющей силы резания P_y. Она зависит от соотношения величин жесткости суппорта станка, передней и задней бабки и обрабатываемой заготовки. Причины появления отклонений формы в продольном сечении следующие.

1. Форма вала будет иметь бочкообразность, если деформация (прогиб) обрабатываемой заготовки будет значительно больше (вследствие малой жесткости), чем передней и задней бабок станка.

2. Форма вала будет иметь седлообразность, если деформация (прогиб) обрабатываемой заготовки будет значительно меньше, чем деформации передней и задней бабок станка.

3. Форма вала будет иметь конусообразность, если деформация одной бабки будет большей, чем другой или, если при продольном точении вала резец будет интенсивно изнашиваться в радиальном направлении.

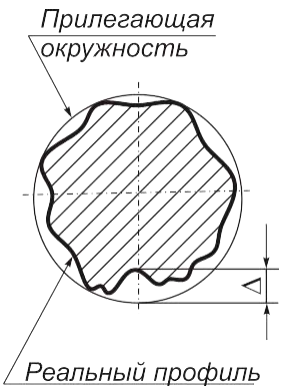


Рисунок 7.3 – Отклонение от круглости

В поперечном сечении это отклонение от круглости (рис. 7.3), частными случаями являются овальность и огранка.

Отклонение от круглости возникает при недостаточной жесткости системы СПИЗ и появлении вибраций.

Волнистость поверхности (см. рис. 7.1) также относится к отклонениям формы. При измерении отклонений формы и волнистости величины шероховатостей в расчет не принимаются.

Шероховатость поверхности в сочетании с другими ее характеристиками (цветом поверхности, степенью отражательной способности) является наряду с точностью формы одной из основных характеристик ее качества. Шероховатость поверхности оценивается по неровностям профиля (рис. 7.4), получаемого путем сечения реальной поверхности плоскостью (обычно в нормальном сечении к направлению шероховатости).

Согласно ГОСТ 2789-73 шероховатость определяется следующими параметрами:

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля;

R_z – высота неровностей профиля по десяти точкам;

$R_{\max}$ – наибольшая высота неровностей профиля;

S_m – средний шаг неровностей по средней линии;

S – средний шаг неровностей по вершинам;

t_p – относительная опорная длина профиля, где p – значение уровня сечения профиля.

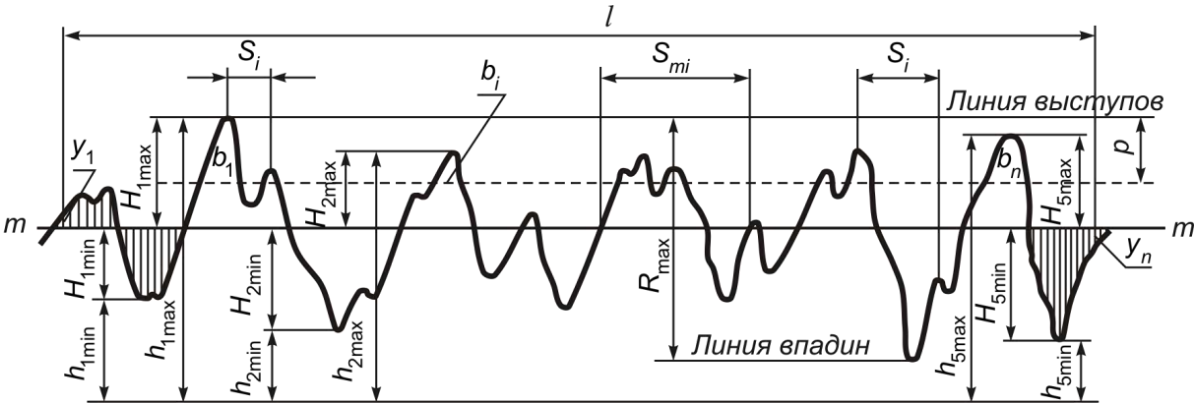


Рисунок 7.4 – Параметры шероховатости поверхности

В ряде случаев большое значение имеет направление неровностей на обработанной поверхности детали, которое устанавливается в технических условиях и обозначается на чертежах.

На эксплуатационные показатели поверхности детали оказывают влияние и другие параметры шероховатости, не предусмотренные ДСТУ (ГОСТ): радиусы закругления вершин и впадин, углы наклона образующих неровностей и др. Но в большинстве случаев достаточно знание только одного параметра R_a или R_z. Шероховатость обработанной поверхности характеризуется высотой и формой микронеровностей. При ее изучении принято рассматривать расчетные неровности и действительные.

Наростообразование резко ухудшает шероховатость поверхности из-за неустойчивого состояния нароста. На обработанной поверхности остаются задиры и частички разрушенного нароста. Поэтому для улучшения шероховатости поверхности необходимо изменять условия резания с целью снижения наростообразования или выхода из температурной зоны, где оно происходит.

Скорость резания на высоту неровностей влияет по-разному в зависимости от того, склонен или нет обрабатываемый материал к наростообразованию. Если материал не склонен к наростообразованию, то по мере увеличения скорости резания высота неровностей непрерывно уменьшается. Это связано с уменьшением объема пластической деформации и среднего коэффициента трения. Влияние скорости резания в этом случае не особенно сильно, и ее нужно увеличить в десятки раз, чтобы получить ощутимое снижение шероховатости обработанной поверхности.

Если материал склонен к наростообразованию, то высота неровностей находится в прямой зависимости от высоты нароста. При увеличении скорости резания высота нароста растет, и из-за этого растет высота неровностей, достигая максимума при наибольшем развитии нароста. Дальнейшее увеличение скорости сопровождается уменьшением нароста, R_z также уменьшается. При дальнейшем увеличении скоростях резания нарост исчезает, влияние скорости проявляется в чистом виде и высота неровностей непрерывно уменьшается. Таким образом, для получения низкой шероховатости обработанной поверхности необходимо работать со скоростями резания (температурными условиями), большими, чем скорость, соответствующая исчезновению нароста, или меньшими, когда он еще не появился.

Увеличение шероховатости с ростом ***подачи*** объясняется увеличением высоты расчетных неровностей и остаточного сечения срезаемого слоя.

Глубина резания (ширина срезаемого слоя) на высоту неровностей значительного влияния не оказывает.

Изнашивание инструмента в большинстве случаев также приводит к росту высоты микронеровностей из-за увеличения коэффициента трения на задней поверхности и пластических деформаций металла при его контакте с площадкой износа на задней поверхности.

На шероховатость обработанной поверхности существенное влияние оказывает ***жесткость технологической упругой системы резания***. Известно, что шероховатость резко увеличивается в связи с возникновением вибраций в процессе обработки.

Тонкий поверхностный слой деталей машин имеет иные механические, физические и химические свойства и напряженное состояние, чем в глубинной части металла. Глубина поверхностного слоя в зависимости от вида обработки находится в пределах от нескольких десятитысячных до сотых и десятых долей миллиметра и оказывает большое влияние на работоспособность деталей машин. Отличие свойств тонких поверхностных слоев от свойств сердцевины обусловлено суммарным влиянием механических, тепловых и физико-химических воздействий на поверхность металла при обработке резанием.

При резании пластичных материалов под действием силовых нагрузок в зоне стружкообразования и на площадке контакта с задней поверхностью происходят интенсивные пластические деформации, которые вызывают наклеп обработанной поверхности, за счет чего она упрочняется, повышается ее микротвердость и снижается пластичность. Одновременно

с упрочнением в результате выделенного при пластической деформации тепла в материале происходят процессы отпуска, вызывающие явление снижения твердости и разупрочнения.

Конечное состояние поверхностного слоя определяется соотношением процессов упрочнения и разупрочнения, зависящих от преобладания в зоне резания силового или теплового фактора. В связи с этим всякое изменение режимов резания, вызывающее увеличение усилий резания и степени пластической деформации, ведет к повышению степени наклепа. Увеличение продолжительности их воздействия на поверхностный слой приводит к увеличению глубины распространения наклепа.

Изменение режимов, приводящее к увеличению количества теплоты в зоне резания и увеличивающее продолжительность теплового воздействия, усиливает интенсивность отпуска, снимающего наклеп поверхностного слоя.

При обработке деталей в результате действия высоких температур в поверхностном слое могут происходить структурные изменения, которые приводят к вторичной закалке и образованию поверхностного слоя повышенной твердости по сравнению с основной структурой металла. С другой стороны, при обработке закаленных металлов под действием температур могут происходить процессы отпуска, снижающие исходную твердость материала.

Шероховатость оказывает большое влияние на износостойкость контактируемых деталей. Установлено, что для каждой пары трущихся поверхностей существует оптимальная величина шероховатости, которая зависит от условий нагружения контакта. В случаях, когда исходная шероховатость больше оптимальной, в процессе эксплуатации некоторое время (время приработки) наблюдается повышенный износ контактирующих поверхностей до тех пор, пока шероховатость не достигает оптимальной величины и топографии, соответствующей минимальной интенсивности изнашивания.

Тема 8
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

Лекция 1. Определение режимов резания.

Определение режимов обработки резанием является важнейшей технико-экономической задачей в области машиностроения. Обычно она решается на основе двух подходов:

- определение режимов резания на основе приближенных расчетов с применением справочников;
- оптимизация режимов резания по какому-либо критерию оптимальности; оптимальность режимов резания может определяться производительностью, экономичностью или точностью обработки, качеством поверхностного слоя и эксплуатационной надежностью и долговечностью деталей машин.

Поскольку режим резания характеризуется тремя параметрами – скоростью резания, глубиной и подачей, то задача их определения одновременно предполагает решение вопроса о применяемом на данной операции режущем инструменте и оборудовании, на котором резание осуществляется.

Определение режимов резания может осуществляться тремя методами.

1. Экспериментальный метод. Проведением опытов (как правило, стойкостных) находят параметры режима резания, которые могут быть применены при выполнении данной операции. Вполне очевидно, что при данном методе найденный режим резания не будет оптимальным.

2. Использование накопленного опыта. При этом определение режимов резания может осуществляться двумя способами: выбор режимов резания с помощью нормативной справочной литературы (табличный способ) и расчет режимов резания с помощью эмпирических формул, которые являются результатом математической обработки данных накопленного опыта. Такой способ называется аналитическим. В то же время, накопленные данные (банки данных) не могут учитывать все возможные условия резания в конкретной операции, тем более при появлении новых обрабатываемых и инструментальных материалов, конструкций инструментов и др. Данный метод имеет низкую надежность оптимизации режимов обработки и требует отладки результатов расчета непосредственно на станке.

3. Расчет режимов резания с использованием теоретических (физических) прогнозирующих моделей процесса резания. Данный метод в пер-

спективе будет наиболее общим и точным и позволит получить действительно оптимальные режимы резания.

Одной из наиболее важных задач является последовательность выбора (определения) скорости резания, подачи и глубины резания, которая позволяет получить наилучший результат. Например, в условиях серийного производства очень важной характеристикой является производительность обработки резанием Q, которая определяется объемом снимаемого материала за единицу времени:

$$Q = VSt.$$

Как видно из этой формулы, V, S и t влияют на производительность одинаково. Все равно, с чего начинать и какой параметр режима резания увеличивать. В то же время, как было показано ранее, V, S и t по-разному влияют на температуру резания, интенсивность износа и стойкость режущего инструмента. Это хорошо видно из формулы для периода стойкости инструмента:

$$T = \frac{C_4}{V^{m1} S^{q} t^{p}},$$

где $m_1 > q > p$.

Именно это соотношение как раз и показывает, что меньше всего на температуру резания и, следовательно, на интенсивность износа режущего инструмента влияет изменение глубины резания. Затем по порядку идет изменение подачи и больше всех на температуру и интенсивность износа влияет изменение скорости резания.

Поэтому при равном влиянии на производительность резания первым (максимально большим) должен назначаться тот параметр, увеличение которого мало сказывается на стойкости инструмента, т. е. глубина резания – t. Второй, исходя из этого принципа, назначается подача, а последней – определяется скорость резания. В некоторых случаях V и S назначаются одновременно (так называемая двухпараметрическая оптимизация) при выполнении всех накладываемых на S ограничений.

Для расчета режима резания необходимы следующие исходные данные, выбираемые из чертежей заготовки и детали, а также с учетом особенностей обработки на данном оборудовании:

1) марка обрабатываемого материала и его прочностные характеристики: для сталей – предел прочности R_m или твердость НВ (HRC), для

чугунов – твердость НВ; способ получения заготовки (штамповка, поковка, литье, прокат), состояние поверхности заготовки (литейная корка, окалина после горячей прокатки, штамповки и т. п.);

2) размеры заготовки и обработанной детали;

3) требуемая точность (квалитет) и шероховатость обработанной поверхности, свойства поверхностного слоя;

4) метод крепления заготовки: в патроне, в центрах, в патроне с поджатием свободного торца центром задней бабки (для станков токарной группы); на столе или в приспособлении (для сверлильных и фрезерных станков). Например, при точении жестких заготовок (т. е. при отношении длины заготовки к ее диаметру $L/d \leq 6$) крепление осуществляется в патроне, при обработке недостаточно жестких заготовок ($6 < L/d \leq 12$) – либо в двух центрах, либо в патроне и центре; при обработке нежестких заготовок ($L/d > 12$) – в центрах с установкой люнета.

В зависимости от операции (точение, сверление, фрезерование) выбирается тип и модель станка. Модель станка выбирается с учетом габаритных размеров заготовки и обрабатываемых поверхностей. Для проверочных расчетов режимов резания необходимы следующие паспортные данные станка:

1) ряд частот вращения шпинделя (при дискретном регулировании);

2) ряд подач (при дискретном регулировании);

3) наибольшее допустимое усилие подачи;

4) мощность привода главного движения;

5) КПД привода главного движения станка.

Указанные данные приводятся в паспортах станков, справочной и методической литературе.

При обработке на современных станках рекомендуется использовать составные или сборные конструкции режущих инструментов, у которых изготавливают: рабочую (режущую) часть – из инструментального материала, крепежную – из обычных конструкционных материалов. Исключение составляют мелкоразмерные и слесарные инструменты, изготовляемые цельными из инструментального материала, а также инструменты, выполняемые из углеродистых и легированных инструментальных сталей.

Твердые сплавы в виде пластин соединяют с крепежной частью с помощью напайки или специальных высокотемпературных клеев. Многогранные твердосплавные и минералокерамические неперетачиваемые пластины закрепляют механическим способом. Мелкоразмерные твердосплавные инструменты (концевые и дисковые фрезы, сверла, зенкеры,

развертки и др.) изготовляют в виде припаиваемых к хвостикам твердосплавных стержней, вставок и коронок, или цельными.

Оптимальную марку твердого сплава из рекомендуемых следует выбирать с учетом условий обработки на каждой конкретной операции. При этом предпочтение следует отдавать инструменту со сменными неперетачиваемыми пластинами, что позволяет применять более износостойкие твердые сплавы с покрытиями, которые эффективны для большинства распространенных видов обработки резанием конструкционных и низколегированных сталей и чугунов.

В современных условиях следует более широко применять инструменты из минералокерамики и оснащенные СТМ.

Поскольку глубина резания t менее всего влияет на стойкость инструмента, ее следует назначать возможно большей, чтобы срезать припуск за наименьшее число проходов. При черновой (предварительной) обработке назначают глубину резания, равную всему припуску на обработку или большей его части; при чистовой (окончательной) обработке – в зависимости от требований к точности размеров и шероховатости обработанной поверхности.

Во многих случаях период стойкости можно назначить согласно рекомендациям справочников в зависимости от характера выполняемой операции, инструментального материала, конструктивных элементов инструмента и т. п. При выборе периода стойкости могут быть два варианта:

1) принять большую величину T, редко переналаживать станок и перетачивать инструмент, но работать с малой скоростью, а, значит, с малой производительностью резания;

2) принять малую величину периода стойкости, работать с большой скоростью резания, но часто переналаживать станок и перетачивать инструмент; определить, какой из вариантов является более выгодным можно, только задавшись дополнительными критериями оптимизации.

Определение оптимальных режимов резания может осуществляться исходя из следующих дополнительных критериев оптимизации:

1) минимум переменной доли себестоимости (так называемый экономический критерий);

2) максимум производительности обработки (по минимуму машинного времени);

3) максимум получаемой прибыли (с учетом состояния рынка производимых изделий);

4) максимальное количество деталей, обработанных инструментом за один его период стойкости;

5) максимальное количество деталей, обработанных инструментом за полный срок его службы с учетом всех его переточек.

Эти критерии определяют значения соответствующих стойкостей: экономической стойкости, стойкости максимальной производительности и стойкости максимальной прибыли.

Лекция 2. Аналитический и табличный способы расчета режима резания

1. ***Выбор подачи.*** Значение подачи выбирается в зависимости от вида и условий обработки (черновая или чистовая), глубины резания и диаметра обработки по формулам или таблицам рекомендуемых значений подач из соответствующей нормативно-справочной литературы. При этом обязательно учитываются технологические ограничения:

- при черновой обработке подача на оборот (подача на зуб при фрезеровании) устанавливается с учетом жесткости технологической станочной системы, прочности заготовки, способа ее крепления, прочности и жесткости рабочей и крепежной частей режущего инструмента, прочности механизма подачи станка, а также установленной глубины резания; из всех подач, определяемых этими условиями, выбирается минимальная;
- при чистовой обработке величину подачи необходимо согласовывать с заданной шероховатостью обработанной поверхности и квалитетом точности, учитывая при этом возможный прогиб детали под действием сил резания и погрешности геометрической формы обработанной поверхности; как правило, для всех способов чистовой обработки регламентируется подача на оборот инструмента или заготовки.

Таблицы рекомендованных подач составлены для общих случаев, но в них приведены поправочные коэффициенты для конкретной операции (например, поправка на обрабатываемый материал и материал режущей части инструмента, на состояние обрабатываемой поверхности и др.).

После выбора нормативной подачи производят проверочные расчеты. Например, подачу, выбранную для чернового точения с заданной глубиной резания, проверяют по прочности механизма подачи станка. При этом определяют для данного перехода силу подачи и сопоставляют ее с силой,

допускаемой механизмом подачи станка, которая указывается в его паспорте:

$$P_x = C_{Px} t^{xPx} S^{yPx} K_{Px} \le P_{\text{ст}}$$

или

$$S_{\text{д.ст}} \le [P_{\text{в}} / C_{Px} t^{xPx} S^{yPx} K_{P_x}]^{\frac{1}{y\,Px}}.$$

Количество таких проверок может быть несколько. Если выбранная подача не удовлетворяет условиям прочности или жесткости, необходимо ее понизить до допустимой.

Следует отметить, что силу резания можно было бы уменьшить и уменьшением глубины резания, которая влияет на нее более значительно. Тем не менее, уменьшают именно подачу, так как при уменьшении глубины сразу появляется необходимость во втором проходе и возрастает время обработки. Кроме того, глубина резания только в малой степени влияет на изменение периода стойкости инструмента или допустимую скорость, тогда как при уменьшении подачи период стойкости или скорость возрастают более существенно.

Необходимо отметить, что на практике проверочные расчеты по формулам выполняются сравнительно редко ввиду их сложности. В случае необходимости используются таблицы предельно допустимых подач, приводимые в ряде справочников, выбирая из рекомендуемых ими минимальную.

Если механизмом станка обеспечивается бесступенчатое регулирование подачи, для дальнейших расчетов принимается рекомендованное значение. В противном случае подача на оборот корректируется по паспортным данным станка. Принимается в качестве действительного ближайшее меньшее значение или большее, если оно не превышает рекомендованное, более чем на 5 %.

2. ***Определение скорости резания и числа оборотов.*** По формулам рассчитывается скорость резания в зависимости от вида обработки:

- при точении

$$V = \frac{C_V}{T^{mV} S^{yV} t^{xV}} k_V,$$

где $k_V = k_{\text{м}V} k_{\text{п}V} k_{\text{и}V} k_{\varphi V} k_{rV} k_{\varphi_1 V}$ (два последних коэффициента учитываются лишь для инструментов из быстрорежущей стали); (при строгании

используется та же формула, но вводится дополнительный коэффициент $k_{пр}$, который учитывает прерывистый характер обработки);

- при сверлении (параметр t не учитывается) и рассверливании

$$V = \frac{C_V D^{qV}}{T^{mV} S^{yV} t^{xV}} k_V,$$

где $k_V = k_{мV} k_{пV} k_{иV} k_{lV}$.

- при фрезеровании

$$V = \frac{C_V D^{qV}}{T^{mV} S_z^{yV} t^{xV} B^{иV} Z^{PV}} k_V,$$

где $k_V = k_{мV} k_{пV} k_{иV}$.

Затем по формуле $n = 1000V/\pi D_{max}$ – рассчитывается число оборотов n, которое корректируется по станку только в меньшую сторону и принимается в качестве действительного (D_{max} – максимальный диаметр соответствующей поверхности. Например, для растачивания – диаметр отверстия детали, для обтачивания – диаметр заготовки).

После этого определяется действительная скорость резания. Если станок оснащен бесступенчатым регулированием числа оборотов шпинделя, принимается рекомендованное значение. Для операций фрезерования по формулам $S = S_z \cdot z$ и $S_{мин} = Sn = S_z zn$ определяют подачу на оборот и минутную подачу которую корректируют по паспортным данным коробки подач фрезерного станка (как правило, в меньшую сторону). Принятое значение $S_{мин}$ используется для расчета действительной подачи на зуб фрезы:

$$S_{zд} = \frac{S_{мин}}{nz}.$$

3. ***При черновой обработке*** производится определение ***силы и мощности*** по степенным формулам:

- при точении и фрезеровании – $N_P = P_z V_д / (1000 \cdot 60)$,
- при сверлении и рассверливании – $N_p = M_{кр} n_д / 9750$.

Если окажется, что мощности электродвигателя станка, на котором должна производиться обработка, не достаточно (с учетом КПД станка), надо выбрать более мощный станок. Если это невозможно, необходимо уменьшить выбранные значения n (V) или S. Уменьшение n (V) является более выгодным, так как машинное время будет такое же, как и при уменьшении S, но зато период стойкости инструмента значительно возрастет.

4. ***Определение машинного (основного) времени.*** Машинное (основное) время тратится на непосредственное изменение размеров, формы, физико-химических свойств или внешнего вида обрабатываемой заготовки. При обработке на металлорежущих станках машинное время рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{м}} = \frac{L_{\text{р.х}}}{S_{\text{мин}}} i \ ,$$

где $L_{\text{р.х}}$ – расчетная длина рабочего хода инструмента в движении подачи, мм; i – число рабочих ходов инструмента (число проходов); $S_{\text{мин}}$ – скорость движения подачи V_S (минутная подача), мм/мин.

Если при обработке регламентируется подача на оборот заготовки или инструмента, то эта формула запишется в виде:

$$\tau_{\text{м}} = \frac{L_{\text{р.х}}}{nS} i \ .$$

Особенности расчета основного (машинного) времени обусловлены, главным образом, определением расчетной длины обработки (рис. 8.1):

$$L_{\text{р.х}} = l + l_{\text{вр}} + l_{\text{п}} + l_{\text{пв}} \ ,$$

где l – длина обрабатываемой поверхности; $l_{\text{вр}}$ – величина врезания и $l_{\text{п}}$ – величина перебега инструмента. В некоторых случаях при обработке на автоматизированном оборудовании добавляется гарантированная величина $l_{\text{пв}}$ подвода инструмента с механической подачей. Для ручного подвода $l_{\text{пв}} = 0$.

Значения $l_{\text{вр}}$, $l_{\text{п}}$ и $l_{\text{пв}}$ выбирают по нормативным таблицам или расчетом. В последнем случае значения $l_{\text{вр}}$ для различных видов обработки рассчитываются по формулам:

- точение, рассверливание, зенкерование (рис. 8.1 *а*):

$$l_{\text{вр}} = t \ / \ \text{tg}\varphi;$$

• цилиндрическое фрезерование (рис. 8.1 *б*):

$$l_{вр} = \sqrt{t(D - t)} \ ;$$

• торцевое симметричное фрезерование (рис. 8.1 *в*):

$$l_{вр} = 0{,}5\left(D - \sqrt{D^2 - B^2}\right);$$

• сверление (рис. 8.1 *г*)

$$l_{вр} = 0{,}5D/\mathrm{tg}\varphi,$$

где D – диаметр фрезы или сверла, мм; B – ширина фрезерования, мм

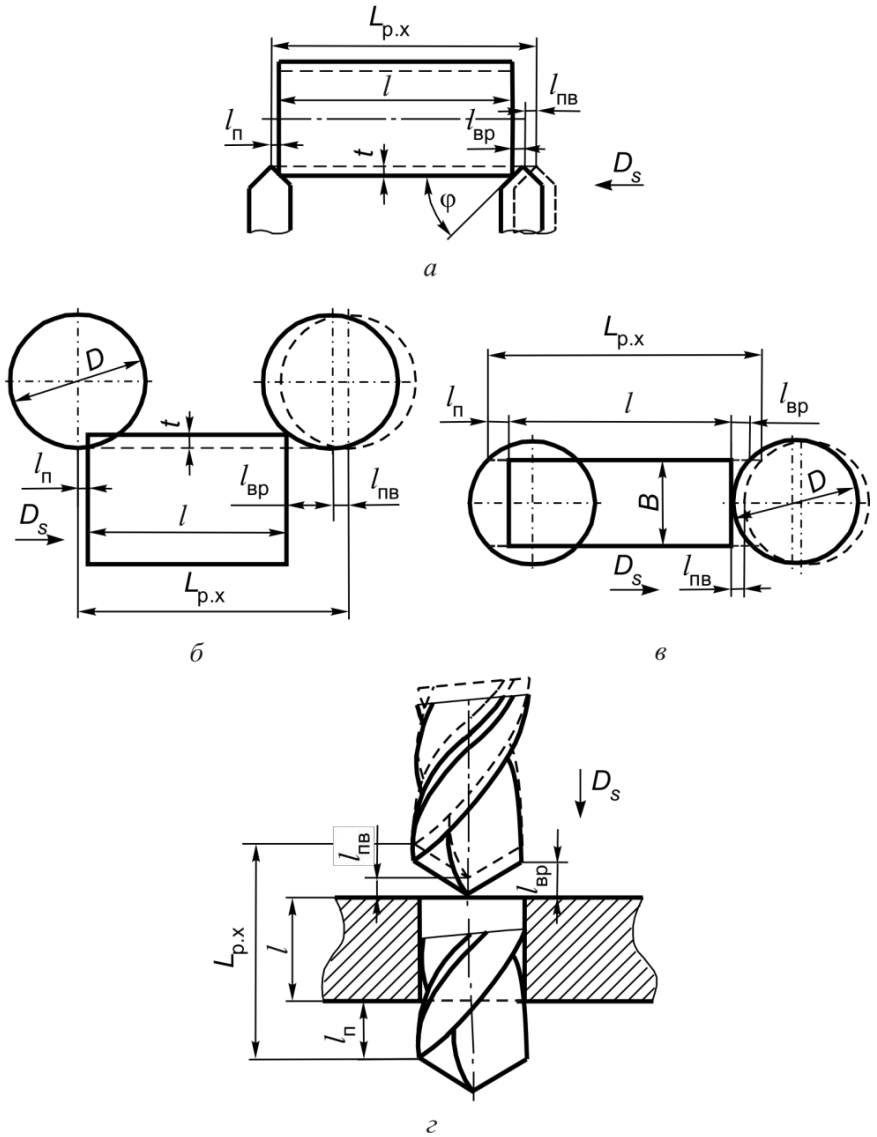


Рисунок 8.1 – Схемы для определения рабочего хода инструмента при точении (*а*), фрезеровании (*б*, *в*) и сверлении (*г*)

Величина перебега принимается в общем 2…3 мм, кроме специальных случаев обработки:

- при обработке в упор или сверлении глухого отверстия принимают $l_п = 0$;
- при чистовом торцевом фрезеровании – $l_п = D + (2…5)$, мм.

Аналитический способ определения оптимальных режимов резания для каждой операции весьма трудоемок и в настоящее время реализуется преимущественно на ЭВМ. Табличный способ решения этой задачи появился ранее других способов в виде рекомендаций оптимальных с точки зрения опытных специалистов режимов резания. Анализ показал, что практически все предприятия в повседневной работе используют сборники нормативов. В этих сборниках эмпирические формулы, в том числе и нестепенные зависимости, представляются в виде таблиц, составленных для различных комбинаций обрабатываемого и инструментального материалов с учетом переменных, дополнительно влияющих на процесс резания. Принцип назначения режимов резания по таблицам тот же, что и при расчете по эмпирическим формулам, но более прост с точки зрения вычислительных процедур и более громоздок с точки зрения накопления и хранения информации, необходимой для выбора режима обработки, и недостаточно гибок при назначении режимов резания для новых или специфичных производственных условий.

Использование на производстве для расчета режимов резания и норм времени с учетом централизованно разработанных нормативов позволяет значительно сократить разнобой в нормах и заработной плате и обеспечить приблизительно одинаковый уровень напряженности норм на различных предприятиях. Однако необходимо учитывать, что общемашиностроительные нормативы обеспечивают только предпосылки для установления норм равной напряженности, но не гарантируют их выполнение. Кроме того, на многих предприятиях применяется ряд специфических обрабатываемых материалов и режущих инструментов, в том числе и новых, что требует применение либо других методов назначения режимов резания, либо дополнительной разработки нормативов силами заводских лабораторий и нормативно-исследовательских бюро.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

Тема 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРИИ РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ 8

Лекция 1. Классификация основных способов и видов обработки резанием 8

Лекция 2. Элементы конструкции и геометрические параметры режущей части инструмента (на примере токарного резца) 15

Лекция 3. Элементы режима резания и параметры сечения срезаемого слоя 25

Тема 2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ 38

Лекция 1. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам 38

Лекция 2. Инструментальные стали 39

Лекция 3. Твердые сплавы 45

Лекция 4. Режущая керамика 56

Лекция 5. Сверхтвердые материалы инструментального назначения 58

Лекция 6. Инструментальные материалы с износостойкими покрытиями 64

Лекция 7. Абразивные материалы и инструменты 66

Тема 3. ОСНОВЫ ФИЗИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ 75

Лекция 1. Некоторые сведения о пластической деформации металлов 75

Лекция 2. Типы стружек при резании пластичных и хрупких материалов 79

Лекция 3. Процесс образования сливной стружки при свободном прямоугольном резании. Определение степени деформации стружки 81

Лекция 4. Схема образования элементной стружки 85

Лекция 5. Трибология процесса резания материалов. Наростообразование 87

Тема 4. СИЛА И МОЩНОСТЬ ПРИ РЕЗАНИИ 95

Лекция 1. Система сил при резании 95

Лекция 2. Закономерности влияния условий резания на его силу и мощность 102

Тема 5. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ 110
Лекция 1. Источники выделения теплоты и ее баланс при резании материалов 110
Лекция 2. Экспериментальные методы исследования тепловых процессов при резании 112
Лекция 3. Влияние на температуру основных факторов процесса резания 118
Тема 6. РАЗРУШЕНИЕ И ИЗНАШИВАНИЕ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТОВ. СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТОВ 123
Лекция 1. Работоспособность инструментов 123
Лекция 2. Стойкость инструмента и скорость резания, допускаемая его режущими свойствами 138
Тема 7. КАЧЕСТВО ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ 142
Лекция 1. Качество обработанной поверхности 142
Тема 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ 148
Лекция 1. Определение режимов резания 148
Лекция 2. Аналитический и табличный способы расчета режима резания 152