

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Утверждаю

Директор ИК

_____ Захарова А.А.

« » _____ 2014 г.

РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Методические пособие по дисциплине
«Резание материалов и режущий инструмент»
для студентов, обучающихся по направлению 150700 «Машиностроение»

Томск 2014

УДК 621.9.01:681.5

Резание материалов и режущий инструмент

Методические пособие по дисциплине «Резание материалов и режущий инструмент» для студентов, обучающихся по направлению 150700 «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств».- Томск: Изд. ТПУ, 2014.-131 с.

Составители

доц., к.т.н. В.Н. Козлов

Рецензент

доц., канд. техн. наук В.Ф. Скворцов

Методическое пособие рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры «Технология автоматизированного машиностроительного производства»

«_____» _____ 2014 г.

Зав. кафедрой

доц., канд. техн. наук

А.Ю. Арляпов

Раздел 1. Общие сведения о резании материалов

1.1. Роль обработки металлов резанием в машиностроении, повышении качества и надёжности работы деталей и механизмов

Изготовление деталей машин может выполняться различными методами. Наиболее быстрыми методами получения деталей являются различные способы литья и методы пластического деформирования: штамповка, прокатка, ковка и др. Однако точность деталей при этом, как правило, невысока, поэтому эти методы используются, в основном, для получения заготовок, которые затем обрабатываются на станках. В некоторых случаях сложные заготовки получают сваркой относительно простых заготовок, а затем эта сварная заготовка обрабатывается для повышения точности отдельных поверхностей и их расположения относительно друг друга.

Методы обработки делятся на механические и немеханические, с использованием электрической, химической, световой, лучевой и других видов энергии. Могут применяться и комбинированные способы, увеличивающие производительность обработки, уменьшающие износ инструмента, улучшающие качество и долговечность детали, например, электроабразивная обработка.

Механическая обработка заготовок производится, в основном, с удалением слоя материала. **Обработка резанием** – это технологический процесс изготовления деталей, заключающийся в образовании новых поверхностей отделением поверхностных слоев материала с образованием стружки. В свою очередь обработка резанием делится на **лезвийную** и **не лезвийную**. При лезвийной обработке геометрия режущего инструмента строго определена и мало изменяется в процессе обработки. **Лезвийная обработка** может выполняться с использованием резцов, свёрл, зенкеров, фрез, протяжек и других многокромочных режущих инструментов.

Не лезвийная (абразивная) обработка в свою очередь разделяется на обработку связанными абразивами (шлифовальными кругами, брусками, наждачной шкуркой и т.п.) и не связанными абразивами (притирка и полирование с использованием абразивных паст и порошков).

При абразивной обработке в качестве режущего инструмента используются инструменты, состоящие из большого количества абразивных зёрен, геометрические параметры которых изменяются в широких пределах, углы резания зависят от положения зерна и не предсказуемы, к тому же в процессе обработки они быстро изменяются из-за износа, поэтому оперируют статистическими исследованиями. Процессы, происходящие при абразивной обработке, во многом сходны с процессами при лезвийной, а последняя может быть изучена более достоверно и более простыми способами.

К механической обработке относятся также методы пластического деформирования: дорнование, выглаживание и др., при которых удаление металла не происходит, но изменяются размеры обрабатываемой поверхности, её шероховатость, твёрдость и др. параметры поверхностного

слоя.

Широкое применение обработки резанием в машиностроении обусловлено следующими ее основными достоинствами: 1) высокие точность размеров, формы и качества обработанных поверхностей деталей; 2) универсальность и технологическая гибкость производства; 3) минимальные затраты на оснастку; 4) благоприятные условия для автоматизации производства; 5) относительно невысокая энергоемкость, значительно меньшая, чем при других способах обработки [4].

1.2. Кинематические схемы обработки заготовок

Резание происходит путем внедрения в обрабатываемую заготовку *клинообразного твердого тела* – режущей части инструмента, движение которого осуществляется под действием сил привода станка. В зоне соприкосновения режущего клина инструмента и срезаемого слоя заготовки происходит сложный процесс пластического деформирования и разрушения металла, приводящий к образованию стружки и отделению её от заготовки.

Для осуществления резания необходимо относительное движение между заготовкой и режущим инструментом. Совокупность относительных движений инструмента и заготовки, необходимых для получения заданной поверхности, называют *кинематической схемой обработки* (рис. 1.1).

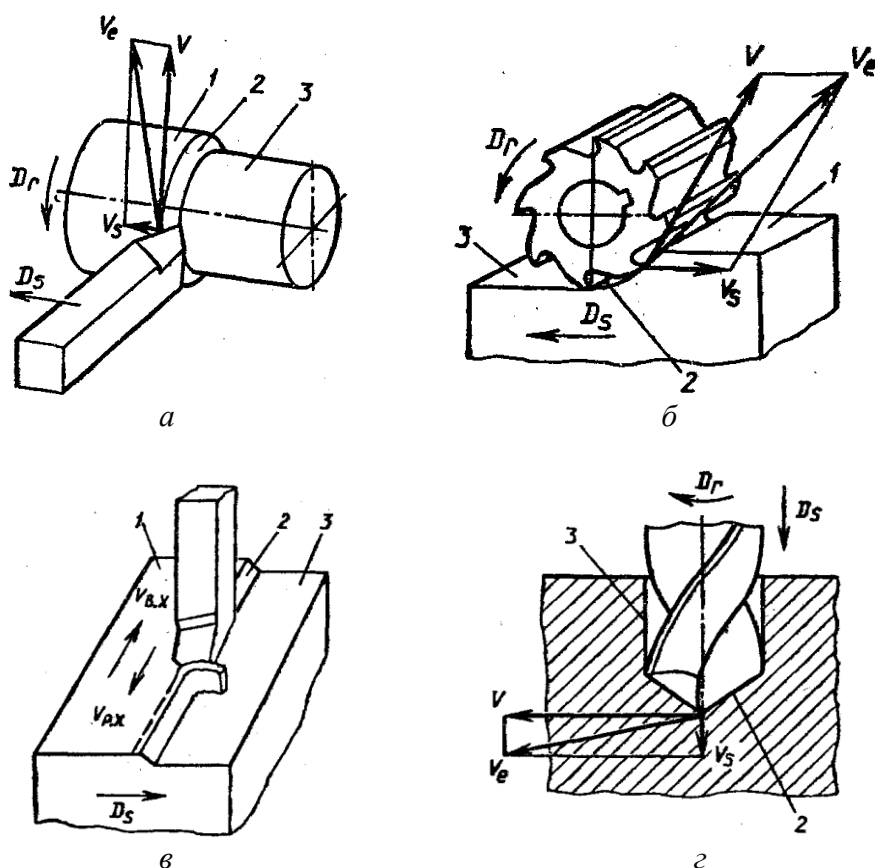


Рис. 1.1. Кинематические схемы обработки заготовок:
а – точением; б – фрезерованием; в – строганием; г – сверлением

При токарной обработке все принципиальные схемы обработки резанием основаны на сочетании двух элементарных движений – вращательного и прямолинейного. Вращательное движение заготовки и поступательное движение резца, параллельное оси вращения заготовки,

образуют суммарное движение резания по винтовой спирали (рис. 1.1, *a*).

Прямолинейное поступательное или вращательное движение инструмента или заготовки, происходящее с **наибольшей скоростью** в процессе резания и определяющее скорость снятия материала срезаемого слоя, называют **главным движением резания D_r** (ГОСТ 25762—83). **Скорость главного движения** обозначают буквой V (v).

Прямолинейное поступательное или вращательное движение инструмента или заготовки, скорость которого меньше скорости главного движения резания, предназначенное для того, чтобы распространить отделение слоя материала на всю обрабатываемую поверхность, называют **движением подачи D_s** (рис. 1.1, *a*). Скорость движения подачи обозначают буквой v_s (s). Результирующее движение резания D_e является суммой векторов двух движений: главного движения резания D_r и движения подачи D_s .

У фрезерных станков главным движением является вращательное движение инструмента, а движение подачи сообщается, как правило, заготовке (рис. 1.1, *б*); у строгальных станков оба движения являются поступательными (рис. 1.1, *в*); у сверлильных станков оба движения сообщаются инструменту (рис. 1.1, *г*).

На обрабатываемой заготовке различают три поверхности: **обработанную** (3), образованную на заготовке в результате обработки; **обрабатываемую**, подлежащую воздействию в процессе обработки (1); **поверхность резания** (2), образуемую режущей кромкой инструмента в результирующем движении резания (рис. 1.1, *a – в*).

1.3. Виды стружки и её влияние на качество обработанной поверхности

В процессе резания происходит удаление материала с поверхности заготовки в виде стружки. По виду стружки можно судить о процессах, происходящих в зоне резания у режущей кромки инструмента и влияющих на качество обработанной поверхности детали и её долговечность, поэтому изучению стружки уделяется большое внимание.

Вид стружки определяется физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, режимом резания и геометрическими параметрами инструмента. Различают следующие виды (типы) стружки: сливная, элементная, суставчатая, надлома и отрыва (рис. 1.2).

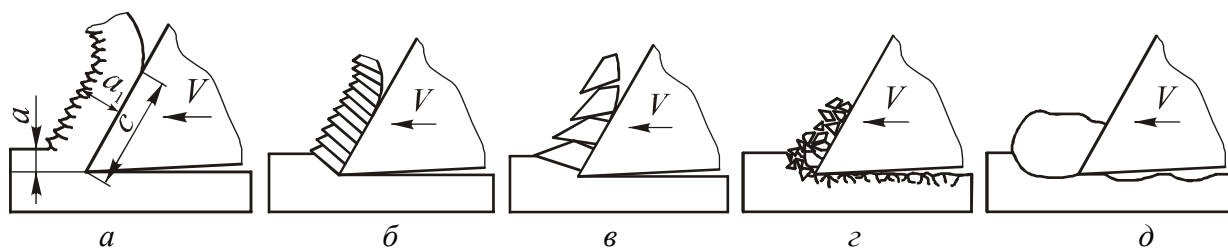


Рис. 1.2. Виды стружки: *a* – сливная, *б* – суставчатая, *в* – элементная, *г* – надлома, *д* – отрыва.

Сливная стружка (см. рис. 1.2, *a*) представляет собой сплошную ленту

с гладкой блестящей наружной (прирезцовой) стороной. Внутренняя сторона стружки матовая со слабо выраженными пилообразными зазубринами. Она образуется при резании пластичных материалов (незакалённая сталь, медь и т.п.) с большими скоростями резания, с малой толщиной срезаемого слоя и с большими передними углами инструмента. На обработанной поверхности заготовки не остаются надрезы и другие дефекты, поэтому при обработке стараются добиться этого вида стружки.

Недостатком появления сливной стружки является то, что образующаяся при токарной обработке большинства сталей сливная стружка сходит в виде длинных полос или спирали. Она наматывается на механизмы станка, на инструмент и обрабатываемую заготовку. Это затрудняет эксплуатацию станка, может вызвать травму рабочего и повреждение обработанной поверхности. Особенно недопустима такая стружка в условиях автоматизированного производства. Трудность удаления из зоны резания приводит к необходимости время от времени прекращать рабочую подачу, а иногда и останавливать обработку и удалять образовавшийся моток стружки. Чтобы уменьшить этот недостаток применяют специальную заточку инструмента, при которой происходит завивание и периодическая поломка стружки, используют накладные стружколомы, подают смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ) или воздух с большим напором для поломки стружки и др.

Стружка скалывания с наружной стороны (прирезцовой части) гладкая, а на внутренней имеет ярко выраженные зазубрины — отдельные элементы слабо связаны друг с другом или вообще не связаны (рис. 1.2, б, в).

Если элементы плотно соединены между собой в ленту, то такую стружку называют **суставчатой**, или псевдосливной (рис. 1.2, б). Стружка в последнем случае сравнительно легко ломается, поэтому этот вид стружки наиболее предпочтителен при обработке. Такая стружка характерна для обработки материалов средней твердости, при малых скоростях резания, с большей толщиной срезаемого слоя и небольшими передними углами.

При обработке хрупких материалов (чугун) образуется типичная **элементная стружка**, у которой элементы не связаны друг с другом (рис. 1.2, в). Такая стружка может забиваться в приспособление, на направляющие поверхности станка, а на обработанной поверхности могут появляться надрезы, уменьшающие прочность детали.

Стружка надлома (рис. 1.2, з) образуется при обработке очень хрупких материалов (фарфор, камень). Под действием силы, приложенной к инструменту, происходит надлом и разрушение материала. Образуются мелкие разнообразных форм и размеров кусочки, не связанные или слабо связанные между собой, трещины могут далеко уходить в поверхность заготовки. Обработанная поверхность при образовании такой стружки получается шероховатой, с зазубринами и вырывами, поэтому по возможности стараются избегать такого вида стружки.

Стружка отрыва (рис. 1.2, д) образуется при обработке очень пластичных материалов. Плавного схода с передней поверхности не получается, поэтому сначала нарастает ком из удаляемого материала у режущей кромке, а затем происходит его отрыв, приводящий к вырыву из поверхности заготовки. На обработанной поверхности образуются рытвины,

сила резания в период нарастания кома увеличивается настолько, что порой приводит к поломке инструмента или повреждению обрабатываемой заготовки.

Изменяя условия и режим резания, можно получить различные виды стружек. Например, при резании меди обычно образуется сливная стружка, а при глубоком охлаждении – стружка надлома, при резании твердых и хрупких материалов с подогревом – стружка скалывания. По мере увеличения скорости резания большинства углеродистых и легированных конструкционных сталей стружка скалывания превращается в сливную. Повышение скорости резания при обработке хрупких материалов также приводит к упрочнению связей между отдельными элементами. Однако это сцепление легко нарушается и стружка, имевшая вид сливной, рассыпается на отдельные кусочки.

1.4. Свободное и несвободное резание

При изучении процесса резания различают **прямоугольное** резание, когда режущая кромка перпендикулярна направлению скорости резания (рис. 1.3, а), и **косогольное**, когда имеется угол, отличный от 90° (рис. 1.3, б).

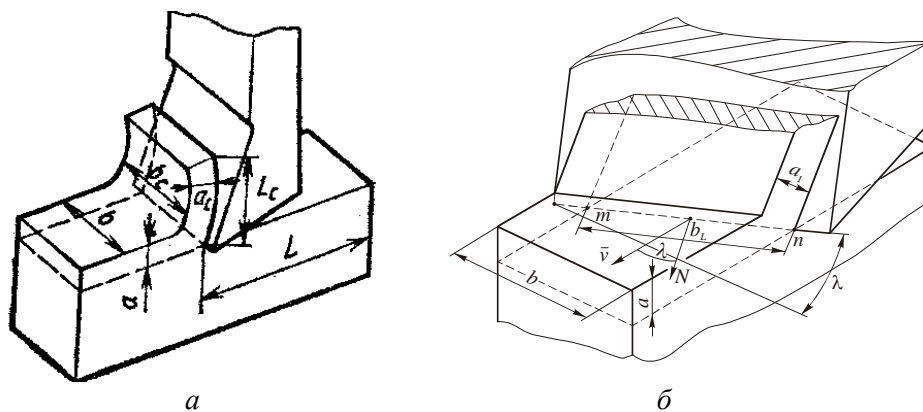


Рис. 1.3. Пример прямоугольного (а) и косогольного (б) свободного резания при строгании полосы

Кроме этого различают свободное и несвободное резание. При **свободном** резании с поверхностью резания контактирует только главная режущая кромка, например при строгании полосы резцом, ширина режущей кромки которого больше ширины полосы (рис. 1.3 а, б).

Свободное прямоугольное резание реализуется также при обточке периферии диска резцом, ширина режущей кромки которого больше ширины диска, а режущая кромка перпендикулярна направлению поперечной подачи (рис. 1.3 б).

При обточке торца трубы резцом, ширина режущей кромки которого больше толщины стенки трубы, тоже реализуется свободное резание. Если режущая кромка резца перпендикулярна направлению продольной подачи, то это свободное прямоугольное резание. Если же режущая кромка резца не перпендикулярна направлению продольной подачи, то это свободное косогольное резание (рис. 1.4 а).

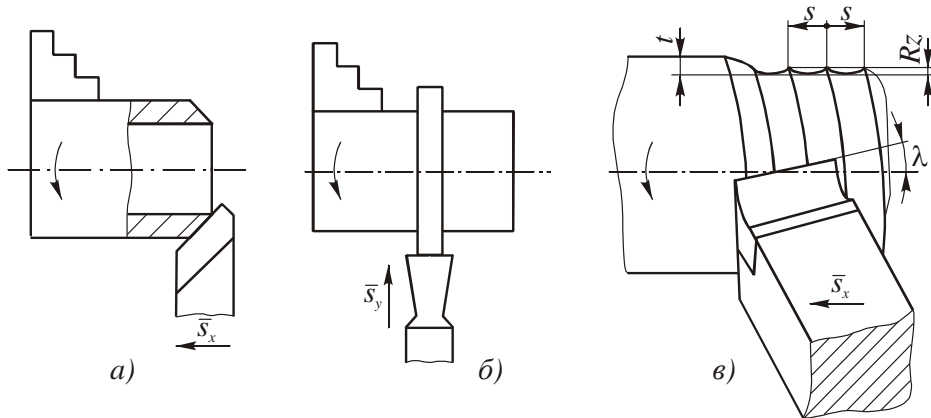


Рис. 1.4. Примеры свободного резания при точении: *a* – подрезание торца втулки; *б* – поперечное точение бурта; *в* – косоугольное чистовое точение однокромочным (безвершинным) резцом ($t \leq 1$ мм, $\lambda = 10 \dots 20^\circ$)

Прямоугольное свободное резание является наиболее удобным случаем резания для исследований. Все другие случаи, особенно косоугольное несвободное резание, более сложны для исследования, поэтому в теоретических расчётах принимаются различные допущения и поправки к прямоугольному свободному резанию для упрощения расчётов.

При прямоугольном свободном резании в любом продольном сечении, перпендикулярном главной режущей кромке, напряжённо-деформированное состояние будет одинаковым, что и используется при изучении. При обточке торца трубы широким резцом с продольной подачей (прямоугольное свободное резание) будет проявляться разная скорость резания – чем меньше внутренний диаметр трубы по сравнению с наружным диаметром, тем больше разница скорости резания. Однако при большом диаметре (более 200 мм) разница несколько миллиметров будет пренебрежимо мала при расчёте скорости резания.

Но чаще всего для исследований используется строгание полосы. Конечно, на свободной боковой поверхности полосы оно может незначительно отличаться от состояния внутри, но в целом картина будет такая же. Наблюдение за боковой поверхностью в процессе резания и видеосъёмка быстротекающих процессов позволяют получить информацию, необходимую для выработки рекомендаций по повышению качества обработанной поверхности.

При проведении исследований строгание чаще всего производится на вертикально-фрезерном станке, на столе которого установлены тисы с полосой, а резец крепится в приспособлении, жёстко закреплённом на головке станка. При продольной механической подаче стол с полосой движутся, а резец остаётся неподвижным, что упрощает наблюдение и видеосъёмку процессов в зоне резания.

Образования стружки можно проследить на примере работы строгального резца (рис. 1.5). Резец, перемещаясь относительно обрабатываемой заготовки, с силой F (P_z) вдавливается в ее поверхностный слой, подлежащий удалению (рис. 1.5, б).

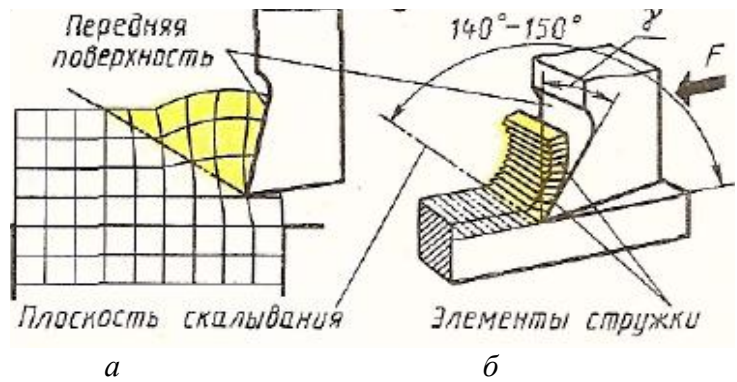


Рис. 1.5. Схема образования стружки

Под действием этой силы сначала происходит упругая деформация удаляемого слоя заготовки, а затем, по мере увеличения перемещения и силы, и пластическая деформация. Срезаемый слой деформируется, отдельные его частицы смещаются относительно друг друга (рис. 1.5, а). Чем больше главный *передний угол* γ резца (рис. 1.5, б), тем легче происходит переход срезаемого слоя в стружку и тем меньше составляющая F силы резания.

По мере продвижения инструмента деформация возрастает до тех пор, пока напряжение в деформируемом слое превысит предельно допустимое на срез, после чего происходит местное разрушение металла, т.е. скалывание кусочка деформированного металла – элемента стружки по поверхности среза (скалывания) (рис. 1.5, б). Таким образом, постепенно весь слой металла, подлежащий удалению, превращается в стружку.

Большая часть удаляемого слоя заготовки в качестве стружки скользит по передней поверхности инструмента. Гораздо меньшая часть материала у поверхности среза подминается под округлённую в результате износа режущую кромку и вминается в образующуюся обработанную поверхность.

Чем больше *радиус округления режущей кромки* ρ и толщина подминаемого слоя, тем больше степень пластической деформации (наклёпа) обработанной поверхности и его глубина. Эти параметры зависят также от обрабатываемого материала, переднего угла γ инструмента, толщины срезаемого слоя, наличия нароста на передней поверхности инструмента, свойств смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), скорости резания и других факторов.

При *несвободном* резании с поверхностью заготовки контактирует не только главная, но и вспомогательная режущая кромка (рис. 1.6, а). Вспомогательная режущая

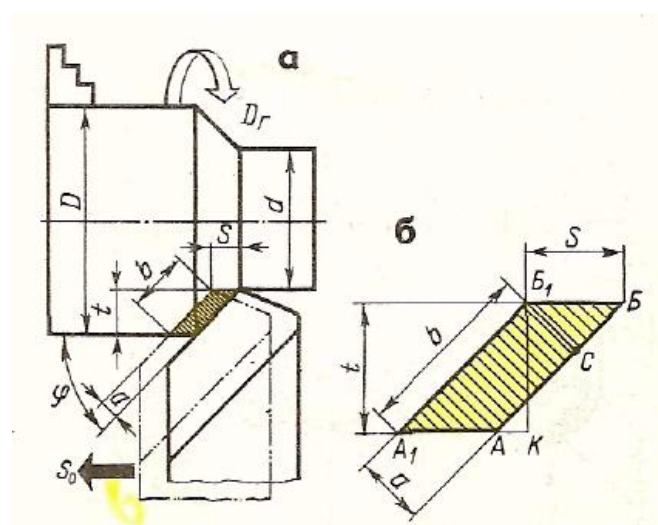


Рис. 1.6. Элементы резания при продольной токарной обработке (косоугольном несвободном резании): а – направление движений при резании; б – сечение среза

кромка будет контактировать с обработанной поверхностью на участке $B_1 \dots C$ (рис. 1.6, б). Сечение срезаемого слоя при этом будет $A-A_1-B_1-C$.

При большой глубине резания ($t \geq 3 \dots 5$ мм) и сравнительно небольшой подаче ($s \leq 0,2$ мм/об) контактные процессы рассматриваются как упрощенный случай свободного косоугольного резания. При этом срезаемый слой рассматривается как удаляемый резцом с вспомогательным углом в плане $\varphi_1 = 0^\circ$ (сечение срезаемого слоя $A-A_1-B_1-B$) (рис. 1.6, б).

Режим резания, стойкость инструмента, расход энергии на резание, шероховатость обработанной поверхности зависят от характера и степени деформирования металла, превращаемого в стружку, количества теплоты, выделяющейся при резании, температуры, возникающей на режущих кромках инструмента, сил трения, развивающихся на его гранях, и других явлений, наблюдающихся при резании металла.

На процесс резания (т.е. стружкообразование, трение, износ инструмента, тепловыделение, значение сил, необходимых при резании, и т.п.) влияют форма и наклон отдельных поверхностей режущей части инструмента относительно обрабатываемой поверхности заготовки.

1.5. Элементы режима резания и геометрические параметры срезаемого слоя

Элементами режима резания являются скорость резания, подача и глубина резания. Совокупность их значений принято называть *режимом резания*.

Скорость резания v (V) — это скорость рассматриваемой точки режущей кромки инструмента или заготовки в главном движении. Скорость резания измеряют в соответствии с системой SI в м/с, но на практике чаще в м/мин при всех видах обработки резанием, кроме шлифования и полирования, где ее измеряют в м/с.

Если главное движение резания является вращательным, то скорость резания определяют по формуле

$$v = \pi \times D \times n / 1000, \text{ [м/мин]}, \quad (1.1)$$

где D — наибольший диаметр заготовки (точение) или инструмента (шлифование, фрезерование, сверление), мм; n — частота вращения заготовки или инструмента, мин^{-1} (об/мин).

Если главное движение является возвратно-поступательным, например при строгании, то скорость резания определяют по формуле

$$v = \frac{Ln}{1000} \times (K + 1), \text{ [м/мин]}, \quad (1.2)$$

где L — длина рабочего хода резца или заготовки, мм; n — число двойных ходов резца или заготовки в минуту; K — коэффициент, характеризующий отношение скоростей рабочего и вспомогательного ходов ($K = v_{p.x.} / v_{в.х.}$).

Подача s (S) – это отношение расстояния, пройденного рассматриваемой точкой режущей кромки или заготовки в направлении движения подачи, к соответствующему числу циклов или определенных долей циклов другого движения. Под циклом движения понимают полный оборот, ход или двойной ход режущего инструмента или заготовки.

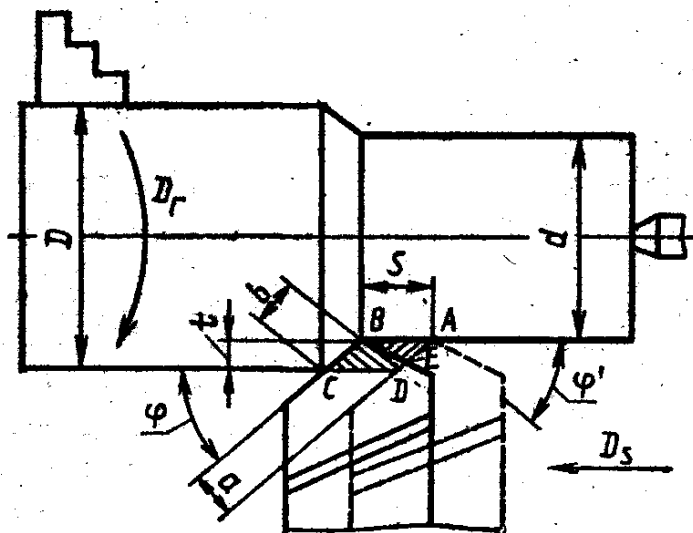


Рис. 1.7. Элементы режима резания при токарной обработке

При разных технологических методах обработки подача имеет одну из следующих единиц: **мм/об** (подача на оборот s_0) – при точении, сверлении; при фрезеровании – **мм/зуб** (подача на зуб s_z) при выборе подачи по справочнику, а при установке подачи на фрезерном станке **мм/мин** (подача за минуту $s_{мин}$); **мм/ход** (подача на ход s_x); **мм/дв. ход** (подача на двойной ход s_{2x}) – при строгании, долблении и т. д.

Например, при точении подача s характеризуется перемещением инструмента за один оборот заготовки, т.е. от точки А до точки В (рис. 1.7).

Движение подачи может быть продольным, направленным вдоль оси обрабатываемой заготовки ($D_{s пр}$); поперечным – поперек этой оси ($D_{s поп}$); наклонным – под углом к оси ($D_{s н}$) (например, при обточке конической поверхности); круговым – по окружности обрабатываемой заготовки ($D_{s кр}$) (например, при фрезеровании цилиндрического участка заготовки на фрезерном станке с ЧПУ) и др.

Глубина резания t определяется как расстояние между обрабатываемой и обработанной поверхностями заготовки, измеренное перпендикулярно к последней. Глубину резания измеряют в мм.

При точении цилиндрической поверхности глубину резания определяют как полуразность диаметров до и после обработки:

$$t = (D - d) / 2, \text{ [мм]}, \quad (1.3)$$

где D, d — соответственно диаметры заготовки и детали, мм (рис. 1.7).

На рис. 1.7 показано положение режущей кромки резца после перемещения его на расстояние, численно равное подаче. Заштрихованный участок СВAD (без учёта вспомогательного угла в плане) представляет собой **площадь срезаемого слоя f**

$$f = a \times b = s \times t, \text{ [мм}^2\text{]}, \quad (1.4)$$

где a и b – соответственно толщина и ширина срезаемого слоя, мм.

Толщина срезаемого слоя a – длина нормали (т.е. перпендикулярно к

главной режущей кромки) к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, ограниченная сечением срезаемого слоя (рис. 1.6 и 1.7).

Ширина срезаемого слоя b – это длина стороны сечения срезаемого слоя, образованной поверхностью резания (рис. 1.6 и 1.7).

Параметры s и t называются **технологическими** (производственными, т. к. устанавливаются непосредственно на станке) в отличие от параметров a и b , которые называются **физическими**, так как они непосредственно влияют на физические показатели процесса резания (температуру, силы резания и т.д.).

Между толщиной и шириной срезаемого слоя, глубиной резания и подачей существуют следующие соотношения:

$$a = s \times \sin \varphi, \text{ [мм]}, \quad (1.5)$$

$$b = t / \sin \varphi, \text{ [мм]}, \quad (1.6)$$

где φ – главный угол в плане.

Площадь срезаемого слоя $f_n = f_{ABCD}$ представляет собой площадь номинального или расчетного сечения. Действительное же сечение срезаемого слоя $f_d = f_{BCDE}$ меньше номинального сечения на величину, равную площади осевого сечения гребешков, остающихся на обработанной поверхности $f_{гр} = f_{ABE}$. Тогда действительная площадь сечения срезаемого слоя

$$f_d = f_n - f_{гр} = t \times s - s \times Rz / 2, \text{ [мм}^2\text{]}, \quad (1.7)$$

где Rz – средняя высота неровностей профиля по десяти точкам, но измеренная в мм, а не в мкм, как это используется в стандарте.

Разность между действительным и номинальным сечениями заметна лишь при больших подачах ($s > 2$ мм/об) и больших величинах вспомогательного угла в плане φ_1 (более 30°), поэтому в практических условиях площадь срезаемого слоя определяют по формуле $f = t \times s$. С **уменьшением** подачи s , углов в плане φ и φ_1 , **увеличением** радиуса кривизны при вершине резца R (r), а также при малой глубине резания t (менее 0,2 мм), высота остаточных гребешков уменьшается.

К элементам процесса резания относят также **основное время t_o** являющееся одной из составляющих штучного времени $t_{шт}$.

Штучное время – это интервал времени, равный отношению цикла технологической операции к числу одновременно изготавливаемых или ремонтируемых изделий или равный календарному времени сборочной операции (ГОСТ 3.1109—82) (время на обработку одной детали):

$$t_{шт} = t_o + t_B + t_{то} + t_{п}$$

где t_o – основное время, затрачиваемое непосредственно на осуществление технологического процесса, т. е. на изменение формы и размеров заготовки. При работе с механической подачей это время, в течение которого включена рабочая подача, даже если в это время резание не производится, например, при доходе до обрабатываемой поверхности;

t_B – вспомогательное время, необходимое на установку и закрепление заготовки, на управление станком, на отвод и подвод режущего инструмента и т. п.;

t_{TO} – время, затрачиваемое на техническое и организационное обслуживание рабочего места (переточка инструмента или смена неперетачиваемых пластин или её вершины после предельно допустимого износа, удаление стружки с установочных элементов приспособления и т. п.);

$t_{п}$ – время на личные потребности рабочего (время регламентированных перерывов, отнесенное к одной заготовке).

Известно, что в общем случае время равно пути, делённому на скорость. При резании путь – это расчетная длина l перемещения инструмента или заготовки в направлении движения подачи; скорость – это скорость движения подачи v_s . Следовательно,

$$t_o = \frac{l \times i}{v_s}, \quad (1.8)$$

где l — путь, пройденный инструментом или обрабатываемой заготовкой в направлении подачи за 1 мин; i – число рабочих ходов.

Основное время (мин) можно представить в развернутом виде

$$t_o = \frac{l \times i}{v_s} = \frac{l_o + l_1 + l_2 + l_3}{s_o \times n} \times i. \quad (1.9)$$

Здесь $l = l_o + l_1 + l_2 + l_3$, мм (рис. 1.8); l_o – размер поверхности детали, по которой осуществляется перемещение инструмента в направлении подачи, мм; l_1 ($l_{вп}$) – величина врезания инструмента, мм; l_2 ($l_{п}$) – выход инструмента (перебег), мм; l_3 ($l_{пр}$) = 3 ... 10 мм – дополнительная длина на взятие пробных стружек (на настроенных станках взятие пробных стружек не производится); $v_s = s_o \times n$ или $v_s = s_z \times z \times n$, где s_z – подача на одно режущее лезвие (на 1 зуб), мм/зуб; z – число режущих зубьев многолезвийного инструмента; n – частота вращения, об/мин (мин^{-1}) (при точении, фрезеровании) или число двойных ходов в минуту в зависимости от кинематики рабочего (главного) движения на станке (при строгании, шлифовании).

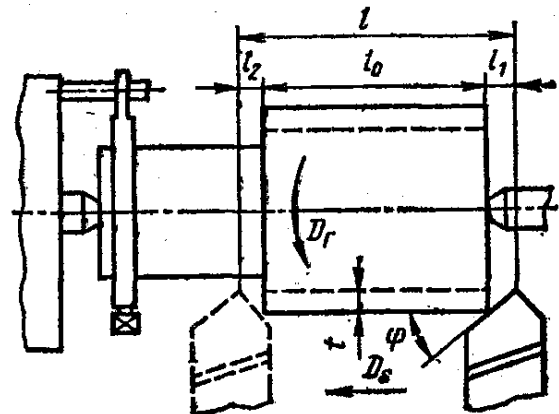


Рис. 1.8. Схема к расчету основного времени при обтачивании цилиндрической поверхности

По известному значению скорости резания v и размерам обрабатываемой поверхности или инструмента определяют частоту вращения или число двойных ходов n заготовки или инструмента по следующим формулам:

при вращательном главном движении (при точении, сверлении, фрезеровании и т. п.) частота вращения (мин^{-1})

$$n = \frac{1000 \times v}{\pi \times D}, \quad [\text{об/мин}]; \quad (1.10)$$

при возвратно-поступательном главном движении (строгание, долбление и т. п.) число двойных ходов в 1 мин

$$n = \frac{1000 \times v}{\ell_x \times (\ell + v_{px} / v_{ex})}, \text{ [дв.х./мин]}; \quad (1.11)$$

где v – скорость резания, м/мин; D – диаметр обрабатываемой поверхности детали или инструмента, мм; v_{px} – скорость рабочего хода, м/мин; v_{ex} – скорость вспомогательного (обратного) хода, м/мин; ℓ_x – длина хода инструмента или детали в направлении главного (рабочего) движения, мм, равная длине обрабатываемой поверхности плюс перебеги за обрабатываемую поверхность в начале и конце хода.

Для различных видов обработки величину t_o определяют по-разному в зависимости от кинематики движений основных узлов станка и технологических особенностей выполнения операции. В связи с этим формула основного времени t_o для различных видов обработки будет видоизменяться. Например, при продольном точении (рис. 1.8)

$$t_o = \frac{\ell \times i}{v_s} = \frac{\ell_o + \ell_1 + \ell_2}{s_o \times n} \times i, \text{ [мин]}; \quad (1.12)$$

где $\ell_1 = t \operatorname{ctg} \varphi$; $\ell_2 = 0,5 \dots 5$ мм; φ – главный угол в плане; n – частота вращения заготовки, мин^{-1} ; s_{np} – продольная подача резца, мм/об.

В справочниках приводятся формулы для расчета t_o при различных видах работ, схемы обработки с указанием главного движения и движения подачи, таблицы значений врезания и перебега.

Число рабочих ходов i зависит от припуска на обработку z .

Припуск – это толщина слоя материала, который необходимо удалить для устранения дефектов от предыдущей обработки. Если каждый рабочий ход совершается с одинаковой глубиной резания t , то

$$i = z/t, \text{ [мм]}; \quad (1.13)$$

где z – **припуск** на обработку **на сторону**, мм.

Припуск на диаметр обозначается $2z$.

$$2z = D - d, \text{ [мм]}; \quad (1.14)$$

где D, d – соответственно диаметры заготовки до и после обработки, мм.

Припуск считается очень большим, если, исходя из жёсткости заготовки и мощности станка, он не может быть удалён за один проход ($z > t$).

Например, при токарной обработке и при диаметре обработанной детали более 30 мм и мощности станка более 7 кВт глубина резания t даже при черновой обработке не должна превышать 4 мм, в противном случае может появиться вибрация или даже сломаться резец.

При диаметре заготовки менее 20 мм или мощности станка менее 2 кВт глубина резания даже при черновой обработке не должна превышать 2 мм, в

противном случае появится существенная погрешность формы заготовки (конусообразность при консольном закреплении или бочкообразность при обработке в центрах) или заготовка может даже погнуться, что приведёт к поломке режущей части резца.

При шлифовании глубина резания t , как правило, не должна превышать 0,05 мм, иначе круг быстро засалится или начнётся вибрация. Поэтому под шлифование оставляется небольшой припуск (0,5...0,2 мм), чтобы не увеличивать число ходов и время на обработку.

Установление правильной величины припусков на обработку является ответственной технико-экономической задачей. Назначение чрезмерно больших припусков приводит к потерям материала, превращаемого в стружку; к увеличению упругой деформации технологической системы СПИЗ (станок – приспособление – инструмент – заготовка) вследствие увеличения силы резания, а значит и к уменьшению точности обработки; к увеличению трудоемкости механической обработки (если припуск больше максимально допустимой глубины резания и приходится его удалять за несколько проходов); усложняется применение приспособлений вследствие увеличения силы резания; к повышению расхода режущего инструмента и электрической энергии; к увеличению потребности в оборудовании и рабочей силе.

Назначение недостаточно больших припусков не обеспечивает удаления дефектных слоев материала и достижения требуемой точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей, а также вызывает повышение требований к точности исходных заготовок и приводит к их удорожанию, затрудняет разметку и выверку положения заготовок на станках при обработке по методу пробных ходов и увеличивает опасность появления брака.

Минимальный припуск $z_{\min i}$ – это наименьшая толщина слоя металла, который необходимо удалить при *рассматриваемой* обработке (индекс i).

Максимальный припуск $z_{\max i}$ – это наибольшая толщина слоя металла, который может быть удалён при обработке с учётом минимального припуска $z_{\min i}$, допуска на *обрабатываемую* (поверхность после *предыдущей* обработки (индекс $i-1$)) (Td_{i-1}) и *обработанную* поверхность (поверхность, получаемую при *данной* обработке (индекс i)) (Td_i):

$$z_{\max i} = z_{\min i} + Td_{i-1} + Td_i, [\text{мм}]; \quad (1.15)$$

Расчет минимальных значений припусков при односторонней обработке (для поверхностей не тел вращения, например, плоскость, торец и т. п.) производим по уравнению:

$$z_{\min i} = R_{z\ i-1} + T_{\text{def}\ i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i, [\text{мм}]; \quad (1.16)$$

где: $z_{\min i}$ – минимальный припуск для *рассматриваемой* обработки (индекс i), мкм; $R_{z\ i-1}$ – шероховатость поверхности после *предыдущей* обработки (индекс $i-1$), мкм; $T_{\text{def}\ i-1}$ – глубина дефектного слоя после *предыдущей* обработки, мкм; ρ_{i-1} – сумма погрешностей формы и расположения поверхностей заготовки, оставшихся или полученных после *предыдущей* обработки (с учётом предположения, что направления векторов всех

погрешностей совпадают), мкм; ε_i – погрешность установки и закрепления перед рассматриваемой обработкой (проявляющейся во время рассматриваемой обработки, поэтому индекс i).

При обработке *тел вращения* и учитывая малую вероятность совпадения направления погрешностей формы и расположения поверхностей заготовки (например, коробления ρ_{i-1} и отклонения от соосности e_{i-1}) и погрешности установки и закрепления ε_i формула для расчета наименьшего припуска на диаметр приобретает вид

$$2z_{\min.i} = 2 \cdot \left(R_{z\ i-1} + T_{def\ i-1} + \sqrt{(\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2)} \right), [\text{мм}]; \quad (1.17)$$

При обработке *тел вращения* и предположении, что направления векторов всех погрешностей совпадают (для гарантированного устранения погрешностей и дефектов), суммирование составляющих наименьшего припуска производится арифметически

$$2z_{\min\ i} = 2 \cdot \left(R_{z\ i-1} + T_{def\ i-1} + \rho_{i-1} + \varepsilon_i \right), [\text{мм}]. \quad (1.18)$$

Числовые значения составляющих наименьшего припуска определяют из справочников в зависимости от вида обработки заготовки или её поверхности или по результатам измерений.

В зависимости от обрабатываемого материала, его твёрдости, состояния обрабатываемой поверхности, назначенного вида обработки и инструментального материала назначаются оптимальные геометрические параметры режущего инструмента.

1.6. Геометрия токарного резца

Режущая часть инструмента (резца, зубила, зуба напильника, сверла, фрезы, зерна шлифовального круга) представляет собой форму клина, с помощью которого производится отделение стружки от обрабатываемой заготовки. При изменении геометрических параметров режущего инструмента изменяется и напряжённо-деформированное состояние в зоне резания, изменяется и вид стружки.

Изучение геометрии режущего инструмента удобнее начинать с самого распространённого и простого инструмента – проходного токарного резца.

Резец состоит из державки, с помощью которого он крепится в резцедержателе, и головки – его рабочей (режущей) части. Державка резца обычно имеет квадратную или прямоугольную форму поперечного сечения и служит для закрепления резца.

Рабочая часть осуществляет резание и состоит (ГОСТ 25762—83) из ряда элементов (рис. 1.8).

Передней поверхностью (1) называется поверхность инструмента, по которой сходит стружка.

Задними поверхностями называются поверхности инструмента, обращенные к обрабатываемой заготовке.

Главная задняя поверхность (6) обращена к непрерывно обновляемой поверхности резания, **вспомогательная задняя поверхность (5)** обращена к обработанной поверхности заготовке.

Режущие кромки образуются пересечением передней и задних поверхностей, их две: **главная режущая кромка (4)** образуются пересечением передней и главной задней поверхности, а **вспомогательная режущая кромка (2)** образуются пересечением передней и вспомогательной задней поверхности.

Главная режущая кромка (лезвие) выполняет основную работу резания – снимает стружку. Вспомогательная режущая кромка подчищает поверхность после прохождения вершины инструмента и имеет малую длину контакта с обработанной поверхностью. Вспомогательных режущих кромок может быть несколько, например их две у отрезного резца и зуба дисковой фрезы.

Вершина резца (3) – место сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок. Она может быть острой, закругленной или выполненной в виде переходной режущей кромки.

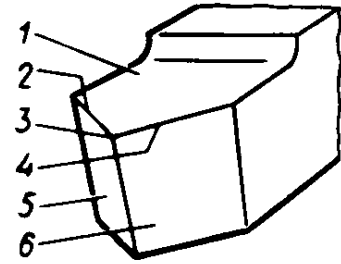


Рис. 1.8. Элементы режущей части токарного резца: 1 – передняя поверхность, 2 – вспомогательная режущая кромка, 3 – вершина режущей части, 4 – главная режущая кромка, 5 – вспомогательная задняя поверхность, 6 – главная задняя поверхность

На обрабатываемой заготовке (рис. 1.9) различают следующие поверхности: обрабатываемую (1), обработанную (3) и поверхность резания (2). **Обрабатываемой** называется поверхность заготовки, которую удаляют в результате обработки; **обработанной** называется поверхность, полученная после снятия стружки; **поверхность резания** образуется на обрабатываемой заготовке непосредственно главной режущей кромкой.

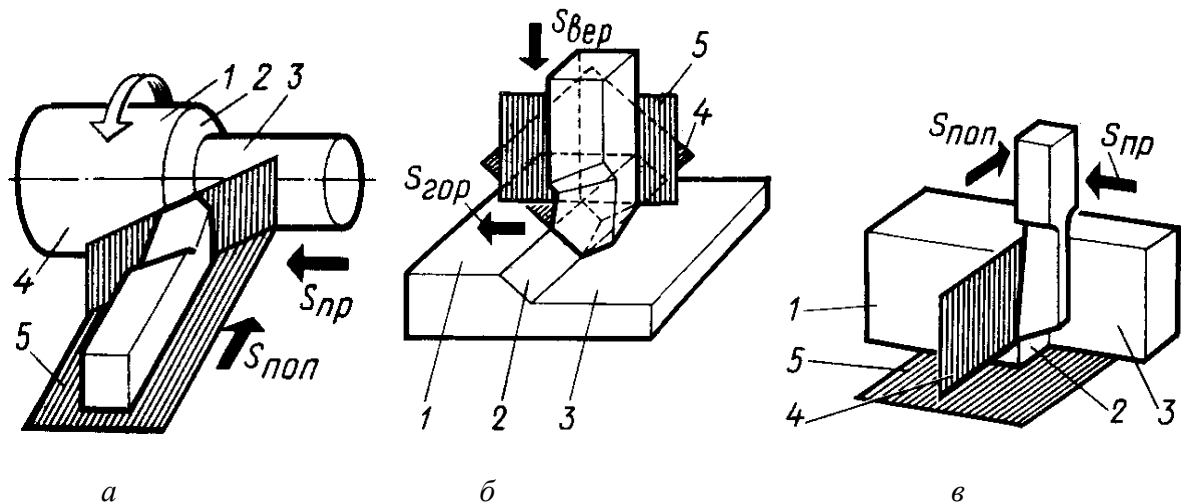


Рис. 1.9. Поверхности и плоскости при точении (а), строгании (б) и долблении (в).
 1 – обрабатываемая поверхность, 2 – поверхность резания, 2 – обработанная поверхность

Взаимное расположение различных поверхностей режущей части инструмента характеризуется значениями углов или геометрическими элементами инструмента. Основные геометрические элементы инструмента: углы в плане и угол наклона главной режущей кромки, радиус при вершине, главные и вспомогательные углы в секущих поверхностях.

Для определения значений этих углов устанавливают следующие исходные плоскости: **плоскость резания** (4) – это плоскость, касательная к поверхности резания и проходящая через главную режущую кромку; **основная плоскость** (5) – это плоскость, параллельная продольному и поперечному перемещениям инструмента.

У токарного резца за основную плоскость может быть принята нижняя (опорная) поверхность резца. На универсальных токарных станках эта плоскость горизонтальна, но на некоторых токарных автоматах используется несколько суппортов и опорные (основные) плоскости их не горизонтальны, поэтому для каждого суппорта будет своя наклонная основная плоскость.

Углы в плане – это проекции углов на основную плоскость. Для универсальных токарных станков, у которых основную плоскость горизонтальна, это углы, измеряемые на виде сверху (см. рис. 1.10).

Главным углом в плане φ называется угол, заключенный между проекцией главной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. С увеличением φ уменьшается поперечная

(радиальная) составляющая силы резания P_y , но уменьшается прочность режущего клина и тепловод от режущей кромки, что приводит к увеличению температуры резания и уменьшению стойкости инструмента. С увеличением φ увеличивается также шероховатость обработанной поверхности.

При обточке на проход (проходной резец) оптимальный угол $\varphi = 45^\circ$, при точении в упор (упорный резец) – $\varphi = 90^\circ$, при точении по сложному контуру (подрезной резец) – $\varphi = 110^\circ$.

При обточке маложёстких заготовок для уменьшения поперечной составляющей силы резания и увеличения размерной точности обработки применяются резцы с $\varphi = 90^\circ$ даже при обточке на проход. Для выдерживания требуемой шероховатости обработанной поверхности в этом случае приходится уменьшать продольную подачу, что приводит к уменьшению производительности обработки и повышению её себестоимости. Другим недостатком резцов с $\varphi \geq 90^\circ$ является заусенец у обрабатываемой поверхности, особенно при $\varphi \geq 100^\circ$.

Наличие заусенца может привести к травме руки рабочего, что вынуждает дополнительно обтачивать небольшую фаску для удаления острых краёв.

Вспомогательным углом в плане φ_1 называется угол, заключенный между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и направлением подачи. Влияние φ_1 аналогично влиянию φ , но в гораздо меньших масштабах в связи с малой длиной контакта вспомогательной режущей кромки с поверхностью заготовки. Оптимальный угол $\varphi_1 = 10^\circ$.

Углы φ и φ_1 зависят не только от заточки инструмента, но и от его установки на станке. Поворот резца при установке в резцедержателе по часовой стрелке приведёт к уменьшению угла φ и увеличению угла φ_1 .

Угол при вершине ε – это угол между проекциями на основную плоскость главной и вспомогательной режущих кромок. Он не зависит от установки резца, а зависит только от его заточки. В сумме $\varphi + \varepsilon + \varphi_1 = 180^\circ$. На практике углом при вершине ε оперируют редко.

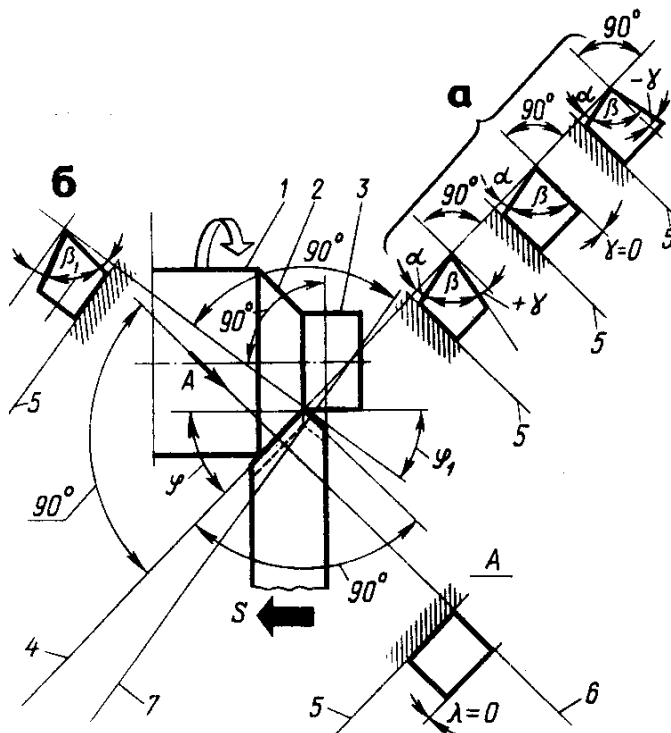


Рис. 1.10. Углы токарного резца в плане, главной секущей (а) и вспомогательной секущей (б) плоскостях: 1 – обрабатываемая поверхность; 2 – поверхность резания; 3 – обработанная поверхность; 4 – плоскость резания (след); 5 – плоскость, параллельная основной плоскости; 6 – главная секущая плоскость (след); 7 – вспомогательная секущая плоскость (след)

Радиус при вершине R (r) (на участке пересечения главной и вспомогательной режущих кромок) существенно влияет на качество обработки и её производительность. С увеличением R увеличивается прочность режущего клина, улучшается теплоотвод, что приводит к увеличению стойкости инструмента; уменьшается шероховатость обработанной поверхности. Однако с увеличением R увеличивается поперечная составляющая силы резания, что приводит к уменьшению размерной точности обработки, особенно при точении маложёстких заготовок.

При чистовом точении с малыми подачами ($s < 0,1$ мм/об) увеличение радиуса при вершине более 1,5 мм приводит, наоборот, к увеличению шероховатости обработанной поверхности и увеличению степени её наклёпа. Происходит это из-за того, что при малых подачах толщина срезаемого слоя мала, увеличение радиуса при вершине уменьшает её ещё больше на радиусном участке. Наличие **радиуса округления режущей кромки ρ** даже у острозаточенного инструмента (из-за износа и выкрашивания режущей кромки при касании поверхности заготовки) приводит к подмятию срезаемого слоя под заднюю поверхность инструмента вместо отвода его на переднюю поверхность. Это явление приводит к «затиранию» обработанной поверхности и ухудшению её качества.

При черновой обработке жёсткой заготовки оптимальный радиус при вершине $R = 2...3$ мм, при обдирке или строгании труднообрабатываемых материалов на жёстких станках $R = 30...80$ мм, при получистовой обработке $R = 0,8...1,5$ мм, при чистовом точении или обработке маложёстких заготовок $R = 0,05...0,8$ мм.

Главные углы инструмента измеряют также в **главной секущей плоскости**, перпендикулярной проекции главной режущей кромки на основную плоскость (рис. 1.10, *a*).

Главным передним углом γ называется угол, заключенный между передней поверхностью и плоскостью, перпендикулярной плоскости резания. Если передняя поверхность криволинейная (радиусная), то углы рассматриваются между касательной к главной передней поверхности в области контакта со стружкой и плоскостью резания. Если этот угол направлен по часовой стрелке, то передний угол считается положительным ($+\gamma$) (рис. 1.10, *a*, см. сечение, ближайшее к заготовке), если против – то отрицательным ($-\gamma$) (рис. 1.10, *a*, см. сечение, дальше от заготовки).

При увеличении **положительного** главного переднего угла облегчается стружкообразование, поэтому сила резания уменьшается, но уменьшается прочность режущего клина и теплоотвод от режущей кромки, что приводит к увеличению температуры резания и уменьшению стойкости инструмента.

Оптимальным главным передним углом считается $\gamma = +15^\circ$ при обработке чистой поверхности незакалённой стальной заготовки средней и малой твёрдости резцом из быстрорежущей стали, и $\gamma = +10^\circ$ – резцом с твёрдосплавной пластиной. Если выполняется черновая обработка или с ударами, то оптимальный угол $+5^\circ$ и 0° соответственно. При обработке

закалённой заготовки или с твёрдой коркой $\gamma = -5 \dots -10^\circ$, при обработке труднообрабатываемых материалов, например, титановых или жаропрочных сплавов – до -25° . При обработке алюминиевых сплавов для предотвращения налипа сходящей стружки на переднюю поверхность инструмента используются большие положительные передние углы – до $+30^\circ$.

При обработке закалённой стали и труднообрабатываемых материалов используются твёрдосплавные резцы с упрочняющей фаской на передней поверхности (см. рис. 1.11, а).

Передний угол на фаске $\gamma_f = -10 \dots -25^\circ$, длина фаски $f \approx (0,2 \dots 0,8)a$, где a – толщина срезаемого слоя, которая зависит от рабочей подачи s и главного угла в плане φ :

$$a = s \times \sin \varphi, \text{ мм.}$$

Для завивания стружки и уменьшения силы резания на передней поверхности инструмента часто шлифуется канавка радиусом R , параллельно или под небольшим углом к главной режущей кромке (рис. 1.11, б). Величина радиуса и глубина канавки h зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала и режимов резания, и обычно подбирается опытным путём ($R \approx 2 \dots 10$ мм, $h \approx 0,3 \dots 3$ мм).

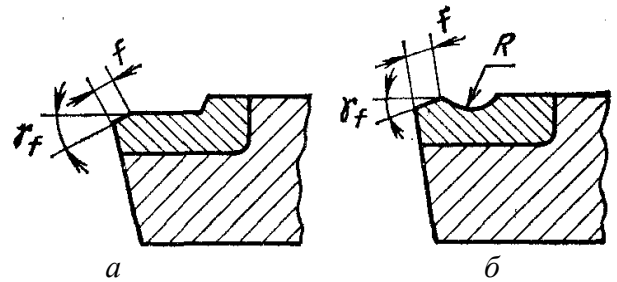


Рис. 1.11. Резцы с упрочняющей фаской (а) и лункой (б) для ломания и завивания стружки

При полустовой и чистовой обработке незакалённой стали и других нетвёрдых материалов, канавка используется отдельно без заточки фаски и выходит к главной режущей кромке. Наличие канавки позволяет увеличить главный передний угол γ на участке контакта передней поверхности со стружкой без её существенной заточки с требуемым передним углом, что позволяет сохранить достаточную прочность режущего клина, уменьшить трудоёмкость заточки и расход инструментального материала.

Главным задним углом α называется угол, заключенный между главной задней поверхностью и плоскостью резания (рис. 1.10, а). Если задняя поверхность криволинейная, то углы рассматриваются между касательной к главной задней поверхности в области контакта с поверхностью заготовки и плоскостью резания.

Влияние α аналогично влиянию γ , но в меньших масштабах. Оптимальный угол $\alpha = 10^\circ$, но при больших подачах (например, при нарезании резцом резьбы с большим шагом $p \geq 3$ мм) он должен быть существенно больше, чтобы предотвратить поломку резца из-за уменьшения **кинематического** главного заднего угла.

Углом заострения β называется угол, заключенный между передней и главной задней поверхностями (рис. 1.10, а). Для **положительных** передних углов в сумме $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$. Угол заострения зависит только от заточки и определяет прочность режущего клина, хотя на практике им не оперируют.

Углы γ и α зависят не только от заточки инструмента, но и от его установки на станке относительно оси вращения шпинделя (оси центров) (рис. 1.12). На рис. 1.12 символами γ_p и α_p обозначены углы при рассматриваемом положении резца, γ и α – при положении режущей кромки на оси центров, как на рис. 1.12, а при точении наружной цилиндрической поверхности (справа) и расточке отверстия (слева).

Если главная режущая кромка будет находиться выше оси центров, то главный передний угол γ будет больше, а главный задний угол α – меньше (рис. 1.12, б).

Если главная режущая кромка будет находиться ниже оси центров, то главный передний угол γ будет меньше, а главный задний угол α – больше (рис. 1.12, в). Чем больше диаметр обработанной поверхности заготовки (правильнее – поверхности резания), тем меньше будет влияние установки резца.

Для отрезного резца влияние установки будет наибольшим, т.к. в момент окончания отрезки режущая кромка будет находиться у оси вращения шпинделя. Если резец был установлен выше оси центров, то его режущая кромка может сломаться, особенно это опасно для твёрдосплавного инструмента. Если резец был установлен ниже оси центров, то останется не срезанная бобышка, и режущая кромка тоже может выкрошиться или сломаться. Поэтому отрезные резцы относительно оси центров должны устанавливаться с особой тщательностью.

Вспомогательные углы инструмента (см. рис. 1.10, б) измеряют во вспомогательной секущей плоскости, перпендикулярной проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость. Эти углы влияют на качество обработки и стойкость инструмента гораздо меньше, поэтому на практике им уделяется гораздо меньше внимания.

Угол наклона главной режущей кромки λ расположен между главной режущей кромкой и линией,

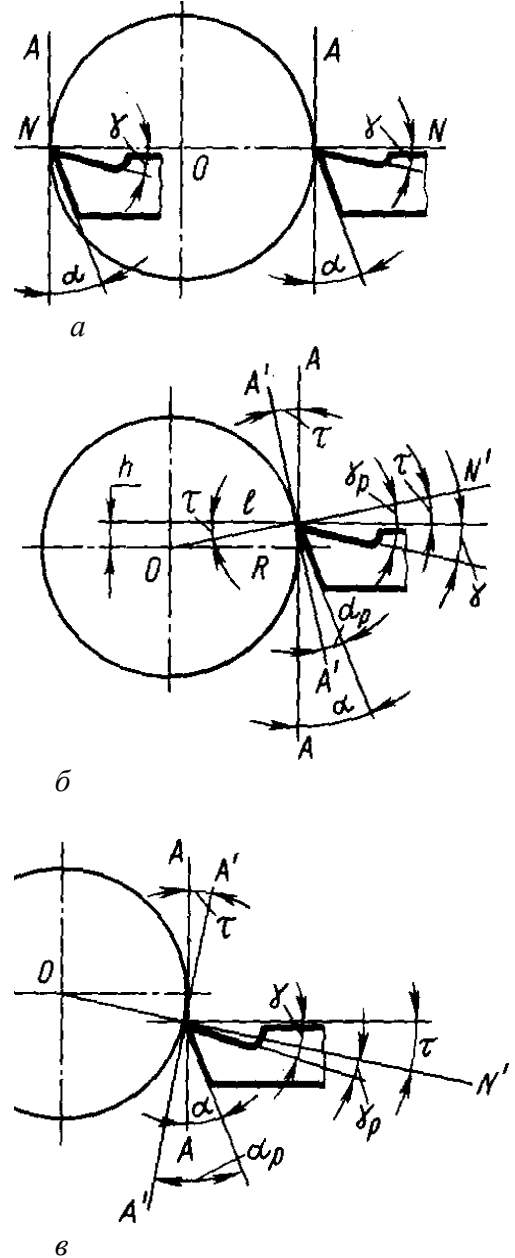


Рис. 1.12. Влияние положения режущей кромки резца относительно линии центров на его передний и задний углы: а – на оси центров; б – выше центров; в – ниже центров; А'-А' – плоскость резания, О-Н' – линия, проходящая через ось вращения заготовки и точку пересечения режущей кромки главной секущей плоскости

проведенной через вершину резца параллельно основной плоскости. В зависимости от положения вершины резца относительно режущей кромки угол λ может быть равен нулю (см. рис. 1.13, *а*), иметь положительное (рис. 1.13, *б*) или отрицательное (рис. 1.13, *в*) значение.

При работе с ударами, например, при обточке вала со шпоночным пазом или при строгании, необходимо затачивать резцы с положительным углом $\lambda = +5^\circ \dots +15^\circ$. В этом случае главная режущая кромка при подходе к заготовке ударяется с обрабатываемой поверхностью не по всей её длине, а только её небольшим участком, удалённым от наиболее прочной части – вершины

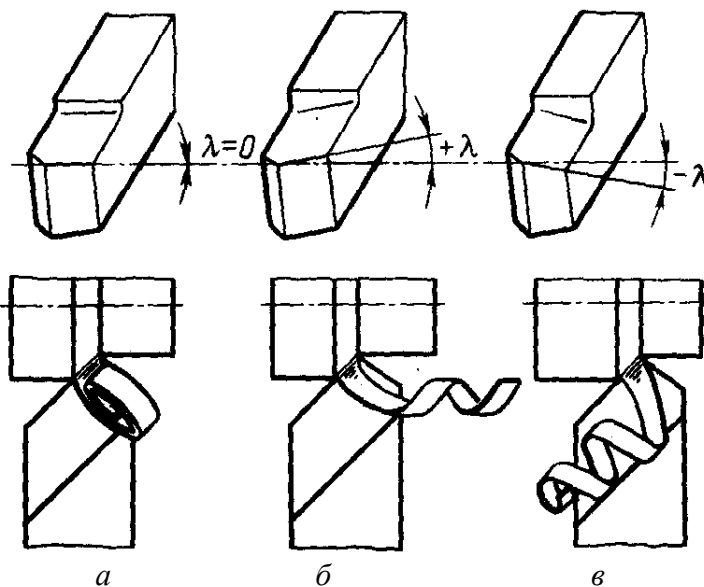


Рис. 1.13. Угол наклона главной режущей кромки

положительного угла λ является то, что стружка отводится в сторону обработанной поверхности и может её повредить.

При чистовой обработке материалов без ударов часто применяют заточку с отрицательным $\lambda = -5^\circ \dots -15^\circ$. В этом случае стружка отводится в сторону от обработанной поверхности, что предотвращает её повреждение. Особенно это актуально при обработке алюминия и его сплавов, поскольку чистая прирезцовая поверхность алюминиевой стружки сразу же прилипает к только что обработанной и ещё не окисленной поверхности заготовки, что вызывает поломку резца и повреждение заготовки. Наличие отрицательного λ ослабляет вершину резца, поэтому рекомендуется уменьшать подачу и глубину резания в 1,5...2 раза против обработки с нулевым λ .

При обработке резцом с $\lambda = 0^\circ$ стружка отводится преимущественно в направлении, перпендикулярном главной режущей кромке, хотя может изменять своё направление в зависимости от протекания процессов стружкообразования и особенностей износа.

При увеличении угла λ по абсолютному значению как при положительном, так и при отрицательном его значении, происходит увеличение скорости перемещения стружки вдоль режущей кромки, что увеличивает температуру резания и уменьшает стойкость инструмента, хотя вероятность скола или выкрашивания режущей кромки при положительном λ уменьшается. Поэтому для работы без ударов и при отсутствии других неблагоприятных факторов обычно применяются резцы с $\lambda = 0^\circ$. У других инструментов, например у фрез и сверл, из-за особенностей их конструкций этот угол может достигать больших значений - $\lambda = -40 \dots -60^\circ$.

На практике при измерении угла λ часто исходят из другого, более общего, определения: угол λ - это угол между вектором скорости резания и перпендикуляром к главной режущей кромке.

В процессе резания значения углов инструмента (кинематических углов) изменяются по сравнению со статическим (нерабочим) состоянием. При обычных режимах резания эти изменения незначительны и ими обычно пренебрегают, но при больших подачах главный задний угол α необходимо увеличивать на $3...5^\circ$, а при необходимости учитывать изменения и других углов при заточке инструментов.

Оптимальная величина геометрических элементов инструмента и форма передней поверхности (плоская, плоская с фаской, криволинейная, с лункой и др.) зависят от целого ряда факторов и в первую очередь от физико-механических свойств обрабатываемого материала, материала режущей части инструмента, формы и размеров обрабатываемой заготовки, режимов резания. Размеры углов выбирают по соответствующим справочникам, предусматривают при конструировании и изготовлении инструмента и достигают заточкой.

При обработке лезвийным инструментом большое внимание уделяется управлению формой стружки и направлением её схода. Различают несколько способов управления сходом стружки, такие как изменение углов и ориентации режущего инструмента, изменение скорости резания, подачи и глубины резания, применение изменяемой или прерывистой подачи.

Изменение углов режущего инструмента оказывает влияние на траекторию схода стружки. Начальная траектория определяется передним углом режущего инструмента и углом наклона главной режущей кромки.

Изменение формы передней поверхности инструмента, наличие канавок, порошков и выемок влияет на форму стружки, направление её схода и дробление.

Изменение режимов резания ведет к изменению геометрических параметров сечения образующейся стружки, что влияет на процесс стружкообразования. При малых значениях глубины резания, подачи и высоких скоростях при обработке сталей и других вязких материалов образуется сливная стружка. Соответственно, при увеличении глубины резания, подачи и уменьшения скорости резания будет образовываться суставчатая или элементная стружка (стружки скалывания). Сливная стружка и стружки скалывания, как правило, имеют различные траектории схода.

Особое внимание уделяется направлению схода стружки при сливном стружкообразовании, поскольку стружка при этом образуется твёрдая и прочная. Она способна повредить обработанную поверхность, что недопустимо при чистовой обработке. Для предотвращения этого затачивается отрицательный угол наклона главной режущей кромки или вышлифовывается стружкозавивающая канавка на передней поверхности на некотором удалении от главной режущей кромки. Эта канавка может быть и не параллельна режущей кромке (как правило, у режущей кромки она почти вплотную к ней подходит). Расположение канавки и её геометрические параметры зависят от обрабатываемого материала и его термообработки, инструментального материала (его прочности и хрупкости) и режимов резания.

Сливная стружка может также запутаться или намотаться на заготовку, приспособление или инструмент, что способно вызвать поломку режущего инструмента, а порой и повреждение заготовки или станка, резко

увеличивается вероятность травмы рабочего. Поэтому стараются не допускать длинных стружек, для чего затачивают стружкозавивающие канавки, порошки, используют накладные стружколомы, используют сильный напор СОЖ или сжатого воздуха, специальные СОТС, изменяющие не только форму стружки, но и её характер.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение элементам режима резания.
2. Назовите основные элементы лезвия токарного резца и дайте им определение.
3. Дайте определение углам токарного резца и укажите назначение каждого из них.
4. Как изменяются углы резца в зависимости от положения его вершины относительно оси вращения обрабатываемой заготовки?

§ 1.7. Инструментальные материалы

Требования к инструментальным материалам. Режущие лезвия инструмента в процессе снятия стружки находятся под действием больших давлений, трения и высоких температур, что приводит к изнашиванию, а иногда и поломке режущего инструмента. Одним из главных условий производительной работы режущего инструмента является правильный выбор инструментального материала с учётом особенностей работы и свойств обрабатываемого материала.

Режущие инструменты для экономии дорогостоящего инструментального материала изготавливают обычно не цельные, а состоящие из державки или корпуса и режущей части.

К *инструментальным материалам режущей части* инструмента предъявляют следующие требования:

1. Высокая **твёрдость**, которая должна превышать твёрдость обрабатываемого материала не менее чем в 5-1,5 раз.

2. Высокая **прочность**, особенно на изгиб и сопротивление удару.

3. Высокая **красностойкость** - свойство инструментального материала сохранять свою твёрдость при рабочей, как правило, высокой температуре.

4. Высокая **износостойкость**, заключающаяся в способности инструментальных материалов сопротивляться изнашиванию при работе.

5. Достаточно **высокая теплопроводность**. Чем выше температура режущих кромок, тем выше интенсивность их износа. Поэтому с увеличением теплопроводности инструментального материала большее количество теплоты, выделяемое в зоне резания, будет отводиться от режущих кромок, что приведёт к повышению стойкости инструмента

6. **Технологичность**, к которой относят: обрабатываемость резанием и методами пластического деформирования (если они используются для производства инструментальных заготовок), шлифуемость, свариваемость или отсутствие склонности к образованию трещин при напайке (если это требуется в процессе изготовления), закаливаемость и т.п.

7. **Малое сродство к обрабатываемому материалу**, поскольку это вызывает повышенную **адгезию** (прилипание, схватывание) и интенсивный износ. Например, при обработке титановых и жаропрочных сплавов, в состав которых входит титан, не следует использовать режущие инструменты с содержанием соединений титана.

Кроме перечисленных основных требований, к инструментальным материалам предъявляются и другие требования. Например, не следует изготавливать из *дорогих* и *дефицитных* материалов, поскольку это неэкономично.

Инструментальные материалы подразделяют на следующие группы: инструментальные стали; твердые сплавы; керамические материалы; алмазы и синтетические сверхтвердые материалы.

Все *инструментальные стали* имеют в своей основе железо (Fe) и углерод (C) (от 0,65 до 1,4 %), который придает стали прочность и способность к закалке. Инструментальные стали делятся на углеродистые, легированные и быстрорежущие.

Углеродистые инструментальные стали содержат только железо и углерод от 0,6 % до 1,4 %, обладают высокой прочностью, твердостью до HRC 61...65 после термической обработки, но невысокими красностойкостью (до 200... 250 °С из-за отпуска) и износостойкостью. Из этой стали изготавливают инструменты, предназначенные для обработки легкообрабатываемых материалов, а также работающие при небольших скоростях резания (до 10 м/мин при резании незакалённой углеродистой конструкционной стали): сверл малого диаметра, ручных разверток, метчиков, плашек, шаберов, зубил, напильников, ножовок и т.п., для деревообрабатывающих инструментов. Из этих сталей могут изготавливаться и некоторые измерительные инструменты, калибры и шаблоны.

Марки углеродистых сталей обозначают буквой У с добавлением цифры, указывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента. Буква А в конце обозначения марки указывает повышенное качество этой стали. Например, У8 – углерода 0,8 %, а остальное – железо; У12А – углерода 1,2 %, остальное – железо, сталь повышенного качества.

Углеродистые инструментальные стали относительно недороги, хорошо обрабатываются, в том числе и методами пластической деформации в отожженном состоянии, но из-за своей низкой красностойкости используются сейчас для производства инструментов редко, преимущественно для ручных инструментов, напильников и зубил.

Для повышения *стойкости* инструмента (время работы до предельно допустимого износа, требующей переточки или замены) рекомендуется вести обработку с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) для уменьшения температуры резания (средней температуры на режущих поверхностях инструмента). Применение СОЖ позволяет увеличить стойкость для всех инструментальных материалов в 1,5...3 раза.

Легированные инструментальные стали получают введением в среднеуглеродистую сталь легирующих элементов – хрома (Х), вольфрама (В), молибдена (М), ванадия (Ф), марганца (Г), которые повышают её режущие и технологические свойства, увеличивают красностойкость до 250...300 °С, уменьшают деформацию (коробление) при закалке, улучшают прокаливаемость по сечению. Эти стали применяют для изготовления ножовочных полотен, свёрл малого диаметра, метчиков, разверток, протяжек и другого стержневого и резьбового инструмента, корпусов штампов и пресс-форм.

Для изготовления режущего инструмента наибольшее применение

находят стали: хромокремнистая 9ХС, хромовольфрамовая ХВ5, хромовольфрамванадиевая Х6ВФ, хромоволь-фрамомарганцовистая ХВГ и др.

В марках легированных инструментальных сталей буквы обозначают соответствующий легирующий элемент, а стоящая после буквы цифра – содержание его в процентах. Отсутствие цифры означает содержание легирующего элемента до 1 %.

Быстрорежущая сталь благодаря введению в её состав вольфрама, а также и других легирующих элементов, выдерживает в процессе резания нагрев до температуры 600...650 °С (до появления жёлтого или синего цвета стружки при обработке стали), и работает при скоростях резания в 5...10 раз больше по сравнению с инструментальными углеродистыми сталями (до 35...50 м/мин при резании незакалённой углеродистой конструкционной стали), поэтому и получили своё название «быстрорежущие» после их появления в начале XX столетия. Эта группа сталей имела также название «самокал» в связи со способностью закаливаться на воздухе, хотя и не на максимально возможную для себя твёрдость. Быстрорежущая сталь имеет твёрдость после термической обработки до HRC 62...65 при прочности на изгиб в 1,5 раза большей, чем углеродистые инструментальные стали. Благодаря своей высокой красностойкости и прочности быстрорежущие стали получили очень широкое применение.

Быстрорежущие стали делятся на *три группы* – умеренной, повышенной и высокой красностойкости. Учитывая относительно высокую стоимость быстрорежущих сталей, из них изготавливается только режущая часть инструмента, а корпуса, державки, хвостовики инструментов делают из конструкционных сталей и свариваются с режущей частью сваркой трением или контактной.

В марках быстрорежущих сталей буква Р (rapid) обозначает, что сталь относится к группе быстрорежущих, например, Р18, Р6М5, Р6М5К5. Цифры, стоящие после нее, указывают среднее содержание вольфрама в процентах. Остальные буквы и цифры имеют то же значение, что и в марках легированных сталей. Содержание хрома (около 4%), углерода (0,7...1,5%) в обозначении марки не указывается. Чем больше содержание вольфрама, тем выше красностойкость и износостойкость стали, но тем выше её стоимость.

Согласно международной классификации ISO все быстрорежущие стали делятся на две группы: HSS (High Speed Steel – высокоскоростная сталь) – быстрорежущие стали нормальной (обычной) производительности; и HSS E – быстрорежущие стали повышенной производительности.

В настоящее время практически все свёрла и фрезы изготавливаются из быстрорежущей стали нормальной производительности Р6М5, которая составляет около 70 % от выпуска всех быстрорежущих сталей. Из неё также изготавливают отрезные резцы и сменные вставки для них, зуборезные инструменты, зенкеры, развёртки, дисковые пилы и полотна для механических ножовок, фасонные резцы и т.п.

Из быстрорежущих сталей повышенной производительности Р6М5К5, Р9М5, Р9М4К8, Р18Ф2, Р18К5Ф2 (с твёрдостью до HRC 64...67) изготавливают инструменты для обработки жаропрочных и титановых сплавов, коррозионно-стойких и труднообрабатываемых материалов.

Недостатками этой группы являются пониженные прочность и технологичность, а также существенно большая стоимость по сравнению с Р6М5.

Разрабатываются также *безвольфрамовые быстрорежущие стали* на основе никеля, хотя широкого практического применения они не получили.

Обработка резанием высокопрочных и тугоплавких материалов требует повышения режущих свойств инструментов из быстрорежущих сталей. Это достигается различными способами: хромированием, *цианированием* (насыщением поверхностного слоя режущей части инструмента соединениями азота), *цементацией* (насыщением поверхностного слоя режущей части инструмента углеродом и его соединениями), *покрытием* рабочих поверхностей тонким слоем твердых карбидов вольфрама или титана, лазерной обработкой, электроискровым упрочнением (до HRC 80...85) и др.

Для экономии дорогостоящих материалов из быстрорежущих сталей изготавливают пластины, которые приваривают или припаивают специальными припоями при температуре, немного меньше температуры наступления отпуска закалённой инструментальной стали, или совмещают нагрев под закалку и припайвание, крепят механически к корпусной или крепежно-присоединительной части (так называемым ножам).

Твердые сплавы. Твердые сплавы появились в 30-х годах XX столетия. Как и после появления быстрорежущих сталей, они произвели второй скачок роста скоростей резания, что привело к перевороту в металлообработке и станкостроении, увеличилась потребная мощность станков, поскольку мощность резания $N_p = P_z \times v$, где P_z – *тангенциальная составляющая силы резания, совпадающая с направлением скорости резания*. Твердые сплавы изготавливают методом порошковой металлургии. Исходными материалами для их изготовления являются порошки *карбидов* тугоплавких металлов, связанных металлическим кобальтом. Порошки смешивают в определенных пропорциях, прессуют в формах и кратковременно спекают при температуре 1500...2000 °С. При спекании твердые сплавы приобретают высокую твердость (HRA 85...92) и в дополнительной термической обработке не нуждаются. Эта твердость сохраняется при нагреве до 800...1200 °С, поэтому оснащенный твердым сплавом инструмент более износостоек по сравнению с инструментом из инструментальных сталей, что позволяет вести обработку при высоких скоростях резания (до 800 м/мин при чистовой обработке и до 200 м/мин при черновой). Твердые сплавы химически пассивны к воздействию кислот и щелочей, а некоторые из них почти не окисляются даже при температурах 600...800 °С.

Замена быстрорежущего инструмента твердосплавным позволяет повысить скорость резания в 5...10 раз и увеличить стойкость инструмента не менее чем в 5...10 раз.

Главными недостатками твердых сплавов являются хрупкость, а также недостаточная прочность при изгибе и растяжении. Поэтому целесообразно так располагать режущие элементы инструмента, чтобы они по возможности работали на сжатие, а не на изгиб и растяжение. В связи с большим модулем упругости ($E \approx 5,4 \times 10^{11}$ МПа) по сравнению со сталью ($E \approx 2 \times 10^{11}$ МПа) при больших силах резания под режущие пластины из твердых сплавов

устанавливают подкладочные более толстые пластины из твёрдого сплава, чтобы предотвратить изгиб и разрушение режущих пластин из-за упругой деформации стальной державки.

Ещё одним недостатком твердых сплавов являются склонность к появлению трещин при быстром охлаждении (термотрещины), поэтому требуется обильный полив СОЖ, либо обработка без неё. Недопустимо охлаждение в воде режущих пластин после их нагрева во время или после заточки – инструмент должен остывать на воздухе, а после напайки – в теплоизолированной ёмкости.

Твердые сплавы для оснащения режущего инструмента выпускают в виде пластин, форма и размеры которых определяются соответствующими стандартами. Широкое применение получили многогранные неперетачиваемые (сменные) пластины (МНП, СМП).

По химическому составу твердые сплавы подразделяются на *три группы*: вольфрамовую (однокарбидную), титановольфрамовую (двухкарбидную) и титанотанталовольфрамовую (трёхкарбидную). Твердые сплавы состоят из зерен карбида вольфрама или с добавлением карбидов титана и тантала, цементированных кобальтом. Железо в твёрдых сплавах присутствует только в виде примеси в незначительном количестве.

Марки твердых сплавов обозначают буквами и цифрами, например, в сплаве ВК8 кобальта (К) 8 %, карбида вольфрама (В) – остальное (92 %). Буквы ОМ в конце марки (например, ВК6ОМ) означают особо мелкозернистую структуру, улучшающую режущие и физико-механические свойства сплава.

Вязкость твердых сплавов, а, следовательно, и их хрупкость, зависит от содержания в них кобальта. Чем больше содержание кобальта, тем выше прочность сплава, но меньше его износостойкость. Сплавы, содержащие наименьшее количество кобальта (ВК2, ВК3, Т30К4), обладают меньшей вязкостью – их используют для инструментов, применяемых для чистовых операций. Сплавы, обладающие большей вязкостью (ВК8, Т5К10 и др.), применяют на черновых операциях, т.е. при снятии стружек большого сечения, при прерывистом резании (строгании, фрезеровании, точении заготовок с пазами или радиальными отверстиями).

Твердые сплавы группы ВК, как менее хрупкие, применяются при обработке чугунов и других хрупких материалов, труднообрабатываемых материалов, жаропрочных и титановых сплавов, цветных металлов (меньше прилипает их стружка к передней поверхности инструмента), при прерывистом резании.

Двухкарбидные твёрдые сплавы (группа ТК) используются для обработки стали. Содержание карбида вольфрама в обозначении марки не указывается, как и буква В. Чем больше содержание кобальта и карбида вольфрама, тем больше прочность сплава, но меньше его твёрдость и износостойкость. В сплаве Т5К10 кобальта (Сo) 10 %, карбида титана (TiC) 5 % и карбида вольфрама (WC) – остальное (85%). Этот сплав применяется для черновой обработки стали, а также с ударами, но его стойкость почти в 2 раза меньше, чем при использовании сплава Т15К6, применяемого для получистовой обработки. Сплав Т30К4 применяется для чистовой обработки закалённых сталей, а также может быть использован для обработки сплава

ВК8 с малой скоростью, глубиной резания и подачей, но при обработке незакалённой вязкой стали даже с умеренными режимами резания велика вероятность скола режущей кромки из-за его хрупкости.

Трёхкарбидные твёрдые сплавы (группа ТТК) также изготавливаются на основе карбида вольфрама и используются при обработке труднообрабатываемых сталей аустенитного класса, но широкого применения не нашли, хотя имеют повышенную износостойкость, прочность и вязкость. В их обозначении после букв ТТ указывается суммарное содержание карбидов титана и тантала (TaC) без разделения каждого из них, например, ТТ7К12.

Для дополнительного повышения износостойкости неперетачиваемых твердосплавных пластин и цельных твердосплавных инструментов на них наносят тонкий слой (2...10 мкм) карбида или нитрида титана или других высокотвердых материалов. Это позволяет в 2...5 раз повысить стойкость *инструмента с покрытием* по сравнению со стойкостью исходного материала.

Безвольфрамовые материалы. Большое внимание уделяется разработке новых твердых сплавов, не содержащих карбидов дорогого и дефицитного вольфрама. Карбиды вольфрама заменены карбидами титана с добавками молибдена, никеля и других тугоплавких металлов. Разработанные сплавы ТМ1, ТМ3, ТН-30, КТН-16 и др. обладают высокой износостойкостью.

Карбидохромистые твердые сплавы, например КХН-20, КХН-30 (цифры в обозначении этих марок указывают на процентное содержание никеля, остальное – карбиды хрома), хорошо сопротивляются изнашиванию и коррозии, обладают низкой склонностью к схватыванию. Пониженная склонность к адгезионному взаимодействию (схватыванию) с обрабатываемым материалом снижает износ инструмента по передней поверхности, обеспечивая более низкую шероховатость обработанной поверхности.

Безвольфрамовые твердые сплавы целесообразно применять при чистовой и получистовой обработке низколегированных, высокохромистых и хромоникелевых сплавов и цветных металлов вместо стандартных сплавов Т30К4 и Т15К6.

Для оснащения металлорежущего инструмента твердые сплавы выпускают в виде пластин. Пластины из твердых сплавов припаивают или крепят механически к стальному корпусу.

В промышленности используют и монолитный твердосплавный инструмент, например отрезные и концевые фрезы, спиральные сверла, зенкеры, развертки небольших диаметров, дисковые и червячные мелко модульные фрезы, фасонные резцы.

Инструменты сложной формы, а также небольших размеров изготавливают из пластифицированных заготовок. Пластифицированный твердый сплав представляет собой спрессованный порошок, погруженный в кипящий при 400 °С парафин и после остывания составляющий с ним однородную массу, которая легко поддается механической обработке на металлорежущих станках. После придания им нужной формы пластифицированные заготовки подвергают спеканию, заточке и доводке.

В настоящее время инструменты из твердых сплавов в металлообработке применяются чаще, чем инструментальные стали, особенно при обработке на станках с ЧПУ.

Керамические (минералокерамические) инструментальные материалы появились в начале 50-х годов прошлого столетия. Они не содержат дорогостоящих и дефицитных компонентов. Основой керамики является корунд – минерал кристаллического строения оксида алюминия (технический глинозем) Al_2O_3 . Получают корунд из глинозема в электропечах при температуре 1720...1750 °С, в связи с чем их принято называть электрокорундами. Из кристаллов электрокорунда изготавливают стандартные керамические пластины белого цвета. Белый цвет имеют кристаллы электрокорунда, свободного от примесей. Примеси химических элементов придают электрокорундам различные цветовые оттенки.

Оксидная керамика обладает высокими твердостью (90...94 HRA), теплостойкостью (до 1200 °С) и в ряде случаев значительно превосходит по стойкости и производительности твердые сплавы. Ее малое сродство с металлами исключает адгезионное взаимодействие с обрабатываемым материалом, вследствие чего достигается меньшая шероховатость поверхности, чем при обработке твердосплавным инструментом.

Существенным недостатком оксидной керамики является высокая хрупкость, низкая ударная вязкость и плохая сопротивляемость циклическим изменениям тепловой нагрузки.

Инструменты из оксидной керамики используются при чистовой и получистовой обточке и расточке заготовок из высокопрочных и отбеленных чугунов, труднообрабатываемых сталей, некоторых цветных сплавов и неметаллических материалов с высокими скоростями резания (до 600 м/мин) в условиях безударной нагрузки, без охлаждения и при повышенной жесткости системы СПИЗ. Наибольшее применение получила **минералокерамика** ЦМ-332 и ВО-13 (микролит, термокорунд), которая имеет предел прочности при изгибе $\sigma_{и} = 295...370$ МПа. Эти материалы обладают низкой стоимостью и в ряде случаев успешно заменяют твердые сплавы при чистовой обработке закалённой стали. Наряду с микролитом применяют **керметы**, которые кроме окиси алюминия имеют присадки различных металлов и минералов (вольфрам, молибден, бор, титан и др.) в количестве до 10 %, эти присадки несколько уменьшают хрупкость, чем улучшают режущие свойства материала.

С целью повышения механической прочности в оксидную керамику добавляют различные тугоплавкие соединения (карбиды вольфрама, титана, молибдена, хрома и др.). Такие материалы получили название **оксидно-карбидной керамики**. Предел прочности при изгибе у нее почти в 2 раза выше, чем у ЦМ-332, но несколько ниже теплостойкость и износостойкость.

Оксидно-карбидная керамика имеет черный цвет, изготавливается в виде многогранных и круглых пластин. Представителями этой керамики являются ВЗ, ВОК-60, ВОК-63, ВШ-75 и др. Их применяют при обработке ковких и отбеленных чугунов, труднообрабатываемых сталей и сплавов.

Пластины из керамических материалов могут подвергаться отжигу, в результате чего стойкость их повышается, например у ВОК-60 и ВОК-63 она в 2—4 раза выше, чем у неотожженных.

К режущим **сверхтвердым материалам** относятся природные и искусственные алмазы, а также синтетические материалы. Самым твердым из известных инструментальных материалов является **алмаз**. Его применяют для оснащения лезвийных и абразивных режущих инструментов.

По химическому составу алмаз представляет собой одну из аллотропных модификаций углерода – кристаллический углерод. Он обладает высокой износостойкостью, хорошей теплопроводностью, небольшим коэффициентом трения и малой адгезионной способностью к металлам, за исключением сплавов железа с углеродом. Очень малый коэффициент трения позволяет получить обработанную поверхность с очень малой шероховатостью. Алмаз обладает большой хрупкостью, поэтому для увеличения прочности инструменты из него имеют отрицательный передний угол и небольшие углы в плане.

Следует добавить, что кристаллы природных алмазов обладают большой **анизотропией** — твердость и прочность его в различных направлениях могут изменяться в сотни раз и при надлежащей кристаллографической ориентации можно значительно повысить стойкость инструмента. Это учитывают при изготовлении лезвийного инструмента. Необходимо, чтобы алмаз обрабатывался в «мягком» направлении, а изнашивание соответствовало бы «твердому» направлению.

Алмазный инструмент характеризуется высокой производительностью при тонком точении и растачивании цветных сплавов, пластмасс и т.п. При этом обеспечивается высокое качество поверхности, что, как правило, исключает необходимость последующего шлифования. К недостаткам алмазных инструментов относится их высокая стоимость (более чем в 50 раз выше стоимости других инструментов) и дефицитность.

Для изготовления режущих инструментов используют как **природные** (А), так и **синтетические** (АС) **алмазы**. Синтетические алмазы получают путем перевода углерода в другую модификацию и значительного уменьшения объема исходного графита в условиях высоких температур и давлений.

Синтетические алмазы выпускают следующих марок: АББ – баллас (АСБ-5, АСБ-6); АСПК – карбонадо (АСПК-1, АСПК-2, АСПК-3). Вследствие поликристаллического строения алмазы перечисленных марок обладают **изотропностью** механических свойств, поэтому отсутствует необходимость ориентирования поликристалла по плоскостям. Лезвийный инструмент с такими алмазными вставками обладает высокой динамической прочностью, что позволяет применять его при обработке особопрочных сплавов.

Баллас высокоэффективен при точении цветных сплавов с повышенным содержанием кремния, стеклопластиков и пластмасс. При обработке стеклопластиков и пластической керамики на основе смол износостойкость алмазов баллас в 70...80 раз выше износостойкости резцов с пластинами твердых сплавов ВК2, ВКЗМ и в 1,5...2 раза выше износостойкости резцов из природных алмазов. Балласы применяют для оснащения режущей части резцов, сверл, фрез, а также для изготовления шлифовальных кругов.

Монокристаллические алмазы САМ используют для обработки

полупроводниковых материалов, радиотехнической керамики и высококремнистых цветных сплавов. Кристаллы алмазов закрепляют в инструменте пайкой и механически. Резцы с алмазными вставками можно затачивать с минимальным радиусом округления режущей кромки. Острота режущей кромки долго сохраняется, что позволяет вести обработку с малыми глубинами резания и получать малый параметр шероховатости.

В отдельную группу **сверхтвердых инструментальных материалов (СТМ)** выделяются синтетические материалы. Широкое распространение получил синтетический сверхтвердый материал на основе кубического нитрида бора (КНБ). КНБ синтезирован как и искусственный алмаз при температуре 1360...2000 °С и давлении 6000...9000 МПа. Он обладает большой твердостью, уступая лишь синтетическому алмазу, высокой теплостойкостью (до 1600 °С) и более прочен по сравнению с алмазом. Кубический нитрид бора химически инертен к железу и углероду, что дает возможность использовать его в качестве абразивного инструмента при обработке различных высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, обеспечивая требуемое качество обработки и экономичность при высокой стоимости самого инструмента.

На основе плотных модификаций кубического нитрида бора создан ряд инструментальных материалов, носящих название композиционных (композиты). **Композиты** делят на **две группы**: материал с массовой долей КНБ от 95 % и выше и массовой долей КНБ 75 % с различными добавками (например, Al_2O_3).

К **первой группе** относят эльбор Р (композит 01), бельбор (композит 02), гексанит (композит 10) и др. Материалы этой группы различаются технологией изготовления и исходным сырьем, поэтому имеют разные названия. **Эльбор**, выпускаемый в виде цилиндрических столбиков диаметром 4...6 мм, высотой 3...6 мм, используется для изготовления резцов. Он впаивается в металлические цилиндры, которые закрепляют в державки режущего инструмента. Композиты обладают большой хрупкостью, поэтому для увеличения прочности инструменты из них имеют отрицательный передний угол (до -20 °) и небольшие углы в плане (от 10 до 30 °). Порошкообразный эльбор используется для изготовления шлифовальных кругов, для которых он выпускается двух марок: ЛО и ЛП.

Ко **второй группе** композитов относятся: композит 05, состоящий из КНБ и двуокиси алюминия Al_2O_3 ; композит 09, представляющий собой поликристаллы твердого нитрида бора (ПТНБ). Композит 09 используется для оснащения инструмента, работающего в условиях ударных нагрузок.

Для обработки резанием используется также силинит-Р – материал на основе нитрида кремния (SiN). Получают силинит-Р методом горячего спекания в графитовых пресс-формах в виде пластин различной формы. Для силинита-Р характерно отсутствие склонности к адгезии по отношению к большинству сталей, сплавов на основе меди, алюминия. Он обладает более высокими прочностью, ударной вязкостью и теплопроводностью, чем инструменты из минералокерамики. Силинит-Р имеет достаточно высокие эксплуатационные свойства при точении и фрезеровании чугуна, а также при точении закаленных сталей. Силинит-Р не содержит дефицитных элементов, что в совокупности с высокими режущими свойствами открывает

перспективы для более широкого применения этого материала.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Перечислите требования, предъявляемые к инструментальным материалам.
2. Перечислите основные группы материалов, применяемых для изготовления режущего инструмента.
3. Сравните теплостойкость быстрорежущих сталей и твердых сплавов.
4. При каких режимах резания целесообразно использовать режущий инструмент из керамического материала?
5. Назовите область применения инструментов из СТМ.

Раздел 2. Основы лезвийной обработки

§ 2.1. Зона стружкообразования

Качество обработанной поверхности заготовки, режим резания, стойкость инструмента, расход энергии на резание зависят от характера и степени деформирования металла, превращаемого в стружку. Поэтому изучению зоны стружкообразования всегда уделялось много внимания.

Для удобства анализа процесса стружкообразования лучше начать рассмотрение со случая прямоугольного свободного резания при строгании пластины резцом, ширина которого больше ширины строганной пластины. В этом случае все процессы будут одинаковы в любом сечении, перпендикулярном главной режущей кромке, независимо от расстояния до боковой поверхности резца.

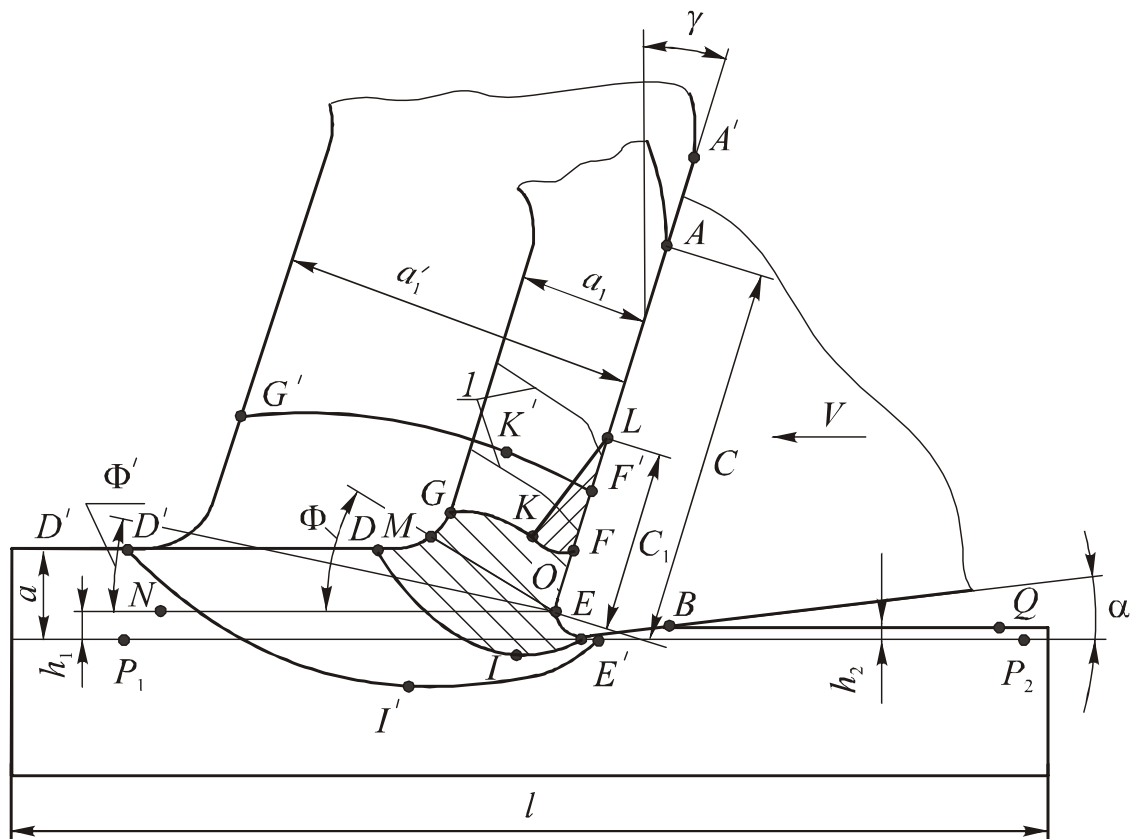


Рис. 2.1. Схема упруго-пластической деформации в зоне стружкообразования при строгании пластины

При строгании исследователи часто используют вертикально-фрезерный станок, на котором резец закрепляется в приспособлении, установленном на головке вертикально-фрезерного станка, а строганная пластина крепится в тисках на столе станка. В процессе резания в продольном направлении движется только стол станка с пластиной, а резец неподвижен. Это облегчает наблюдение и видеосъемку боковой поверхности зоны стружкообразования.

Впервые схему стружкообразования при резании предложил И.А. Тиме

(1870 г.), а затем ее развил К.А. Зворыкин (1893 г.). За рубежом (США) эти схемы повторил *M.E. Merchant* (1945 г.).

При строгании резец движется со скоростью резания V (рис. 2.1). Толщина срезаемого слоя a при строгании равна глубине резания t . Линия среза P_1-P_2 теоретически касается вершины режущей кромки и параллельна направлению скорости резания. Практически всегда режущая кромка имеет округление радиусом ρ вследствие износа или неизбежно образуется в процессе обычной заточки инструмента. При резании часть металла в точке O вдавливается под радиусный участок и проходит под задней поверхностью резца. Поэтому фактически линия среза определяется линией $N-O-E-B-Q$.

Толщина слоя вдавливаемого под режущую кромку металла h_1 зависит от радиуса округления режущей кромки ρ , толщины срезаемого слоя a , механических свойств обрабатываемого материала и наличия нароста или застойной зоны обрабатываемого материала у режущей кромки. Обычно h_1 составляет от нескольких микрометров при чистовой обработке до десятых долей миллиметра при черновой обработке, но при анализе явлений на передней поверхности инструмента в первом приближении ею можно пренебречь.

Величина упругого восстановления обработанной поверхности h_2 немного меньше h_1 и зависит от тех же факторов плюс выдавливание на боковые поверхности пластины и пластическая деформация металла на обработанной поверхности. От величины h_2 в большой степени зависит глубина и степень пластической деформации обработанной поверхности, долговечность детали при её эксплуатации.

При движении резца перед ним образуется зона **первичной пластической деформации**, в которой обрабатываемый металл деформируется уже не только упруго, но и пластически, и изменяет направление своего движения на параллельное относительно передней поверхности инструмента. Начало этой зоны определяется кривой $D-I-E$, окончание – кривой $G-K-F$. Скорость деформаций в этой зоне очень большая, на несколько порядков больше, чем при обычных испытаниях образцов на разрыв или сжатие. Большое влияние здесь оказывает скорость резания и температура, которая увеличивается вследствие пластической деформации. Большая часть деформаций и изменений происходит вблизи поверхности, определяемой линией MO . Чем меньше пластичность металла и больше скорость резания, тем меньше величина зоны первичной пластической деформации $D-I-E-O-F-K-G$, тем больше она сужается до плоскости MO , которую называют **условной плоскостью сдвига**. Такое название эта область получила в связи с принятием упрощения: условно считается, что вся пластическая деформация происходит только в этой зоне и по этой плоскости происходит сдвиг обрабатываемого материала из слоя, подлежащего удалению, и преобразования его в стружку (рис. 2.2 и 2.3).

Из-за изменения направления скорости перемещения срезаемого слоя от параллельного скорости резания V до параллельного передней поверхности инструмента после прохождения условной плоскости сдвига MO и больших пластических деформаций толщина стружки a_1 больше толщины срезаемого слоя a (рис. 2.1). Отношение a_1/a называется **усадкой стружки по толщине** и обозначается k_a ($k_a = a_1/a$). Чем больше k_a , тем

большей пластической деформации подвергся удаляемый слой металла при его прохождении через зону первичной пластической деформации, т.е. k_a есть мера пластической деформации стружки.

При увеличении пластичности металла k_a увеличивается, увеличивается и зона первичной пластической деформации. Например, при увеличении толщины стружки a_1 до a'_1 при неизменной толщине срезаемого слоя a зона первичной пластической деформации увеличится до положения $D'-I'-E'-O-F'-K'-G'$ и начало зоны первичной пластической деформации переместится до положения $D'-I'-E'$ (см. рис. 2.1). При этом существенно увеличится объём металла, подвергаемый пластической деформации, а, значит, и увеличится сила резания.

При увеличении усадки стружки зона пластической деформации опускается ниже (точка I'), поэтому помимо увеличения степени пластической деформации увеличивается и глубина пластически деформированного поверхностного слоя обработанной поверхности. Увеличение степени пластической деформации приводит к увеличению наклёпа поверхностного слоя заготовки, что может привести к появлению усталостных трещин при эксплуатации детали.

Наружная поверхность стружки, как правило, имеет пилообразный характер (рис. 2.2 и 2.3), что сказывается на точности измерения средней толщины стружки. При пластической деформации объём срезаемого слоя ($\omega = l \times a \times b$) и объём стружки, снятой с этой длины ($\omega' = l_1 \times a_1 \times b_1$), равны, т.е. $\omega = \omega'$. При вычислении объёмов используются следующие условные обозначения: l – длина пластины, с которой снята стружка; a – толщина среза (при строгании пластины это глубина резания t); b – ширина строгаемой пластины; l_1 – длина непрерывной стружки, срезанной с пластины длиной l ; a_1 – толщина стружки; b_1 – ширина стружки (рис. 2.1).

Это свойство равенства объёмов используется при измерении **истинной усадки** стружки по длине:

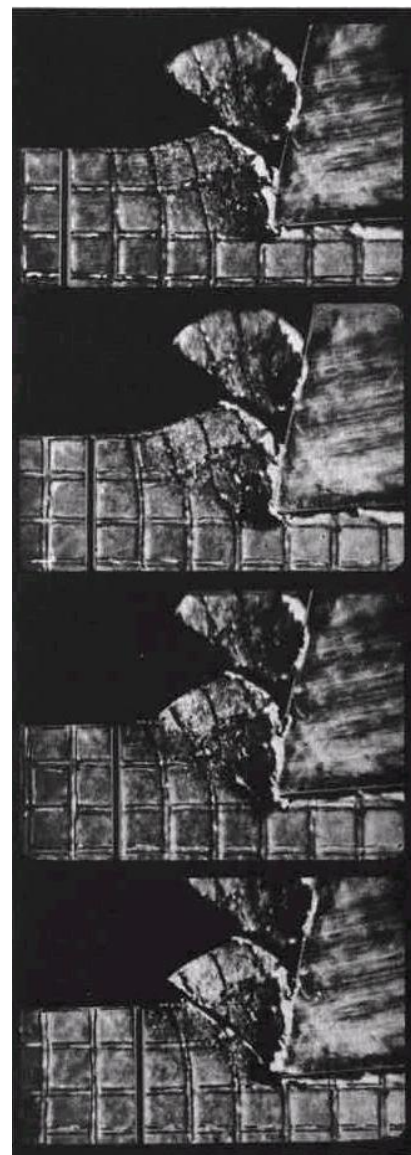


Рис. 2.2. Формирование элементной стружки со сдвигом элементов стружки по плоскости сдвига при строгании пластины (увеличено в 5 раз)

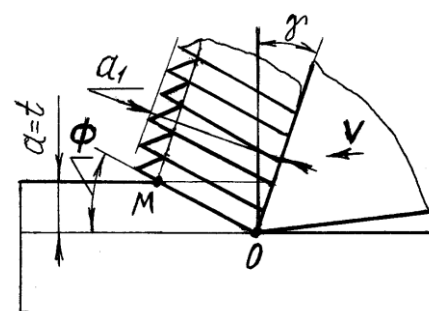


Рис. 2.3. Схема сдвига элементов стружки по условной плоскости сдвига при строгании пластины

$$l \times a \times b = l_1 \times a_1 \times b_1.$$

После переноса l_1 в левую часть уравнения получим:

$$l/l_1 = (a_1 \times b_1)/(a \times b).$$

$$k_l = l/l_1 = (a_1/a) \times (b_1/b) = k_a \times k_b,$$

где k_l – усадка стружки по длине; $k_a = a_1/a$ – усадка стружки по толщине; $k_b = b_1/b$ – усадка стружки по ширине.

Своё название «усадка стружки» термин получил из-за того, что длина стружки всегда меньше длины поверхности, с которой эта стружка была снята.

Из рис. 2.1 видно, что чем больше усадка стружки, тем меньше *угол условной плоскости сдвига* Φ . Угол Φ зависит от пластичности обрабатываемого металла, режимов резания, а в общем от усадки стружки по толщине k_a (K) и главного переднего угла γ :

$$\operatorname{tg} \Phi = \cos \gamma / (k_a \cdot \sin \gamma). \quad (2.1)$$

При движении стружки по передней поверхности инструмента чистая (*ювенильная*, т.е. не окисленная и ещё не взаимодействовавшая с атмосферой), только что образовавшаяся прирезцовая поверхность стружки «прилипает» к передней поверхности инструмента. Этому явлению (*адгезии*) способствует высокая температура стружки из-за выделения теплоты при пластической деформации в зоне стружкообразования. Большая величина *нормальной* (перпендикулярной к передней поверхности) *контактной нагрузки* в этой зоне ещё больше увеличивает этот эффект, в результате чего слой металла стружки, контактирующий с передней поверхностью резца, затормаживается (рис. 2.4). Выше расположенные слои стружки также замедляются, но всё же перемещаются относительно ниже расположенных (более близких к передней поверхности инструмента).

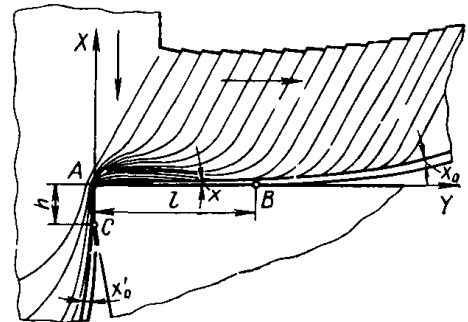


Рис. 2.4. Образование зоны вторичной пластической деформации

Такое явление носит название «*внутреннее трение*» и коэффициент этого трения $\mu = N/F$ отличается от коэффициента обычного внешнего трения скольжения, определяемым законом Ньютона-Кулона по такой же формуле $f = N/F$. Коэффициент внешнего трения скольжения f не зависит от нормальной нагрузки N , поэтому сила трения F может быть рассчитана по формуле $F = N \times f$, т.е. она зависит от нормальной нагрузки N .

В случае *внутреннего трения* сила трения F в прилегающей к режущей кромки зоне *не зависит от нормальной нагрузки* N , а зависит от предела прочности обрабатываемого материала на сдвиг τ при рассматриваемой температуре. Коэффициент внутреннего трения μ на участке OL не является постоянной величиной и во много раз меньше коэффициента трения скольжения f .

Из-за взаимного смещения слоёв металла в прирезцовой части стружки у режущей кромки происходят дополнительные пластические деформации,

поэтому зона FKL (см. рис. 2.1) является зоной **вторичных пластических деформаций**, т.е. происходящих после первичных пластических деформаций в зоне $D-I-E-O-F-K-G$. Длина участка **пластического** контакта $c_1 = (0,3 \dots 0,7) c$, где c – длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента (см. рис. 2.1). Для пластичных металлов, например, меди, коэффициент больше (приблизительно 0,7); для малопластичных, например, чугуна, – меньше (приблизительно 0,3); для конструкционной незакалённой стали – приблизительно 0,5.

На участке вторичных пластических деформаций отсутствует обычное внешнее трение, потому на участке OL практически отсутствует и абразивный износ, что можно видеть на фотографиях передней поверхности изношенного инструмента. Для конструкционной незакалённой стали длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента $c \approx (5 \dots 10) a$. При точении заготовки резцом с главным углом в плане φ с продольной подачей s (мм/об) толщина срезаемого слоя $a = s \times \sin \varphi$ (мм).

2.2. Методы исследования деформаций в зоне стружкообразования

2.2.1. Метод координатных сеток

Этот метод позволяет качественно и количественно оценить напряженно-деформированное состояние в зоне резания при образовании сливных и элементных (стружек скалывания) стружек. На боковой отшлифованной поверхности пластины из обрабатываемого материала твёрдосплавным острым наконечником или алмазным индентором царапанием наносится сетка. Размеры ячеек, с одной стороны, должны быть как можно меньше, чтобы точнее определить границы зоны деформации. С другой стороны, излишне малый размер ячеек не позволит различать границы после прохождения через зону пластической деформации и их искажения. Обычно размер ячеек сетки $0,01 \dots 0,1$ мм.

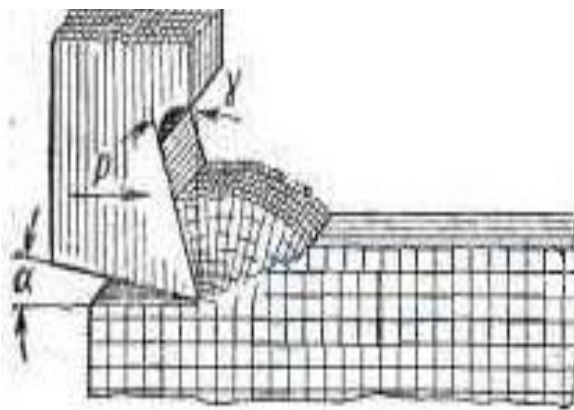


Рис. 2.5. Метод координатных сеток

Если не ставится задача о наблюдении деформации непосредственно при резании, то готовится обычно две пластины, которые затем сжимаются в тисках подготовленными поверхностями друг к другу для уменьшения выдавливания металла у боковой поверхности. Горизонтальные линии сетки должны быть параллельны направлению скорости резания.

По характеру искажения формы ячеек сеток можно получить представления о размерах зоны деформированного материала, количественных характеристиках напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и поверхностном слое детали, а также о контактных нагрузках и трении на поверхностях режущего клина.

Разновидностью этого метода является нанесение на боковую

поверхность лунок на твердомере (рис. 2.6, *a*). О степени деформации судят по изменению круглой формы в эллипсовидную. После прохождения материала заготовки через зону первичной пластической деформации **угол наклона главной оси эллипса** β всегда больше угла наклона условной плоскости сдвига Φ на величину ψ (**угол текстуры стружки**) (рис. 2.6, *б*). А.М. Розенберг вывел уравнение для расчёта этого угла:

$$\operatorname{ctg} \psi = \operatorname{tg}(\Phi - \gamma) + \frac{a \cos \Phi (1 + \operatorname{tg} \Phi)}{a \sin \Phi} = \operatorname{tg}(\Phi - \gamma) + 1 + \operatorname{ctg} \Phi = \varepsilon + 1, \quad (2.2)$$

где ε – относительный сдвиг, определяемый по формуле

$$\varepsilon = \operatorname{ctg} \Phi + \operatorname{tg}(\Phi - \gamma), \quad (2.3)$$

или

$$\varepsilon = \frac{\cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma) \sin \Phi} = \frac{K^2 - 2K \sin \gamma + 1}{K \cos \gamma}. \quad (2.4)$$

Угол текстуры стружки может быть определён и по формуле Боброва В.Ф.:

$$\operatorname{ctg} \psi = \frac{\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + 4}}{2}. \quad (2.5)$$

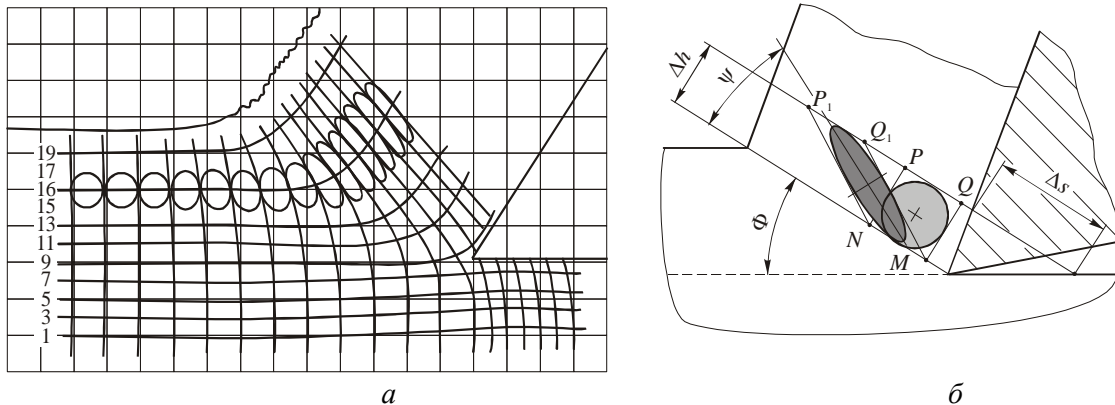


Рис.2.6. Искажения (*a*) координатной сетки, полученной методом вдавливания индентора (Г.Л. Куфарев) и угол наклона ψ главной оси эллипса, когда зерно деформируемого материала представлено в виде круга (*б*)

Относительный сдвиг при резании может быть определен также через скорость сдвига на условной плоскости сдвига v_Φ из уравнений

$$\varepsilon = \frac{v_\Phi}{v \sin \Phi} = \frac{\cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma) \sin \Phi}, \quad (2.6)$$

а скорость деформации по формуле

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta S}{\Delta h \Delta t} = \frac{v_\Phi}{\Delta h} = \frac{v \cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma) \Delta h}, \quad (2.7)$$

где Δh - протяжённость зоны первичных пластических деформаций, мм (рис. 2.6, б).

Скорость деформации $\dot{\epsilon}$ зависит от скорости резания v . При очень узкой зоне деформации Δh , которая составляет десятые доли миллиметра, скорость деформации $\dot{\epsilon}$ достигает очень больших значений. Например, при резании латуни резцом с углом $\gamma = +17^\circ$ и скоростью $v = 250$ м/мин скорость деформации $\dot{\epsilon} = 2,4 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ [14, Куфарев Г.Л.].

Таким образом, при резании скорость деформации по сравнению с механическими испытаниями выше в 10^6 раз, а степень деформации в несколько раз выше, чем при других видах пластической деформации. При этом деформация протекает при высоких температурах и давлениях на передней поверхности режущего клина. Все эти факторы необходимо учитывать, используя справочные данные о пределе прочности, текучести и пр., которые, как правило, были получены при нормальных температурах и в статических условиях.

Отсюда следует, что процесс резания металлов является процессом глубокой пластической деформации, протекающей в экстремальных условиях. Поэтому многие закономерности этого процесса в настоящее время не могут быть установлены чисто теоретически и являются результатом экспериментально-теоретических исследований.

2.2.2. Металлографический метод

При исследовании процесса резания металлографическим методом производят исследование шлифов стружки, обработанной поверхности, рабочей поверхности резца и, что особенно ценно, шлифов корня стружки в различных сечениях.

После прохождения материала заготовки через зону первичной пластической деформации границы зёрен искажаются и вытягиваются, что позволяет судить о направлении и степени пластической деформации (рис. 2.7).

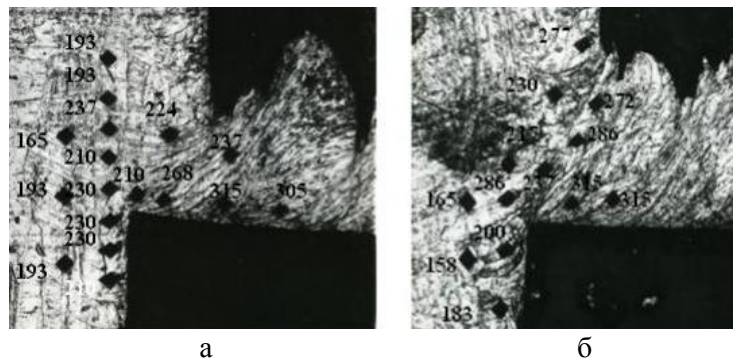


Рис. 2.7. Распределение микротвердости при точении стали: а – $V = 5$ м/мин; б – $V = 8$ м/мин

Наблюдая распределение микротвердости деформированного материала и зная величину интенсивности деформации, можно определить величины интенсивностей напряжений в различных точках зоны резания (рис. 2.7).

Для получения корней стружки необходимо осуществить быстрое прекращение процесса резания с помощью специальных устройств «мгновенного останова». Для мгновенного прекращения процесса резания существуют специальные приспособления ударного действия типа «падающего резца», схема которого приведена ниже (рис. 2.8).

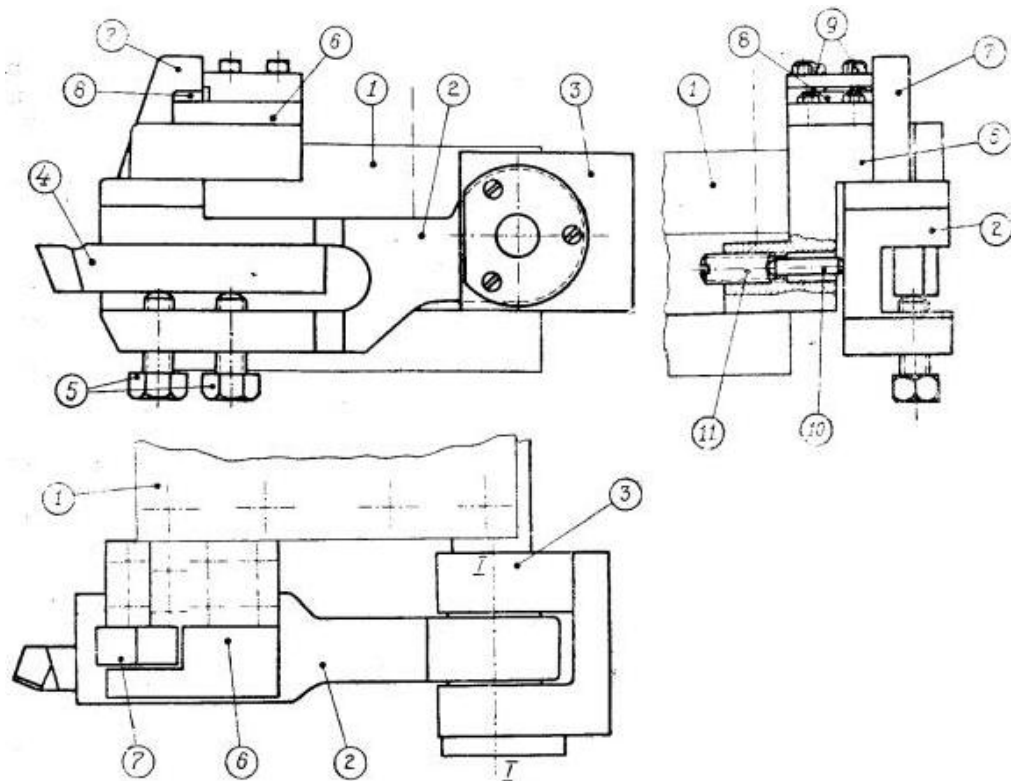


Рис. 2.8. Приспособление мгновенного останова резания для получения корня стружки

В резцедержателе *1* токарного станка устанавливается кронштейн *3*. В нём на подшипниках качения крепится хвост державки *2*, в полости которой закрепляется резец *4* с помощью болтов *5*. К державке жестко привинчена планка *7*, опирающаяся на фиксатор *8*, зажатый винтами *9* в кронштейне *6*. Последний также закрепляется в резцедержателе *1*. Откидывание резца в нужный момент производится ударом молотка по верхней плоскости планки *7*, что приводит к срезыванию фиксатора *8* и повороту державки *2* относительно оси I-I. Необходимое прилегание опорной плоскости планки *7* к верхней плоскости фиксатора обеспечивается смещением кронштейнов *3* и *6* по высоте с помощью прокладок. Изгиб державки *2* в горизонтальной плоскости под воздействием осевой силы P_x предотвращается с помощью стержня *10*, положение которого регулируется перед каждым опытом винтом *11*.

Описанное приспособление обеспечивает получение неповрежденных корней стружек вплоть до скоростей 170-190 м/мин. Для более быстрого останова В.А. Говорухиным вместо удара молотком применялся подрыв пиропатрона. Наиболее значимым является такой останов, при котором кусочек инструмента, контактирующий со стружкой, отламывается и остаётся с корнем стружки.

Приготовление макро- микрошлифов корня стружки производится следующим образом.

Обрабатываемая болванка имеет кольцевые вырезы. Каждая экспериментальная стружка делается на кольце, затем кольца вырезаются из болванки и из каждого кольца вырезается сегмент (стружка с корнем).

Полученный образец после отжига в муфельной печи при 200-220°C в течение 35-40 мин помещается в металлическое кольцо и заливается серой, сплавом Вуда или эпоксидным клеем. После отвердевания образец шлифуется сначала на плоско-шлифовальном станке, затем разными номерами наждачной бумаги, полируется на полировальном станке, на чертежной бумаге, смоченной керосином и покрытой пастой ГОИ, и окончательно полируется на сукне, покрытом пастой ГОИ. При шлифовании и полировании следующая операция производится под прямым углом к направлению следов от предыдущей обработки. Это необходимо для уменьшения трудоёмкости и определения окончания обработки: отделку прекращают как только исчезают следы от предыдущей обработки. При обработке необходимо тщательно контролировать размер абразивных зёрен: даже одно зерно, существенно большее по размеру с остальными, испортит поверхность, т.е. на ней останутся более глубокие и поэтому трудно удаляемые риски.

Обработанные таким образом образцы травят реактивом (обычно 10...30% раствор соляной или серной кислоты) в течение нескольких секунд. После травления образцы сначала быстро промывают в воде, затем протирают тряпкой и повторно промывают в этиловом спирте.

Концентрацию кислоты, её температуру и время травления подбирают в соответствии с материалом образца: если степень травления будет мала, то не проявится структура металла (вся поверхность будет белой); если же будет больше оптимального, то поверхность станет чёрной и негодной для исследования. Образцы изучают на металлографическом микроскопе и делают фотографии с необходимым увеличением.

2.2.3. Поляризационно-оптический метод

При исследованиях напряжённого состояния поляризационно-оптическим методом применяют образцы из однородного, изотропного прозрачного материала, например, стекла, целлулоида, ксилолита, фенолита и бакелита. При действии напряжений эти материалы становятся двоякопреломляющими.

Если пропустить пучок поляризованного света через прозрачную модель, находящуюся в напряженном состоянии, получается окрашенное изображение, по которому можно найти распределение напряжений (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Изохромы при резании целлулоида резцами с различными передними углами

Лучи, проходящие через образец, в разных точках и разных направлениях будут иметь разную скорость прохождения, в результате получится сдвиг фаз световых колебаний. Опыты показывают, что разность скоростей света пропорциональна разности напряжений.

В лаборатории резания металлов ТПУ под руководством М.Ф. Полетики была разработана и изготовлена поляризационно-оптическая установка. Установка монтировалась на токарном станке и состояла из оптической системы для наблюдения и фотографирования процесса резания в поляризованном свете и динамометра для измерения силы резания.

В качестве источника света использовалась ртутно-кварцевая лампа ДРШ-250. Для получения монохроматического света применялся либо зеленый фильтр ЖЗС-9, либо водный раствор сернокислого никеля. Круговая поляризация света обеспечивалась с помощью слюдяных пластинок.

Поляроиды диаметром в 45мм закрепляются в специальных втулках, которые могут поворачиваться на любой угол, отсчитываемый по лимбу, что позволяет определять направления главных напряжений при скрещенных поляризаторах. Фотографирование производилось с помощью фотокамеры 9×12.

Для измерения сил резания был изготовлен высокочувствительный упругоэлектрический двухкомпонентный динамометр, оснащенный тензодатчиками. Применение в этом приборе фольговых датчиков вместо проволочных дало возможность обойтись без усилителя, включая в измерительные диагонали мостов непосредственно вибраторы осциллографа. В качестве осциллографа использовался прибор ОТ-24-51 с вибратором ГЭМ-53 тип II. Роль исследуемого объекта выполнял либо прозрачный резец, изготовленный из оптически активного материала (при исследовании напряжений на резце), либо прозрачный диск (при исследовании напряжений в обрабатываемой детали).

Опыты проводятся обычно в условиях свободного прямоугольного резания диска с поперечной подачей.

При исследовании напряженного состояния в резце последний изготавливается из прозрачного оптически-чувствительного материала.

Обрабатываемым материалом являлся свинцовый диск диаметром 187 мм и шириной 3 мм. Диск обтачивался с поперечной подачей $S=0,475$ мм/об и скоростью резания $V=1,6$ мм/мин. Каждый опыт по оптическому определению напряжений повторялся дважды: первый раз с резцом из оптически малочувствительного материала (плексигласа) и при плоской поляризации света для снятия изоклин, второй раз – с резцом из оптически активной пластмассы (на основе эпоксидной смолы ЭД-6) при круговой поляризации света для снятия картины полос.

Предварительно было установлено, что изменение материала резца (с сохранением геометрических параметров) не влияет сколько-нибудь существенно на процесс резания.

В данном случае свободного резания при достаточно большой величине отношения ширины среза к его толщине (b/a) можно принять, что зона резания находится в плоском напряженном состоянии. Напряжения σ_N и τ_F в некоторой точке на поверхности контакта стружки с резцом, которые в соответствии с общепринятой терминологией удобнее обозначать через σ_y , τ_{xy} , будут при этом выражаться формулами

$$\tau_{xy} = \tau_F = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha, \quad (2.8)$$

$$\sigma_y = \sigma_N = \sigma_1 \cos^2 \alpha + \sigma_2 \sin^2 2\alpha, \quad (2.9)$$

где σ_1 и σ_2 – главные напряжения в рассматриваемой точке ($\sigma_1 > \sigma_2$); α – угол наклона расчетной площади к главной.

Методом полос экспериментально определяется разность главных напряжений, а по картине изоклин – направления главных напряжений. Для определения $\sigma_1 - \sigma_2$ в данной точке достаточно определить c – относительный оптический коэффициент напряжений для материала модели и измерить компенсатором оптическую разность хода D , или можно определить σ_0 модели и подсчитать порядок полосы m ($\sigma_0 = l/cd$ – разность главных напряжений в модели, вызывающих разность хода $D=l$; c и σ_0 получают при простом растяжении, сжатии или чистом изгибе на образцах из материала модели). Так как при нормальном просвечивании плоской модели можно получить только разность главных напряжений и их направление, то для определения σ_1 и σ_2 в отдельности существуют дополнительные физико-механические способы измерения $\sigma_1 + \sigma_2$, а также графовычислительные методы разделения σ_1 и σ_2 по известным $\sigma_1 - \sigma_2$ и их направлению, использующие уравнения механики сплошной среды. Полученные результаты представлены графиками на рис. 2.10 и 2.11. На первом приводится разность главных напряжений и угла наклона главного напряжения в разных точках по длине контакта, а на втором дается распределение нормальных и касательных напряжений на передней поверхности. Характер кривых распределения напряжений такой же, каким он получается при иных методах исследования.

Для исследования напряжений в обрабатываемом материале перед резцом, приготавливают прозрачные диски из целлулоида. Целлулоид выбран потому, что он имитирует пластичные металлы по своим механическим свойствам, дает при резании сливную стружку и сохраняет достаточную прозрачность и упруго-оптические свойства при малых пластических деформациях.

На рис. 2.12, а приведена картина изохроматических полос и изоклин, полученная при скорости резания $v = 0,8$ м/мин и подаче

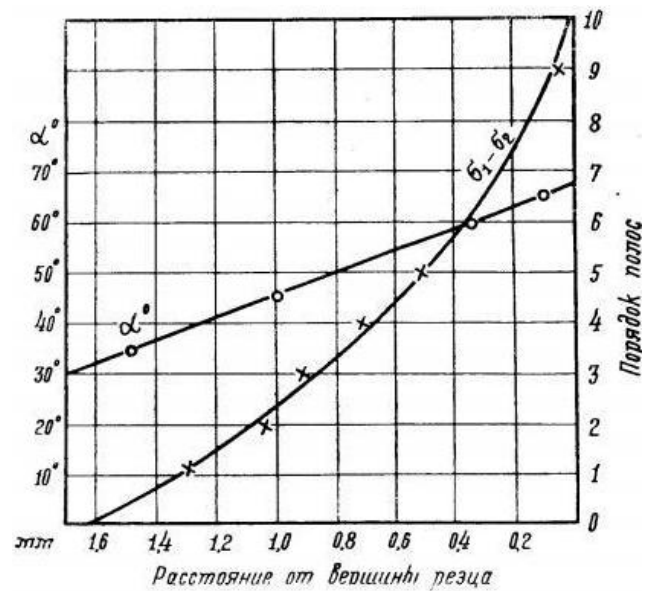


Рис. 2.10. Разность главных напряжений и угла наклона главного напряжения в разных точках по длине контакта

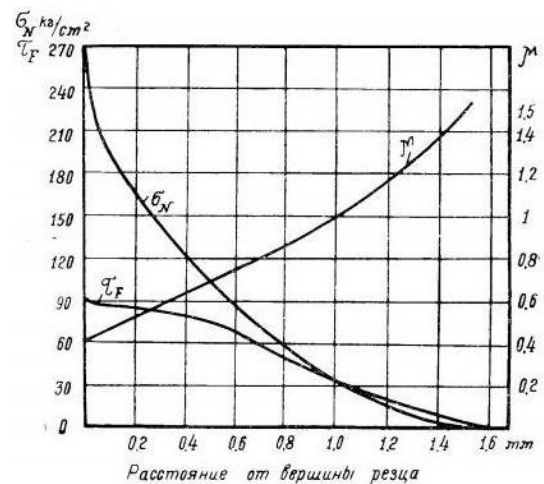


Рис. 2.11. Распределение нормальных и касательных напряжений на передней поверхности

$s = 0,475$ мм/об. Из рисунка видно, что упругая область под резцом делится нейтральной линией на две зоны: зону сжимающих напряжений перед резцом и зону растягивающих напряжений позади резца. Все изохроматические полосы выходят из вершины резца, которая является, таким образом, точкой, концентрации напряжений.

На линии AB упругие деформации переходят в пластические, то есть напряжения вдоль этой линии, которую можно назвать граничной, достигают предела текучести материала. Так как эта линия соответствует полосе одного порядка, то все лежащие на ней точки имеют постоянную разность главных напряжений.

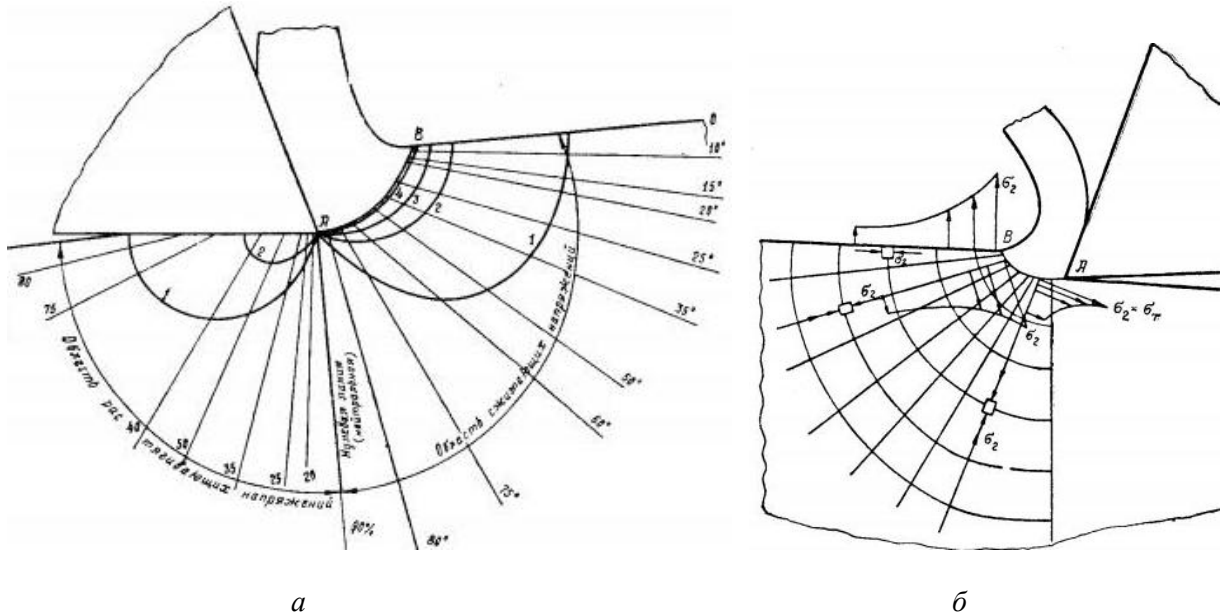


Рис. 2.12. Картины изохроматических полос и изоклин (а) и траектории главных напряжений (б), полученные при резании диска из целлулоида. $\gamma=10^\circ$, $\alpha=15^\circ$, $v = 0,8$ м/мин, $s = 0,475$ мм/об.

Обращаясь к рис. 2.12, б, на котором показаны траектории главных напряжений, видно, что эти линии практически можно считать прямыми. Это означает, что второе главное напряжение несущественно мало и можно принять его равным нулю.

Помимо траекторий главных напряжений, можно рассчитать и построить графически траектории максимальных касательных напряжений (рис. 2.13). Из рисунка

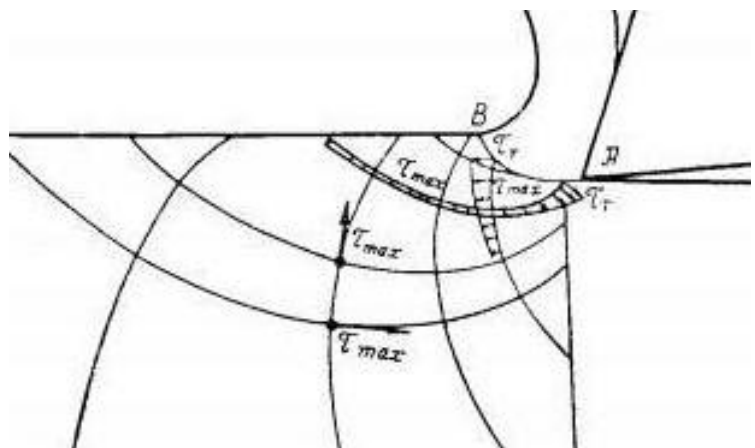


Рис. 2.13. Траектории максимальных касательных напряжений, полученные при резании диска из целлулоида. $\gamma=10^\circ$, $\alpha=15^\circ$, $v = 0,8$ м/мин, $s = 0,475$ мм/об.

видно, что как касательные, так и нормальные напряжения по мере отдаления от граничной линии *AB* непрерывно уменьшаются.

Изложенный выше материал позволяет сделать следующие выводы:

1. Поляризационно-оптический (упруго-оптический) метод исследования напряжений в приложении к процессу резания металлов дает точные количественные результаты.
2. Поляризационно-оптический метод показывает, что существуют две зоны напряжений: зона сжимающих напряжений впереди резца и зона растягивающих напряжений сзади резца.
3. Граничная линия, где упругие деформации переходят в пластические, является криволинейной, а напряжения на ней достигают предела текучести ненаклёпанного материала. Эта линия не является траекторией максимальных касательных напряжений, а поэтому ее нельзя назвать линией скольжения.

Важным достоинством поляризационно-оптического метода является то, что картины распределения напряжений, получаемые оптическим методом на прозрачных веществах, и все выводы остаются справедливыми для любых непрозрачных однородных материалов. Иначе говоря, картина распределения напряжений, получаемая оптическим методом, не зависит от природы испытуемого материала. Вследствие этого оптический метод может применяться для моделирования процесса резания с разной геометрией в главной секущей плоскости и толщиной среза.

2.2.4. Метод лазерной интерферометрии

Недостатком поляризационно-оптического метода является то, что он применим только при обработке мягких материалов. Для исследований процессов при резании стали и других прочных и твёрдых материалов может быть использован метод лазерной интерферометрии.

Сущность этого метода заключается в том, что на боковую поверхность заготовки и инструмента направляется поляризованный монохроматический луч лазера. Монохроматический свет используется для того, чтобы свет не разбивался на спектр, что уменьшает чёткость картин полос. Отражённый от резца и заготовки свет попадает на экран, где происходит интерференция волн света (наложение) базового и отражённого излучения. При деформации боковая поверхность резца и заготовки немного уширяется и расстояние до лазера уменьшается на сотые и тысячные доли

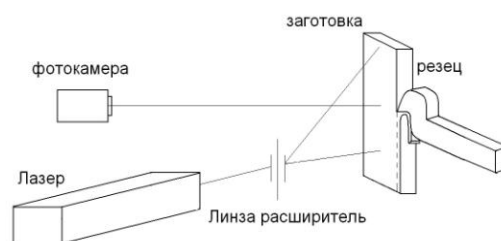


Рис. 2.14. Схема съемки спекл-фотографии

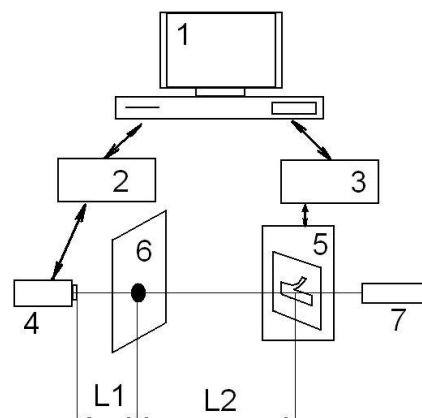


Рис. 2.15. Схема установки сканирования спеклограмм

микрометра, что и отражается на экране. Чем больше деформация объекта исследования, тем больше количество полос будет наблюдаться на экране.

Данный метод можно осуществить на установке для съемки спекл-фотографии (рис. 2.14). Конструктивно установка состоит из следующих элементов: строгальное приспособление для получения стружки, которое содержит заготовку в виде пластины из стали, чугуна или алюминия и строгальный резец; приспособление в захватах испытательной машины «Instron 1185»; лазер, освещающий расширенным лазерным пучком заготовку, закрепленную в захватах приспособления; расширительной линзы и фотокамеры, необходимой для съемки спеклограмм в процессе стружкообразования.

Для автоматизации процесса расшифровки спеклограмм применяется исследовательская установка «DISCOVER», упрощенная схема которой приведена на рис. 8. Спеклограмма устанавливается на микроподвижный стол 5 с дистанционным управлением. Столик позволяет перемещать спеклограмму в ее плоскости по двум координатам X и Y в пределах 100 мм, с минимальным шагом 14 мкм и ошибкой позиционирования 0,5%. Перемещения осуществляются двумя миниатюрными шаговыми двигателями, которые управляются персональным компьютером 1 с помощью встроенного интерфейса 3. Спеклограмма просвечивается лазером 7 с диаметром пучка 0,8 мм и мощностью 25 мВт. Картина волн пластической деформации за счет дифракции на спеклограмме формируется на полупрозрачном экране 6 с зачерненным, для уменьшения интенсивности центрального пятна гало, центром. Позади экрана на фиксированном расстоянии L2 расположена видеокамера 4. Сигнал с видеокамеры поступает на встроенный в компьютер интерфейс 2, который производит оцифровку TV сигнала и осуществляет программно-управляемый ввод данных в оперативную память компьютера.

Управление комплексом в режиме сканирования спеклограммы осуществляется программой «DISCOVER», которая анализирует изображение картины волн, вычисляет их шаг и наклон, перемещает спеклограмму в соответствии с определенным рабочим полем сканирования.

Имеющиеся в настоящее время экспериментальные и теоретические знания о пластической деформации, полученные методом спекл-интерферометрии, позволяют корректно описывать и объяснять закономерности разрушения при резании металлов.

2.3. Методы измерения остаточных напряжений и наклёпа обработанной поверхности

Наряду со стружкой определённый слой материала заготовки на обработанной поверхности тоже деформируется. Сначала он упруго-пластически деформируется после прохождения зоны первичной пластической деформации, т.к. её фронтальная граница у режущей кромки проходит ниже линии среза (см. рис. 2.1), и чем больше зона первичной пластической деформации, тем в большей степени и на большей глубине происходят пластические деформации от зоны первичной пластической деформации. Дополнительную пластическую деформацию получает обработанная поверхность в результате подмятия слоя материала толщиной

h_i под радиусный участок режущей кромки, что приводит к существенному увеличению и степени пластической деформации, у глубины её проникновения.

Пластическая деформация поверхностного слоя приводит к её **наклёпу**. Наряду с повышением твёрдости это вызывает и повышенную склонность к образованию микро- и макротрещин, особенно при последующей закалке, существенному уменьшению усталостной прочности и увеличению остаточных напряжений.

Все эти факторы могут привести к короблению заготовки сразу же после обработки или спустя некоторое время (наследственность может сохраняться даже после многократных последующих обработок этой поверхности), уменьшению надёжности работы детали при эксплуатации.

Для оценки глубины и степени пластической деформации применяется выборочный контроль твёрдости поверхностного слоя обработанных заготовок. Глубина наклёпа очень мала и составляет сотые доли миллиметра при полустойковой и чистой обработке, поэтому для увеличения протяжённости исследуемой области выполняется косой шлиф под углом α к поверхности заготовки (рис.2.16, а). Величина этого угла – несколько градусов: чем меньше глубина слоя, тем меньше должен быть этот угол.

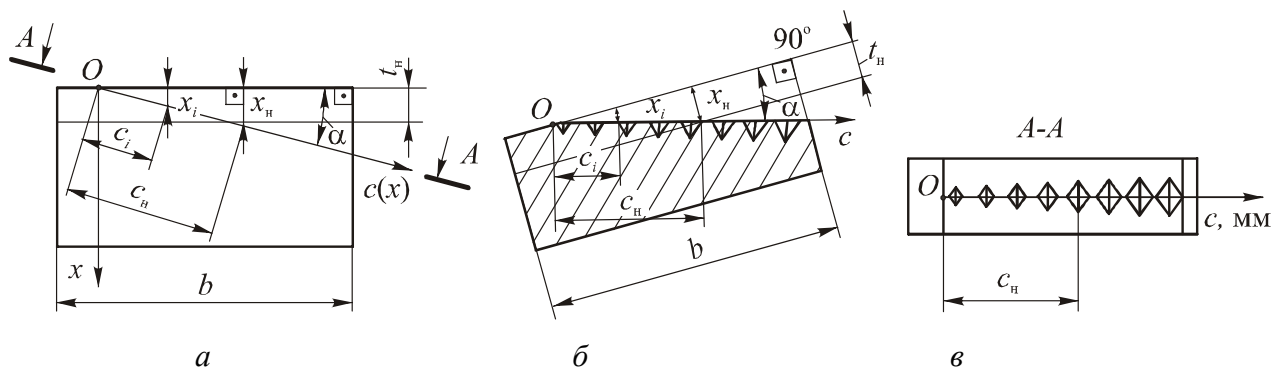


Рис.2.16. Исследование глубины и степени наклёпа: а – выполнение косого шлифа под углом α к поверхности заготовки; б – положение контролируемой поверхности при измерении её микротвёрдости; в – размеры отпечатков при измерении микротвёрдости

После этого измеряется микротвёрдость по Виккерсу (HV) поверхности образовавшейся гипотенузы прямоугольного треугольника (рис.2.16, б), где катетом является глубина исследуемой зоны

$$x_i = c_i \times \sin \alpha, \text{ [мм]}, \quad (2.10)$$

где x_i – глубина исследуемой зоны, мм; c_i – расстояние от поверхности (от точки O) до исследуемой зоны по поверхности косого шлифа, мм.

Чем больше степень наклёпа, тем больше твёрдость и тем меньше

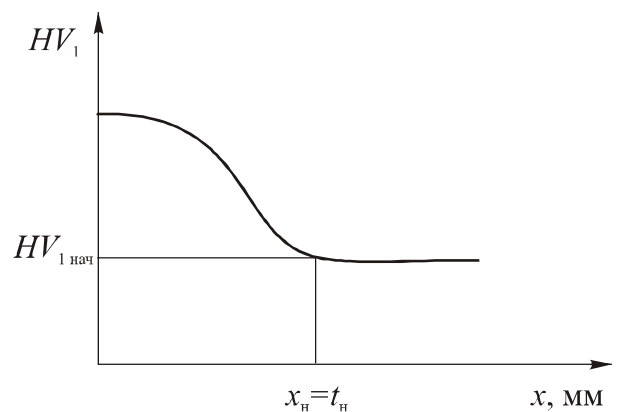


Рис.2.17. Изменение микротвёрдости в зависимости от глубины от поверхности заготовки

размеры отпечатка после внедрения индентора (рис.2.16, в, вблизи точки O)

По результатам измерений строится график, где по оси абсцисс откладывается глубина исследуемой зоны (катет x_i на рис.2.16, а), по оси ординат – микротвёрдость на этой глубине (рис.2.17).

На графике видно, что сначала твёрдость не изменяется или изменяется незначительно – это соответствует наибольшей величине наклёпа. Затем с удалением от поверхности твёрдость уменьшается, что свидетельствует об уменьшении степени наклёпа. Величина $x_i = x_n$ на графике, начиная с которой твёрдость не изменяется и равна твёрдости исходной заготовки до обработки есть глубина наклёпанного слоя t_n , хотя, как это было показано, степень его наклёпа не везде одинакова.

Остаточные напряжения характеризуются:

- 1) знаком: растягивающие – со знаком (+), сжимающие – со знаком (-) (рис. 2.18, б);
- 2) текущей величиной по абсолютному значению $|\sigma_{ост i}|$ и максимальной величиной по абсолютному значению $|\sigma_{ост max}|$ (рис. 2.18, б);
- 3) глубиной нахождения максимального значения σ_{max} .

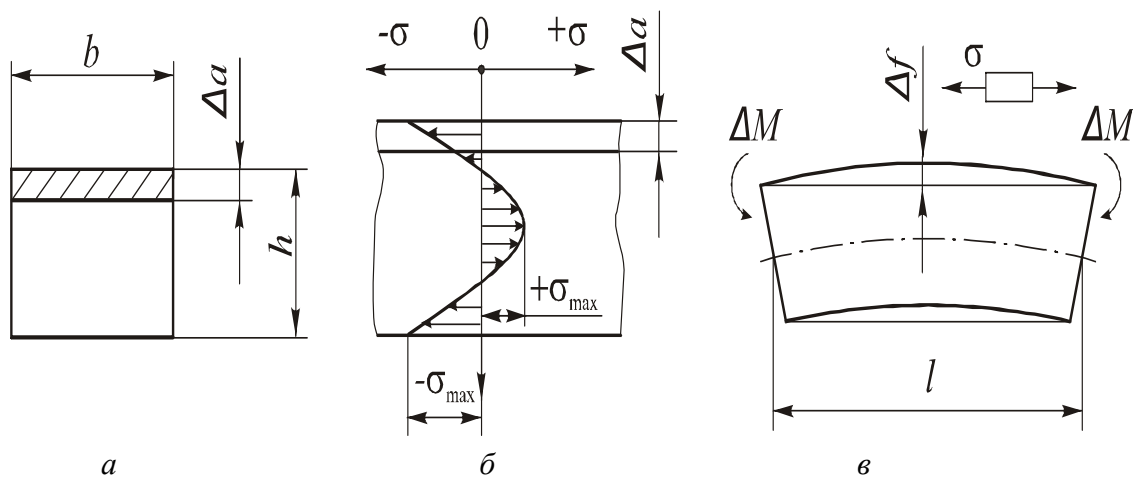


Рис.2.18. Определение остаточных напряжений в заготовке механическим путём: а – удаление слоя металла толщиной Δa ; б – пример распределения остаточных напряжений в заготовке; в – изгиб пластины после удаление слоя металла толщиной Δa от перераспределения остаточных напряжений

Остаточные напряжения могут определяться разрушающим контролем (механическим путём) и неразрушающим контролем (с использованием рентгеновских лучей, ультразвуковых или акустических колебаний).

Рентгеновский метод основан на измерении разницы параметров кристаллической решётки обработанной поверхности и не деформированной решётки материала заготовки. Существенными недостатками этого метода являются невысокая точность и трудоёмкость.

Для измерения остаточных напряжений механическим путём применяется последовательное поэтапное шлифование поверхности заготовки с измерением деформации заготовки на каждом этапе (рис. 2.18, а).

После удаления с поверхности пластины слоя материала толщиной Δa

пластина изгибается с величиной прогиба Δf (рис. 2.18, в). Этот прогиб вызван появлением момента ΔM от перераспределения внутренних напряжений, которые были уравновешены до удаления слоя материала (рис. 2.18, б). Из сопромата известно, что этот прогиб может быть рассчитан по формуле

$$\Delta f = \Delta M \times \ell^2 / 8EJ, \text{ [мм]}, \quad (2.11)$$

где: ℓ – длина пластины, мм; E – модуль упругости (модуль Юнга), н/мм (МПА); J – момент сопротивления изгибу, мм⁴.

Для простейшего случая – изгиба пластины, – момент сопротивления определяется по формуле

$$J = b \times h^3 / 12, \text{ [мм}^4\text{]}, \quad (2.12)$$

где: b – ширина пластины, мм; h – толщина пластины, мм.

Изгибающий момент при изгибе от перераспределения остаточных напряжений

$$\Delta M = \sigma_{\text{ост}} \times \Delta a \times b \times h/2, \text{ [Н}\cdot\text{мм]}, \quad (2.13)$$

где: $\sigma_{\text{ост}}$ – остаточные напряжения на контролируемой глубине, Н/мм²; Δa – толщина удаляемого слоя при определении остаточного напряжения механическим способом, мм.

Контролируемая глубина h_i рассчитывается по формуле

$$h_i = \Delta a_1 + \Delta a_1 + \dots + \Delta a_i, \text{ [мм]}, \quad (2.14)$$

где: Δa_i – толщина удаляемого слоя на каждом предварительном этапе определения остаточных напряжений, мм.

В результате преобразований получается формула для определения остаточные напряжения на контролируемой глубине h_i

$$\sigma_{\text{ост}i} = \frac{4}{3} \cdot \frac{E \cdot h^2}{\ell^2} \cdot \frac{\Delta f_i}{\Delta a}, \text{ [Н/мм}^2\text{]}. \quad (2.15)$$

где: Δf_i – величина прогиба на i -том этапе определения остаточных напряжений, мм; E – модуль упругости (модуль Юнга), Н/мм².

$$E = \sigma / \varepsilon, \text{ [Н/мм}^2\text{]}, \quad (2.16)$$

где: σ – напряжение, возникающее в образце при его относительной упругой деформации ε ($\varepsilon = \Delta \ell / \ell$, где $\Delta \ell$ – удлинение образца длиной ℓ под действием растягивающей силы P , Н); $\sigma = P/S$, где S – площадь поперечного сечения образца, мм².

Для уменьшения наклёпа и остаточных напряжений применяется термическая обработка: отжиг и отпуск. Отжиг характеризуется нагревом на

высокую температуру – вплоть до температуры рекристаллизации, – и медленным остыванием в догревочной печи. Он применяется только в том случае, когда степень наклёпа очень большая и требуется практически полностью избавиться от него.

Отпуск характеризуется нагревом на меньшую температуру и более быстрым остыванием на воздухе или в теплоизолированных камерах. Он бывает высоким, средним и низким в зависимости от температуры нагрева и скоростью охлаждения.

Для уменьшения остаточных напряжений может применяться естественное или искусственное старение, однако на промежуточных этапах изготовления детали они практически не используются.

Для уменьшения наклёпа и остаточных напряжений необходимо использовать жёсткое закрепление заготовки при её обработке, острозаточенные инструменты с оптимальной геометрией и не допускать их существенного износа, применять небольшие подачи и глубину резания, использовать обильный полив СОЖ для предотвращения нагрева заготовки и т.п. Всё это положительно сказывается на точности изготовления и увеличении надёжности работы.

§ 2.3. Способы определения силы резания и мощности станка

2.3.1. Динамометрический способ

При снятии стружки на резец действует сила резания P (рис. 2.18). Эта сила имеет как величину, так и направление. Для удобства анализа и измерения общую силу резания P раскладывают на составляющие P_z , P_y , P_x как проекции силы P на оси декартовых координат OZ , OY , OX .

Ось OZ направлена перпендикулярно основной плоскости (плоскости, в которой происходит перемещение в продольном и поперечном направлении) и при точении в большинстве случаев эта ось вертикальна и по ней направлен вектор скорости резания V .

Ось OX расположена в основной плоскости и при точении направлена параллельно оси вращения шпинделя и по ней направлен вектор продольной подачи $s_{\text{прод}}$.

Ось OY расположена в основной плоскости и при точении направлена перпендикулярно оси вращения шпинделя и по ней направлен вектор поперечной подачи $s_{\text{попер}}$.

Основная плоскость лежит в плоскости XOY , а проекция силы резания P на эту плоскость есть составляющая силы резания P_{xy} . В свою очередь проекция P_{xy} на ось OX есть составляющая силы резания P_x , а

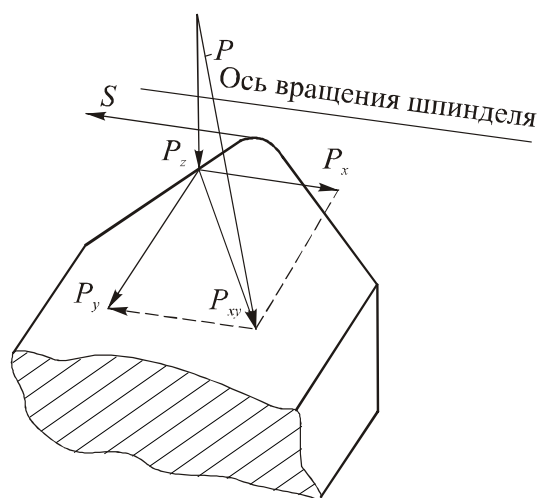


Рис. 2.18. Составляющие силы резания P .

проекция P_{xy} на ось OY есть составляющая силы резания P_y . Проекция силы резания P на ось OZ есть составляющая силы резания P_z .

От составляющей силы резания P_x зависит требуемое усилие для продольной подачи и от неё зависит расчёт механизма подачи токарного станка.

От составляющей силы резания P_y зависит требуемое усилие для поперечной подачи и упругая деформация заготовки при её обработке на токарном станке, т.е. точность обработки. Для уменьшения P_y при обработке *маложёстких* заготовок используются резцы с главным углом в плане $\varphi=90^\circ$ даже в том случае, когда имеется свободный выход резца в продольном направлении и целесообразно применять $\varphi=45^\circ$ для увеличения стойкости инструмента. С этой же целью используются малые радиусы при вершине $R=0,2..0,5$ мм.

От составляющей силы резания P_z зависит требуемая мощность станка. Мощность $N = P \times V$, где: P – сила, Н; V – скорость в направлении действия силы P , м/с; N – мощность, Вт.

В направлении действия силы P_y скорость при продольном точении равна нулю, поэтому и составляющая мощности резания N_y тоже равна нулю, какой бы большой составляющая P_y ни была.

В направлении действия силы P_x скорость при продольном точении очень мала, т.к. соответствует продольной подаче. Даже при черновом точении продольная подача $s_{прод} \approx 0,3..0,8$ мм/об, что при частоте вращения шпинделя даже $n = 1000$ об/мин соответствует скорости в продольном направлении (направлении действия составляющей силы резания P_x) $V_x = s \times n = 0,8 \times 1000 = 800$ мм/мин = $13,3$ мм/с = $0,013$ м/с. Поэтому и составляющая мощности резания $N_x = P_x \times V_x$ тоже очень мала, какой бы большой составляющая P_x ни была.

В направлении действия составляющей силы резания P_z скорость соответствует скорости резания V . Даже при черновом точении $V_z = V \approx 100..200$ м/мин $\approx 3,3$ м/с, что в 256 раз больше скорости продольной подачи. Составляющая силы резания P_z тоже максимальна, поэтому и составляющая мощности резания N_z имеет преобладающее значение.

Исходя из выше сказанного, **мощность резания**

$$N_{рез} = P_z \times V, \quad (2.17)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания P , Н; V – скорость резания, м/с; $N_{рез}$ – мощность резания, Вт. Иногда мощность резания $N_{рез}$ обозначают как **эффективная мощность** $N_{эф}$ (N_e).

Требуемая **мощность станка** $N_{ст}$ обычно должна быть в 1,5...2 раза больше мощности резания $N_{рез}$ для гарантированного обеспечения крутящего момента с учётом к.п.д. коробки скоростей и износа инструмента, т.к. при существенном износе составляющая силы резания P_z увеличивается в 1,2...1,5 раза. Если крутящий момент от электродвигателя на шпинделе окажется меньше крутящего момента резания, то вращение заготовки прекратится и инструмент сломается.

Для измерения составляющих силы резания используют динамометр (рис. 2.19 и 2.21). Указанный на рисунке динамометр называется трёхкомпонентным потому, что можно измерить три составляющие (компоненты) силы резания – P_z , P_y и P_x . Существуют и четырёхкомпонентные фрезерные динамометры, позволяющие дополнительно измерять крутящий момент.

Динамометр (рис. 2.21) состоит из чувствительных упругих элементов (1), (3), (4), которые упруго деформируются от действующей на них силы резания. На упругие элементы наклеиваются тензометрические датчики D_{1P_x} , D_{2P_x} , D_{1P_z} , D_{2P_z} , D_{1P_y} , D_{2P_y} , D_{3P_y} , D_{4P_y} и т.д. У тензорезистивных датчиков его длина l (рис. 2.20) изменяется при деформации контактных поверхностей упругих элементов, на которые эти датчики наклеены, что приводит к изменению сопротивления, а значит и к изменению силы тока или напряжения. Эти весьма малые изменения силы тока или напряжения усиливаются усилителем и подаются на регистрирующие приборы.

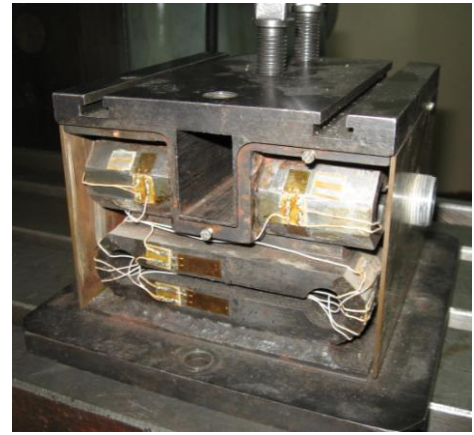


Рис. 2.19. Динамометр токарный трёхкомпонентный конструкции В.Н. Сбоева и В.В. Брюхова



Рис. 2.20. Тензометрический проволочный датчик

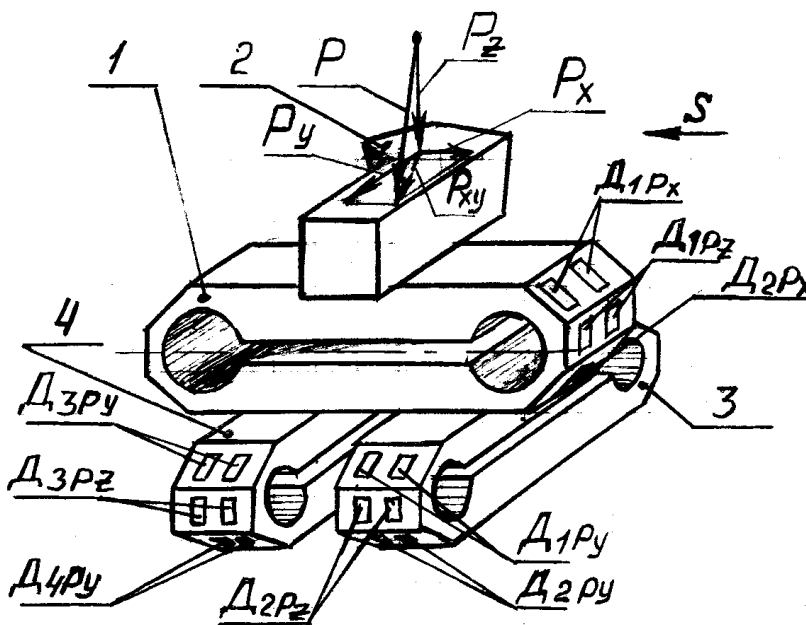


Рис. 2.21. Схема устройства трёхкомпонентного токарного динамометра. 1 – верхний упругий элемент для измерения составляющих силы резания P_x и P_z ; 2 – резец; 3 и 4 – нижние упругие элементы для измерения составляющих силы резания P_y и P_z ; D_{1P_x} , D_{2P_x} , D_{1P_z} , D_{2P_z} , D_{1P_y} , D_{2P_y} , D_{3P_y} , D_{4P_y} – тензодатчики для измерения составляющих силы резания соответственно их индексам.

В качестве регистрирующих приборов могут быть использованы самописцы, осциллографы, стрелочные приборы.

Самыми простыми и дешёвыми являются стрелочные приборы – микроамперметры (рис. 2.22) и милливольтметры, однако они могут быть использованы для изучения только сравнительно медленно протекающих процессов (статических), к тому же невозможно зафиксировать (записать аппаратно) результаты измерений.



Рис. 2.22. Усилитель с регистрирующими приборами (микроамперметрами) по четырём каналам

Использование многоканальных самописцев позволяет фиксировать (записывать) результаты измерений, но тоже при сравнительно медленных процессах (несколько герц).

Для быстропротекающих процессов (несколько кГц) часто использовались осциллографы с записью на фотобумагу.

В последнее время всё чаще сигнал через аналогово-цифровой преобразователь подаётся на персональный компьютер или ноутбук, что позволяет записывать силовые зависимости даже при быстро протекающих процессах и облегчает дальнейший анализ экспериментальных данных.

В качестве чувствительных упругих элементов чаще всего используют круглые (рис. 2.23) или удлинённые восьмигранные (см. рис. 2.21) кольца.

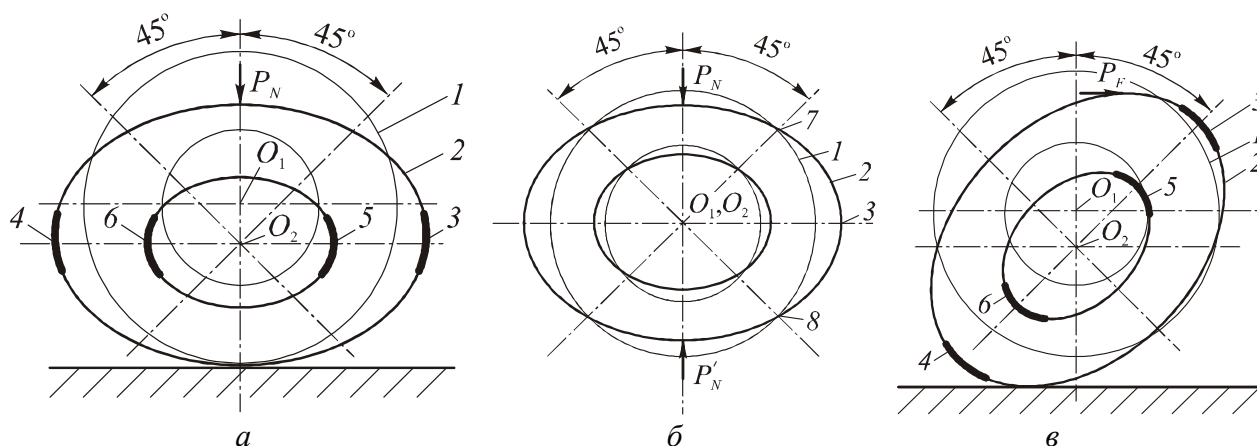


Рис. 2.23. Схема деформирования упругого элемента динамометра: *a* – схема деформирования кольца под воздействием только вертикальной силы P_N ; *б* – схема деформирования кольца под воздействием только вертикальной силы P_N сверху и снизу, при которой ось кольца не смещается; *в* – схема деформирования кольца под воздействием только горизонтальной силы P_F ;

1 - положение поверхности кольца до деформирования; *2* – положение поверхности кольца после деформирования; *3, 4, 5, 6* – места расположения тензодатчика для наибольшей чувствительности к деформации кольца

При воздействии на кольцо **вертикальной силы P_N** (см. рис. 2.23, *a*) оно деформируется, причём наибольшие деформации будут в горизонтальной и вертикальной плоскостях, т.е. в местах *3, 4, 5* и *6*, поэтому наклеенные в этих местах тензодатчики будут в наибольшей степени реагировать на силу P_N (или вертикальную составляющую силы резания P_z).

В плоскостях, расположенных относительно вертикальной плоскости под углом 45° , при воздействии на кольцо только вертикальной силы P_N (или вертикальной составляющей силы резания P_z) деформаций кольца практически не будет, поэтому наклеенные в этих местах тензодатчики не будут реагировать на вертикальную составляющую силы резания P_z .

При воздействии на кольцо **горизонтальной силы P_F** (рис. 2.23, в) оно деформируется таким образом, что наибольшие деформации будут в плоскостях, расположенных относительно вертикальной плоскости под углом 45° , в местах 3, 4, 5 и 6 (рис. 2.23, в), поэтому наклеенные в этих местах тензодатчики будут в наибольшей степени реагировать на горизонтальную силу P_F (или составляющие силы резания P_x или P_y).

В плоскостях, расположенных вертикально и горизонтально, при воздействии на кольцо только горизонтальной силы P_F (или составляющих силы резания P_x или P_y) деформаций кольца практически не будет, поэтому наклеенные в этих местах тензодатчики не будут реагировать на горизонтальную силу P_F (или составляющие силы резания P_x или P_y).

Для уменьшения влияния третьей составляющей силы резания используется большая ширина кольца для повышения жёсткости в этом направлении.

Таким образом, особенностью деформации кольца является отсутствие взаимовлияния вертикальной и горизонтальной сил на упругую деформацию кольца. Поэтому при измерении силы резания P датчики D_{P_x} будут реагировать только на составляющую силы резания P_x , датчики D_{P_y} будут реагировать только на составляющую P_y , а датчики D_{P_z} будут реагировать только на составляющую P_z . Сила резания P будет равна корню квадратному из суммы квадратов составляющих силы резания.

Для облегчения наклейки тензодатчиков используются восьмигранные кольца, а для увеличения устойчивости применяются удлиненные восьмигранные упругие элементы (см. рис. 2.21). Продольный разрез внутри элемента применяется для уменьшения жёсткости и повышения чувствительности.

Толщина стенок рассчитывается исходя из измеряемых сил: чем больше сила, тем больше должна быть толщина стенок. При недостаточной толщине стенок возможно появление вибрации при резании, а при их большой величине измерение будет невозможно из-за слишком малой деформации упругих элементов.

Для повышения чувствительности динамометров применяются полупроводниковые тензодатчики – их чувствительность в сотни раз больше проволочных, что позволяет использовать более жёсткие упругие элементы. Недостатком полупроводниковых тензодатчиков является повышенный дрейф нуля в связи с изменением их сопротивления,

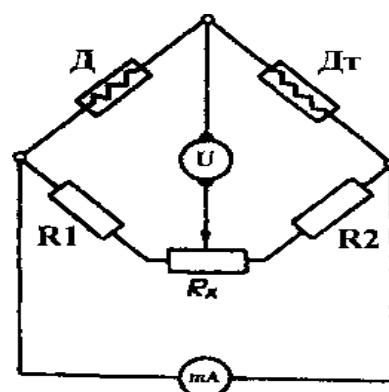


Рис. 2.24. Схема измерительного моста: Д - тензодатчик, Д_т - датчик температурной компенсации; R₁ и R₂ - сопротивления, R_x - переменное сопротивление для настройки баланса моста. mA - миллиамперметр; U - источник тока

что вызывает необходимость чаще проводить выставление на нуль и тарирование. В динамометрах могут использоваться и другие типы тензодатчиков: пьезокварцевые (пермалюевые), конденсаторные, электроиндукционные, вибрационно-частотные и пр.

Для увеличения чувствительности и компенсации температурных влияний в измерительную электрическую цепь включается второй, такой же датчик, наклеенный с противоположной стороны. Данная измерительная цепь представляет собой мостик сопротивлений на постоянном или переменном токе (рис. 2.24). До тех пор пока не производится резание переменным сопротивлением R_x в смежных плечах (ветвях) моста настраивается одинаковое сопротивление и мост находится в равновесном состоянии, а микроамперметр, включенный по диагонали, показывает ноль. При изменении сопротивления тензодатчика, вызванного его деформацией в процессе резания, в ветвях мостика получается различное падение напряжения, в результате стрелка микроамперметра отклонится и зафиксирует некоторую силу тока. Чем больше действующая сила резания, тем больше деформация детали с наклеенным датчиком, больше изменяется его сопротивление и выше показания микроамперметра.

В некоторых динамометрах, например универсальный динамометр УДМ конструкции ВНИИинструмент (рис. 2.25), в качестве упругих элементов используются не удлиненные кольца, а тонкостенные упругие элементы цилиндрической формы, расположенные таким образом, чтобы их шарниры позволяли им деформироваться только от тех составляющих силы резания, которые требуется измерять (рис. 2.26).

Динамометр УДМ состоит из корпуса 1, в который помещена

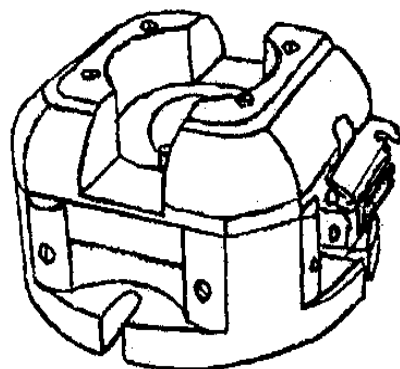


Рис. 2.25. Общий вид универсального динамометра УДМ

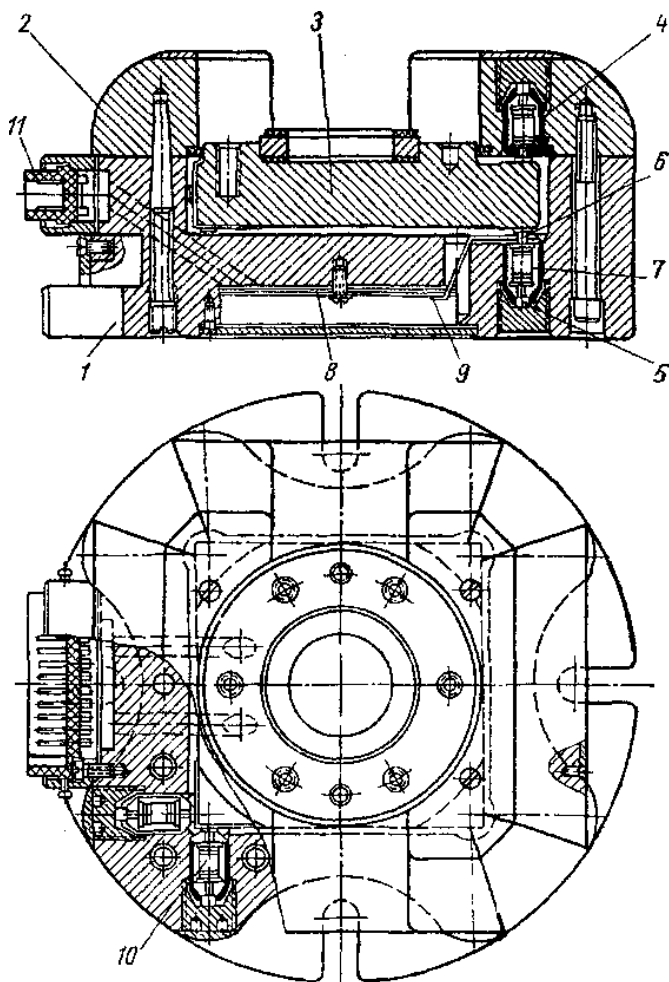


Рис. 2.26. Принципиальная схема динамометра типа УДМ

державка 3 (выполненная в виде квадратной плиты, на которую крепятся сменные приспособления) и закрытая сверху крышкой 2. Плита удерживается шестнадцатью опорами – тонкостенными упругими элементами цилиндрической формы 4, 7, 10 и др., на наружных и внутренних поверхностях которых наклеены проволочные тензорезисторы.

Все опоры установлены на ножки 5 и 6, образующие два упругих шарнира, которые обеспечивают большую жесткость в направлении оси опоры и малую жесткость в направлении, перпендикулярном оси, что позволяет опорам воспринимать нагрузку лишь в направлении вдоль оси.

Четыре опоры, расположенные параллельно оси X , воспринимают осевую силу « P_x », четыре опоры, расположенные параллельно оси Y , воспринимают радиальную силу « P_y » и восемь опор, расположенных параллельно оси Z , воспринимают тангенциальную силу « P_z ». Крутящий момент, относительно оси Z , при сверлении или нарезании резьбы воспринимается восемью опорами, расположенными в горизонтальной плоскости, совпадающей с осями X и Y .

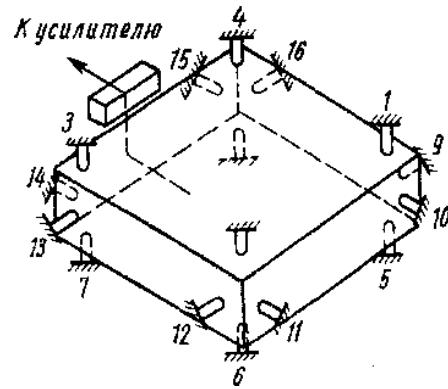


Рис. 2.27. Схема расположения тензодатчиков в динамометре типа УДМ

В нерабочем состоянии на опоры дается предварительная нагрузка, равномерно распределенная между всеми опорами и равная половине максимально допускаемой динамометром во время его работы. Плита находится во взвешенно-напряженном состоянии, что позволяет устранить зазоры и контактные деформации в стыках опор с плитой и корпусом, что повышает жесткость и чувствительность динамометра.

В схемах измерения сил P_z , P_y и P_x сигналы датчиков, наклеенных на опоры, алгебраически суммируются, так как алгебраическая сумма всех опорных реакций, действующих на плиту, пропорциональна измеряемой силе независимо от того, в какой точке она приложена. Это позволяет использовать при обработке токарные резцы различных типов, форморазмеров и с разным вылетом.

В схеме измерения крутящего момента $M_{кр}$ сигналы датчиков, наклеенных на опоры, оси которых расположены в горизонтальной плоскости, алгебраически вычитаются, что позволяет измерять величину крутящего момента в горизонтальной плоскости относительно оси Z , что используется при динамометрическом исследовании сверления или фрезерования.

Рис. 2.28. Динамометр

Динамометры типа УДМ выпускаются с максимальной нагрузкой 1200,

600, 300 и 100 кГс. Например, УДМ-600 имеет диапазоны рабочих нагрузок: $P_z = 600$ кГс, $P_y = 300$ кГс, $P_x = 300$ кГс и $M_{кр} = 5000$ кГс·м. Данные динамометры обладают высокой жесткостью и виброустойчивостью, стабильностью показаний, высокой чувствительностью и возможностью работы с охлаждением. Динамометры имеют небольшие габаритные размеры, просты в эксплуатации и легко переналаживаются на различные виды обработки.

Тарирование динамометра – это нахождение соответствия между действующей силой и показанием регистрирующего прибора. Для этого в динамометре вместо резца закрепляется тарировочная державка, на которую через эталонный динамометр воздействуют в требуемом направлении (по оси OX , OY или OZ) строго определённой силой (например, 5 Н, 100 Н, 500 Н и т.п.). При этом фиксируется сила тока или отклонение курсора на мониторе: например, при силе $P_N (P_z) = 100$ Н показание микроамперметра $I_{P_z} = 10$ мкА. В указанном примере тарировочный коэффициент по каналу P_z рассчитывается: $K_{P_z} = P_z / I_{P_z} = 100 / 10 = 10$ Н/мкА. Если во время эксперимента микроамперметр показывает 25 мкА, то можно вычислить действующую при этом силу: $P_z = I_{P_z} \times K_{P_z} = 25 \times 10 = 250$ Н.

2.3.2. Расчётный способ

Недостатком динамометрического способа является необходимость проведения исследования и наличие динамометра. При изменении марки обрабатываемого материала, геометрии режущего инструмента или режимов резания необходимо проведение эксперимента. На основе экспериментальных данных, полученных динамометрическим способом, появилась возможность рассчитать составляющие силы резания по формуле

$$P_{z,y,x} = C_P \times t^x \times s^y \times V^n \times K_P, \text{ [Н]}, \quad (2.18)$$

где C_P – коэффициент, зависящий от вида обработки, обрабатываемого и режущего материала, направления составляющей силы резания (P_z , P_y или P_x); t – глубина резания, мм; s – подача, мм/об; V – скорость резания, м/мин; x , y , n – показатели степени, зависящие от вида обработки и интервала глубины резания; K_P – поправочный коэффициент.

$$K_P = K_{M_p} \times K_{\varphi_p} \times K_{\gamma_p} \times K_{\lambda_p} \times K_{R_p}, \quad (2.19)$$

где K_{M_p} – коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала (прочности) на силу резания; K_{φ_p} – коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане φ на силу резания; K_{γ_p} – коэффициент, учитывающий влияние главного переднего угла в главной секущей плоскости γ на силу резания; K_{λ_p} – коэффициент, учитывающий влияние угла наклона главной режущей кромки λ на силу резания; K_{R_p} – коэффициент, учитывающий влияние радиуса при вершине резца R на силу резания.

Коэффициенты и показатели степени определяются в процессе измерений с помощью динамометра для групп обрабатываемых материалов при изменениях геометрии режущего инструмента и режимов резания, поэтому

такой расчётный способ иногда называется эмпирико-расчётный. После составления таблиц коэффициентов и показателей степени необходимости проведения экспериментов уже нет.

Мощность резания рассчитывается по формуле:

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}, [\text{кВт}] \quad (2.20)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания (совпадающая по направлению с вектором скорости резания), Н; V – скорость резания, м/мин.

Недостатком эмпирико-расчётного способа является невысокая точность совпадения результата расчёта и действительной величины составляющей силы резания в связи с непостоянством механических свойств обрабатываемого материала и особенностями протекания процесса резания. Отклонение от действительного значения составляет от 20 до 50%. Однако в условиях производства это практически единственный способ рассчитать требуемую мощность станка.

Разновидностью расчётного способа является приблизительный расчёт силы резания по формуле

$$P_z = q_P \times f, \quad (2.21)$$

где q_P – удельная сила резания, Н/мм²; f – площадь срезаемого слоя, мм² ($f \approx s \times t$); t – глубина резания, мм; s – подача, мм/об.

Площадь срезаемого слоя f , рассчитанная по вышеприведённой формуле, не учитывает наличие вспомогательного угла в плане φ_I , поэтому чем меньше этот угол у резца, чем меньше подача и больше глубина резания, тем ближе расчётное значение к действительному.

Удельная сила резания $q_P \approx 1000 \dots 5000 \text{ Н/мм}^2$ в зависимости от прочности и твёрдости обрабатываемого материала. Для стали 45 в состоянии поставки прутков $q_P \approx 1600 \text{ Н/мм}^2$. Чаще всего требуется знать только составляющую силы резания P_z для расчёта мощности станка, поэтому в производстве обычно не требуется высокая точность определения силы резания. Для расчёта приспособлений часто требуется знать все составляющие силы резания.

2.3.3. Определение силы резания по таблицам

В некоторых случаях ожидаемую величину составляющей силы резания можно найти в таблицах, составленных на эмпирической основе (на основе измерений с помощью динамометра). Составление таких таблиц очень трудоёмко, однако, как правило, найденное по ней значение ближе к действительному по сравнению с расчётным. Часто такие таблицы заносятся в базу данных компьютера, специальная программа которого находит искомую составляющую силы резания по заданным параметрам режима резания, геометрии режущего инструмента, марке и термической обработке обрабатываемого материала.

В производстве обычно не требуется высокая точность определения

силы резания, т.к. требуется определить лишь мощность станка, поэтому можно использовать производственные данные по мощности станка при обработке схожих групп материалов со схожими режимами резания.

Раздел 3. Тепловые явления при резании

3.1. Исследования температуры резания

Стойкость режущего инструмента во многом зависит от температуры рабочих поверхностей инструмента. Среди многочисленных методов определения температуры резания можно выделить четыре группы.

К первой группе относятся методы, с помощью которых *измеряется* только средняя температура стружки, изделия или резца: метод естественной термо-ЭДС, калориметрический метод.

Ко второй группе принадлежат методы, с помощью которых *измеряется* температура узкоограниченных участков зоны резания или резца, например: метод искусственных термопар; оптический и радиационный методы.

К третьей группе относятся методы, позволяющие сразу *экспериментально* определить распределение температуры на определенных участках изделия или резца (температурные поля): метод цветов побежалости, метод термокрасок.

К четвертой группе относятся расчётные и аналоговые методы, которые требуют начальных экспериментальных данных, полученных непосредственно при резании.

Наиболее простым способом определения средней температуры рабочих поверхностей инструмента (*температуры резания*) является способ *естественной термо-ЭДС* (электродвижущей силы), который основан на физическом эффекте возникновения разности потенциалов при нагреве места спая разнородных материалов. Как известно, при нагреве места спая проволок из двух разнородных металлов, например железо — константан, медь — константан, платина — иридий и т. д., в нем образуются заряды противоположных знаков. Если свободные концы проволок соединить, то в цепи возникает термоток, электродвижущая сила которого пропорциональна разности температур места спая и холодных концов проволок.

Величину электродвижущей силы или напряжения можно измерять с помощью гальванометра или милливольтметра, а силу тока — с помощью

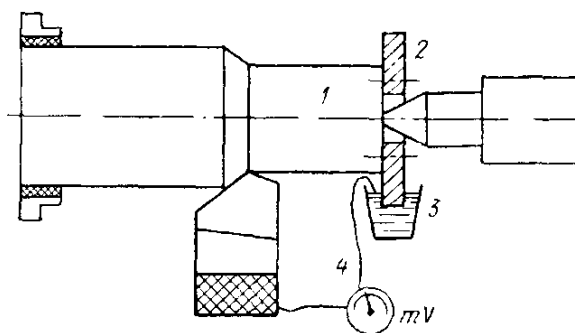


Рис. 3.1. Схема естественной термопары

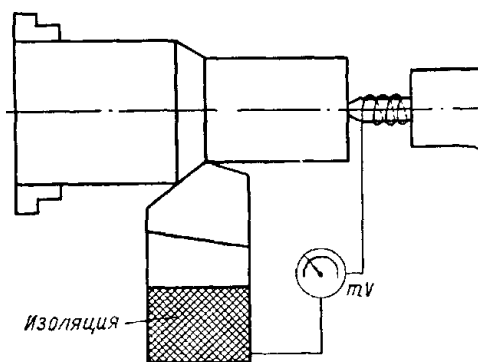


Рис. 3.2. Упрощенная схема естественной термопары

микроамперметра.

В этом *первом способе* исследования температуры роль естественной термопары играет контакт инструмента и стружки (рис. 3.1). В процессе резания в месте контакта разнородных материалов изделия и резца вследствие нагрева возникает электродвижущая сила. Ток в этом случае направляется по обрабатываемой детали 1 через медное кольцо 2, а затем через ртуть в ванне 3, служащей для контакта вращающегося кольца 2 с проволокой 4. При этом милливольтметр покажет напряжение термотока, по которому можно судить о температуре резания. Обрабатываемое изделие изолировано от патрона и заднего центра, а резец от суппорта — при помощи прокладок.

На практике этот метод измерения значительно упрощается тем, что отказываются от изолирования обрабатываемого изделия от станка. Контактное кольцо и ртуть, как показано на рис. 3.1, а также изолирование заднего центра от изделия были продиктованы желанием освободиться от второй дополнительной термопары, получающейся в месте контакта заднего центра и изделия; казалось бы, при этом дополнительный термоток должен нарушить правильность показаний основной термопары. Но в действительности роль второй термопары оказалась ничтожной вследствие слабого разогревания заднего центра по сравнению с резцом, и поэтому практически стало вполне возможным работать и без изоляции заднего центра (рис. 3.2). Это значительно упростило все устройство, освободив его от дополнительных приспособлений, так как теперь второй провод присоединялся к любой точке станка.

При простейшем способе реализации естественной термо-ЭДС режущий инструмент электрически изолируется от станка подкладыванием текстолитовых пластин (можно просто ватмана) снизу и сверху (от болтов резцедержателя при токарной обработке) и к нему присоединяется электрический провод, другой конец которого подключается к одному из входов микроамперметра. К другому входу микроамперметра подсоединяется провод, касающийся электрически изолированной от станка заготовки (лучше всего через токосъёмник).

При резании между стружкой и передней поверхностью резца образуется хороший контакт вследствие чистой от окислов прирезцовой части стружки. Т.к. материалы обрабатываемой заготовки и режущей части резца разные, то при повышении температуры контакта возникает разность потенциалов и в цепи начинает протекать слабый ток порядка нескольких микроампер. При увеличении скорости резания увеличивается и температура рабочих поверхностей инструмента, что приводит к увеличению тока. При скорости резания стали около 100 м/мин ток термо-ЭДС составляет 100...150 мкА.

Измерение силы тока термо-ЭДС показывает лишь качественную картину. Для получения температуры резания необходимо выполнить тарирование места контакта инструмент-заготовка. Для этого стержень или пластина из инструментального материала приваривается к стержню или пластине из обрабатываемого материала (обычно в среде инертного газа) таким образом, чтобы образцы сходились под острым углом. После этого место сварки образцов помещается в муфельную печь, а свободные концы

подключаются к тому же микроамперметру, что использовался при резании. Места подключения проводов к образцам должны находиться вне зоны нагрева.

При включении печи место сварки начнёт нагреваться. Максимально достижимая температура в печи, как правило, не более 1200 °С, но этого вполне достаточно. Температура в печи контролируется предварительно протарированной искусственной термопарой, шкала прибора которого проградуирована уже в градусах по Цельсию (°С). Наблюдение за рабочим микроамперметром покажет соответствие между температурой и силой тока термо-ЭДС. Например, при температуре $T = 880$ °С ток $I = 100$ мкА. Тогда тарировочный коэффициент по току термо-ЭДС I рассчитывается по формуле: $K_I = T/I = 880/100 = 8,8$ °С/мкА. Если во время эксперимента микроамперметр показывает 50 мкА, то можно вычислить среднюю температуру резания: $T = I \times K_I = 50 \times 8,8 = 440$ °С.

Существенным недостатком измерения температуры способом естественной термо-ЭДС является необходимость тарирования, что может внести существенную погрешность, т.к. сварка и контакт стружки с инструментом во время резания дают не одинаковые условия для возникновения термо-ЭДС. К тому же нагрев в печи происходит довольно медленно (несколько часов) и место сварки может окислиться, что существенно изменяет сопротивление и генерирование термо-ЭДС. Периодический ввод места сварки в печь нарушит его прогрев до контролируемой температуры печи. Вторым существенным недостатком является измерение лишь некоторой средней температуры, в то время как в области контакта стружки с передней поверхностью температура может изменяться в широких пределах: от тысячи до сотни градусов. Температура резания при обработке стали 45 со скоростью $V = 150$ м/мин с подачей $s = 0,3$ мм/об и глубиной резания $t = 3$ мм (условия при черновой обработке) составляет около 600 °С.

Вторым способом измерения температуры является измерение температуры на боковой поверхности резца с помощью **искусственной термопары**, при котором место спая термопары прикладывают к боковой поверхности резца при свободном резании. Такой способ возможен при точении диска резцом, ширина которого лишь на десятые доли миллиметра больше толщины обрабатываемого диска, причём толщина диска должна быть более 5 мм. Только в этом случае на боковой поверхности резца температура будет почти такая же, что и внутри режущего клина, и на поверхности его контакта со стружкой.

Третьим способом измерения температуры, свободным от вышеуказанного недостатка, является способ **закладных искусственных термопар**. В инструменте сверлятся или прожигаются глухие отверстия малого диаметра (0,2...0,4 мм), в которые вводят искусственные термопары с изоляционным покрытием на разную глубину. Наиболее ценная информация получается при подходе изнутри к рабочим поверхностям инструмента на 0,05...0,1 мм в зоне контакта инструмента со стружкой, т.е. измеряется температура практически на рабочей поверхности инструмента. Особая ценность этой информации заключается в том, что повышение температуры именно поверхностей контакта инструмента со стружкой и заготовкой

приводит к повышению интенсивности износа при резании.

Использованием закладных искусственных термопар можно исследовать распределение температуры как в режущем клине, так и на поверхности инструмента при несвободном косоугольном резании, наиболее часто применяющимся в производстве. Недостатком способа является высокая трудоёмкость подготовки инструмента к исследованиям.

Достоинством способа искусственной термопары является возможность исследования распределения температуры в режущем клине и на поверхности контакта со стружкой, не требуется дополнительное трудоёмкое тарирование термопары. К недостаткам способа относятся довольно большие размеры спаев термопары (0,3...0,5 мм), что сопоставимо с длиной контакта стружки с передней поверхностью (0,2...1 мм при чистовой обработке и 3...8 мм при черновой), где наиболее важно знать температуру, а также потери теплопередачи при контакте с загрязненной окислами боковой поверхностью режущего клина.

Использование закладной искусственной термопары для исследования распределения температуры поверхности резца было впервые применено русским учёным Я.Г. Усачевым в начале 19 в.

На рис. 3.3, а показана термопара Я. Г. Усачева. Здесь спай двух различных металлических проволок, изолированных слюдой или стеклянной трубкой, вставлен в канал, просверленный в резце снизу. Дно этого канала располагают возможно ближе к передней грани и режущей кромке резца, чтобы измерить температуру возможно ближе к источникам теплоты. Недостатки этого способа: удаленность спаев термопары от участка максимальной температуры и необходимость поддерживать постоянным давление между спаем и дном отверстия.

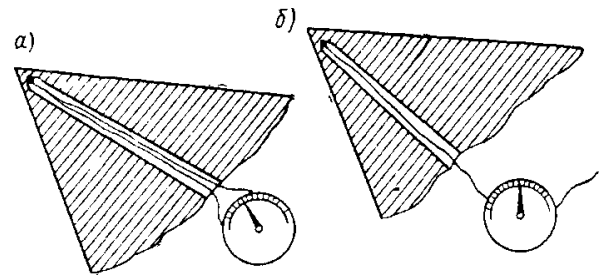


Рис. 3.3. Термопара Я.Г. Усачева

Более удачной оказалась другая термопара (рис. 3.3, б), в которой проволока, например константановая, также изолированная от стенок канала, расклепывается на задней грани резца возможно ближе к режущей кромке. Здесь термопарой являются проволока и материал самого резца.

При определении температурного поля на передней поверхности А.М. Даниелян в головке резца просверливал отверстия вдоль главной и вспомогательной режущих кромок. К головке резца сверху прикреплялась тонкая пластина (толщиной примерно 2 мм), служившая передней поверхностью резца. На рис. 3.4 показано температурное поле передней поверхности, полученное А.М. Даниеляном при обработке стали со скоростью $v = 38$ м/мин, $t = 2$ мм; $s = 0,54$ мм/об.

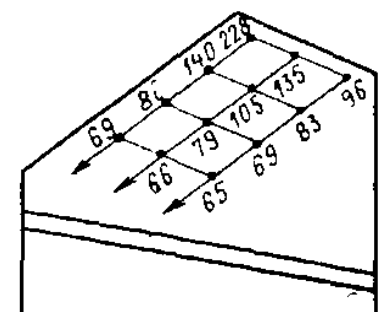


Рис. 3.4. Температурное поле на передней поверхности резца

Этот способ измерения имеет свои недостатки: измеряется температура на одном ограниченном участке и, к тому же, несколько удаленном от

основных источников теплообразования; необходимо иметь специальные резцы; невысокая долговечность резцов, так как после одной-двух переточек термопара разрушается.

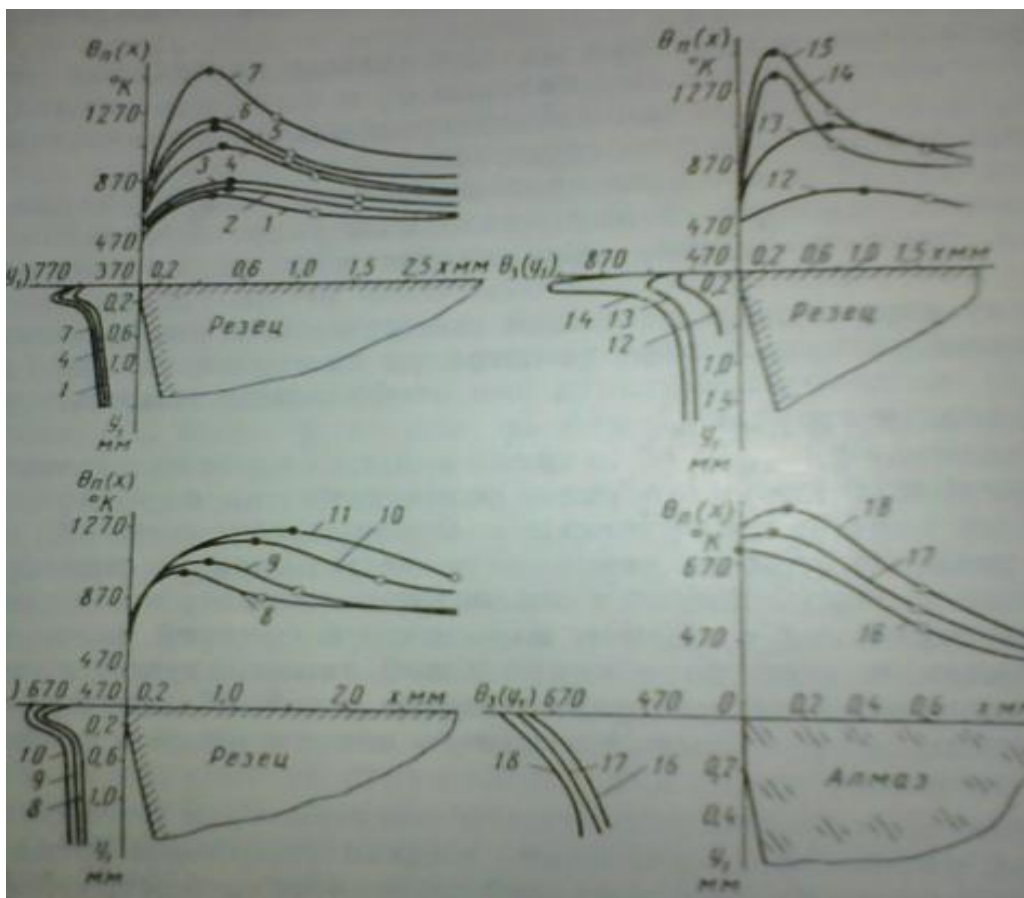


Рис. 3.5. Распределение температур на поверхности инструмента

Таблица 3.1. Условия резания для рис. 3.5 (распределение температуры на поверхностях инструмента)

№ графика	Материал детали	Материал инструмента	V, м/мин	t, мм	S, мм/об
1	ШХ 15	T14K8	10	4,1	0,5
2	ШХ 15	T14K8	30	4,1	0,5
3	ШХ 15	T14K8	30	4,1	0,5
4	ШХ 15	T14K8	60	4,1	0,5
5	ШХ 15	T14K8	100	4,1	0,5
6	ШХ 15	T14K8	100	4,1	0,5
7	ШХ 15	T14K8	200	4,1	0,5
8	ШХ 15	T14K8	60	4,1	0,23
9	ШХ 15	T14K8	60	4,1	0,44
10	ШХ 15	T14K8	60	4,1	0,85
11	ШХ 15	T14K8	60	4,1	1,41
12	ШХ 15	T14K8	30	2,6	0,2
13	BT2	BK8	30	2,6	0,2
14	BT2	T15K6	30	2,6	0,2
15	OT4-2	Алмаз	30	2,6	0,2
16	OT4-2	Алмаз	150	0,04	0,03
17	OT4-2	Алмаз	250	0,04	0,03

Четвёртым способом измерения температуры является измерение температуры на боковой поверхности резца *с помощью пирометра* (пирометрический способ) и *тепловизора* (температура определяется по инфракрасному излучению с нагретой поверхности). Последний способ более современный. Он более чувствительный и позволяет измерять температуру в любом диапазоне, в то время как пирометрический может быть использован только при температурах более 400 °С, т.к. основан на сопоставлении излучения видимого света от нагреваемой поверхности с излучением от спиральки. Силу тока, проходящего через спиральку, увеличивают до тех пор, пока спиралька она не нагреется до такой температуры, что станет невидимой на фоне нагреваемой поверхности, а шкала амперметра предварительно тарируется и на ней указывается не только сила тока, но и соответствующая при этом температура. К недостаткам указанных способов относится довольно большой диаметр чувствительной зоны, особенно у пирометрического способа. С помощью тепловизора можно измерять также температуру стружки и заготовки.

Оптические пирометры для измерения температуры резания применяются при скоростной обработке металла, когда стружка и резец нагревались весьма сильно вплоть до светлого каления.

Среднюю температуру стружки можно приблизительно определить и просто по её цвету в процессе резания. При сильном износе или завышенной скорости резания и нагреве металла (стружки) до 650 °С появляется тёмно-красный цвет, до 700 °С – вишнёво-красный, до 800 °С – светло-красный, до 900 °С – оранжевым, до 1000 °С – оранжево-жёлтым, до 1100 °С – светло-жёлтый, до 1150 °С – соломенно-жёлтый, до 1200 °С – белый. Необходимо помнить, что тепло не сразу доходит до наружной поверхности стружки после её выделения в зоне первичной пластической деформации, поэтому стружка приобретает соответствующий температуре цвет только спустя некоторое время, например, после отделения от передней поверхности резца.

Быстрорежущий инструмент способен работать только до температуры 550...600 °С, стружка при этом ещё не светится, но её цвет становится жёлтый, голубой или синий (цвета побежалости). При появлении даже желтоватого цвета резание быстрорежущим инструментом необходимо немедленно прекратить, в противном случае это вызовет его катастрофический износ по задней поверхности. Некоторые металлы имеют немного другие цвета, например, стружка нержавеющей стали даже при 650°С не синее, а приобретает лишь слегка жёлтоватый оттенок.

Твёрдосплавный инструмент способен работать при синем цвете стружки достаточно долго, это оптимальный режим обработки стали с точки зрения производительности и ещё достаточно высокой стойкости. При появлении же даже вишнёво-красного цвета стружки резание необходимо немедленно прекратить.

Радиационный метод измерения температуры, предложенный Ф. Швердом, основан на измерении теплоты лучеиспускания. Он дает возможность измерять температуру резания на любом участке стружки и резца. Необходимо лишь изолировать другие лучи, отражаемые не из фиксируемых точек. Схема устройства этого прибора проста. Тепловой луч, направленный от наблюдаемого участка, проходит через две линзы,

отверстие на экране и падает на фотоэлемент. Высокочувствительный гальванометр, соответственно проградуированный, показывает температуру наблюдаемого участка. Этот метод позволяет детальнее исследовать температуру стружки и инструмента, но он не получил широкого распространения из-за следующих недостатков.

1. Появление тонких окислов на поверхности стружки искажает правильность показаний прибора.

2. Значительные затруднения представляет собой тарирование прибора, поскольку теплота излучения зависит не только от температуры нагретого участка, но еще от цвета и состояния его поверхности; шероховатая поверхность стружки излучает больше теплоты, чем гладкая тарлируемая поверхность.

3. Крепление прибора на резце неудобно, а при установке его вне резца колебания последнего в процессе резания мешают измерению температуры определенной точки.

4. Прибор сравнительно сложен.

Пятым способом измерения температуры в процессе резания является **анализ микроструктуры** тончайшего слоя обработанной поверхности, претерпевающей заметные изменения предостаточно большом нагреве, применённый Б.И. Костецким. Но этот метод не получил распространения, так как его можно использовать только при высоких режимах резания или большом износе инструмента по задней поверхности, когда поверхность резания или обработанная поверхность нагревается выше критических точек.

Необходимо отметить, что степень изменения температуры резания в процессе работы является в известной мере критерием обрабатываемости металла и качества режущего инструмента. Однако не всегда имеется закономерная связь между температурой резания и интенсивностью износа режущего инструмента, так как износ в значительной степени зависит от микроструктуры обрабатываемого материала.

Шестым способом измерения температуры является нанесение **термочувствительного покрытия** на боковую поверхность резца. Это покрытие (термокраска, термоиндикаторная краска) необратимо изменяет свой цвет при нагреве, т.е. фиксируется максимальная температура боковой поверхности при резании. Обычно покрытие имеет четыре – шесть цветов, каждому из которых соответствует определённая температура (табл. 3.2).

Таблица 3.2. Температурные изменения цвета термокраски ТИК (Проскоков)

Температура	155°	190°	255°	305°	440°
Из цвета	Пурпурный	Белый	Зеленый	Желтый	Фиолетов.
В цвет	Голубой	Зел.-кор.	Темно-кор.	Красно-кор.	Белый

Термоиндикаторные краски оцениваются по нескольким показателям: верхнему и нижнему пределам индикации; количеству цветовых переходов в одной термокраске, что обеспечивает большую точность измерения температуры поверхности и более простому определению температурных полей при однократном эксперименте; адгезии и контрастности цветовых

переходов; точности и стабильности температуры цветового перехода, его зависимости от состояния поверхности; стоимости, способности храниться до их использования, сложности технологии приготовления, экологической безопасности, способа подготовки поверхности под покрытие и пр.

При использовании термоиндикаторов необходимо помнить, что линия цветового перехода (изотерма) определяет температуру с определённой точностью (часто $\pm 6^\circ\text{C}$), но внутри цветовой зоны можно говорить только об интервале температур. Например, переход от "жёлтой" зоны к "красно-коричневой" означает температуру $305 \pm 6^\circ\text{C}$, а все точки внутри "красно-коричневой" зоны до "фиолетовой" могут иметь температуру $305...440^\circ\text{C}$.

Подготовка к работе ведётся обычно следующим образом. Порошкообразную краску замешивают со спиртом и равномерно наносят на предварительно зачищенную и обезжиренную рабочую часть резца, в результате чего на резце остается слой краски толщиной от 0,03 до 0,07 мм. Так как в процессе резания краска истирается стружкой и обрабатываемой деталью, то при этом методе невозможно определить температуру самой режущей кромки инструмента и в местах контакта со стружкой и заготовкой. Исходя из этого, температура непосредственно режущей кромки определяется косвенным путем. Некоторая погрешность и вызывается и тем, что оттенок переходящих красок может меняться в зависимости от продолжительности действия тепла.

На рис. 3.6 представлены результаты исследования Проскокова по измерению температурных полей на поверхностях СМП с помощью четырех термоиндикаторных красок с различными температурными переходами (табл. 3.2). Как показали эти опыты, температура на задних поверхностях вдоль режущей кромки имеет переменный характер.

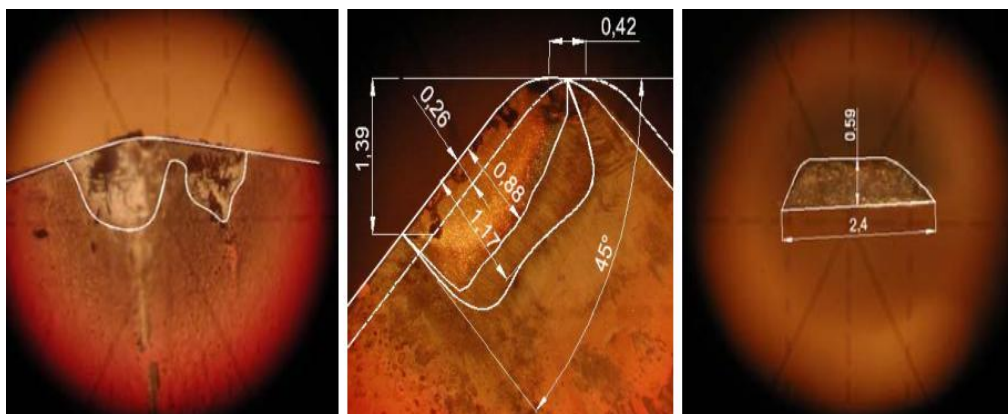


Рис. 3.6. Изотерма термоиндикаторной краски ТИК №14 ТУ 6-09-79-76 с температурой цветового перехода $T_{\text{пер}} = 570^\circ\text{C}$.
Сталь 45 - Т5К10, $\varphi=45^\circ$, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $r=0,8\text{мм}$; $V=160\text{ м/мин}$, $t=1,3\text{ мм}$, $S=0,39\text{ мм/об}$.

Для более полного сравнительного представления о температурных полях на поверхностях СМП были показаны изолинии температур 230° , 456° , 510° , 570° на одной модели (рис. 3.7). Из рисунка видно, что с уменьшением температуры перехода линия границ площадок становится более плавной.

Достоинством способа термочувствительных покрытий является непрерывность измерения по поверхности и малая длительность эксперимента. Достаточно нескольких секунд резания, чтобы установился температурный баланс, и резание можно прекращать. Измерения проводят визуальным осмотром через окуляр инструментального микроскопа и координаты линий цветовых переходов измеряют с помощью микрометрических винтов приборного столика. К недостаткам указанного способа относится осыпание покрытия непосредственно у передней и задней поверхностей из-за вибраций инструмента и нечёткость линий цветовых переходов.

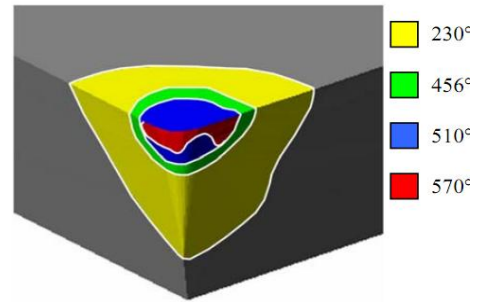


Рис. 3.7. Экспериментальное распределение температуры на поверхностях СМП для условий рис. 3.6.

Все вышеуказанные способы, кроме закладной искусственной термопары, имеют существенный недостаток – они могут быть применены только на боковой поверхности резца, т.е. температура достаточно точно может быть определена только при свободном резании.

Седьмым способом определения температуры является наблюдение за появлением цветов побежалости. Цвета побежалости – радужные цвета, образующиеся на гладкой поверхности металла в результате формирования тонкой прозрачной поверхностной оксидной плёнки и интерференции света в ней.

Цвета побежалости возникают из-за интерференции белого света в тонких плёнках на отражающей поверхности, при этом по мере роста толщины плёнки последовательно возникают условия гашения лучей с той или иной длиной волны. Сначала из белого света вычитается фиолетово-синий цвет ($\lambda \sim 400$ нм), и мы наблюдаем дополнительный цвет – жёлтый. Далее, по мере роста толщины плёнки, и, соответственно, увеличения длины волны «погасившихся» лучей, из непрерывного солнечного спектра вычитается зелёный и мы наблюдаем красный цвет, и т.д.

В процессе резания металлов обрабатываемая деталь, режущий инструмент и стружка нагреваются. На обработанной поверхности стальной детали при этом могут быть заметны оттенки всех цветов побежалости, свидетельствующие о высокой температуре тончайшего поверхностного слоя детали в момент соприкосновения ее с задней поверхностью инструмента.

Таблица 3.3. Цвета побежалости и соответствующие им температуры (в °С)

№ п.п.	Цвет побежалости	Температура, °С
1	Чуть желтый	200
2	Светло-желтый	220
3	Темно-желтый	240
4	Пурпуровый	270
5	Темно-синий	290
6	Светло-синий	320
7	Синевато-серый	350
8	Светло-серый, переходящий в белый	400

Достоинством данного метода является то, что он не требует каких-либо приспособлений.

Считается, что при наличии некоторого опыта по цветам побежалости стружки нелегированной стали можно определить температуру с точностью $\pm 5^\circ$, т. е. около 2%. Однако в действительности этот метод дает значительно большую погрешность, достигающую иногда, как показали опыты Б.Т. Прушкова, даже до 20—30% в зависимости от толщины среза, времени работы и др. Столь большие отклонения вызваны тем, что цвета побежалости выражают лишь температуру поверхности стружки, определяющую толщину пленки окисла, а тем самым и ее цвет. Цвет побежалости меняется в зависимости не только от температуры, но и от продолжительности действия тепла. При охлаждении стружки смазочно-охлаждающими жидкостями цвета побежалости могут совсем исчезнуть, между тем как стружка сохраняет на поверхности контакта с резцом высокую температуру.

Восьмой способ используется для измерения средней температуры, а также для определения теплового баланса (определения количества теплоты, выделяющейся в зоне стружкообразования и переходящей в инструмент, стружку, заготовку и окружающую среду). Этот **калориметрический** способ, впервые примененный Можаяевым, заключается в том, что резание производится в теплоизолированной среде и вся образующаяся стружка падает в калориметр с водой. После непродолжительного резания (5...10 секунд пока не установится температурный баланс) измеряется температура воды, детали и инструмента. Зная их вес и теплоёмкость, по разности температуры воды в калориметре до, и после резания рассчитывается количество теплоты, перешедшей в них во время резания.

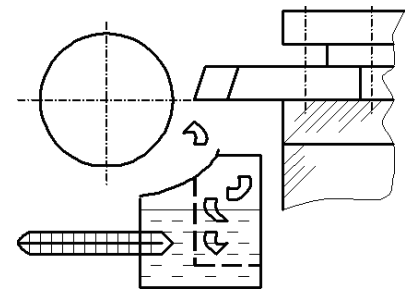


Рис. 3.8. Схема проведения исследования калориметрическим методом

$$\theta_{стр.} = \theta_{см.} + \frac{G_{воды} \cdot (\theta_{смес} - \theta_{воды})}{G_{стр.} \cdot C_{стр.}}, \quad (3.1)$$

где: $\theta_{стр.}$ – средняя температура стружки,
 $\theta_{см.}$ – температура смеси воды и стружки в калориметре,
 $G_{воды}$ – вес воды в калориметре,
 $G_{стр.}$ – вес стружки в калориметре;
 $\theta_{воды}$ – начальная температура воды; $C_{стр.}$ – теплоемкость стружки.

Экспериментально было установлено, что при резании практически вся механическая работа, затраченная на процесс снятия стружки, переходит в тепловую энергию.

В зоне резания различают три источника (очага) образования теплоты (рис. 3.9): 1 - зона основной пластической деформации (находится около

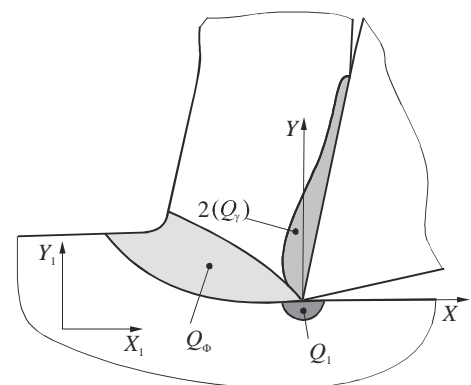


Рис. 3.9. Источники образования теплоты при резании

условной плоскости сдвига) с тепловой мощностью Q_{Φ} ; 2 - зона трения стружки о переднюю поверхность инструмента с тепловой мощностью Q_{γ} ; 3 - зона трения задней поверхности инструмента о заготовку с тепловой мощностью Q_1 .

Таким образом, общее количество теплоты, выделяющейся при резании

$$Q = Q_{\Phi} + Q_{\gamma} + Q_1. \quad (3.2)$$

В соответствии с законом теплообмена теплота от источников теплообразования отводится в направлении менее нагретых частей, находящихся с ними в контакте, а именно: в заготовку $Q_3 = Q_{\Phi_3} + Q_{1_3}$, стружку $Q_c = Q_{\Phi_c} + Q_{\gamma_c}$ и режущий инструмент $Q_{и} = Q_{\gamma_{и}} + Q_{1_{и}}$ (рис. 3.10). При этом часть теплоты $Q_{ос}$ отводится в окружающую среду, например, с помощью подводимой в зону резания смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Однако если резание осуществляется на воздухе, то эту теплоту из-за ее малой величины обычно не учитывают.

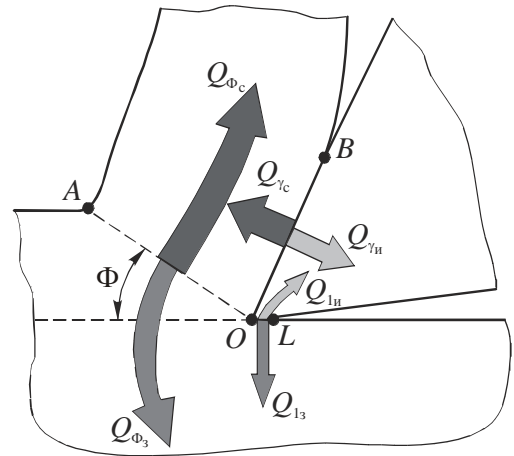


Рис. 3.10. Поток теплоты, отводимой в стружку, заготовку и инструмент

На основании изложенного **уравнение теплового баланса** имеет вид:

$$Q_{\Phi} + Q_{\gamma} + Q_1 = Q_3 + Q_c + Q_{и} + Q_{ос}. \quad (3.3)$$

Если рассматривать тепловой баланс в единицу времени, то левая часть уравнения (3.3) представляет собой сумму тепловых мощностей трех источников образования теплоты, которые можно найти по уравнениям удельных работ резания и трения, используя тепловой эквивалент механической работы $A_{тэ}$. При этом тепловые мощности указанных трех источников можно определить по следующим формулам:

$$\begin{aligned} Q_{\Phi} &= \frac{\tau \varepsilon a b v}{A_{тэ}}; \\ Q_{\gamma} &= \frac{F v_c}{A_{тэ}} = \frac{F v}{A_{тэ} K}; \\ Q_1 &= \frac{F_1 v}{A_{тэ}}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

где τ - касательное напряжение в условной плоскости сдвига; ε - относительный сдвиг в зоне деформации; a, b - соответственно толщина и ширина срезаемого слоя; v - скорость резания; v_c - скорость схода стружки по передней поверхности, $v_c = v / K$, K - коэффициент усадки стружки.

Предположив, что интенсивности тепловыделений внутри каждого из указанных источников образования теплоты распределены равномерно, можно определить их средние интенсивности (плотности), разделив

тепловые мощности на площади источников:

$$q_{\Phi} = \frac{Q_{\Phi}}{\text{пл.}OA} = \tau \varepsilon \nu \sin \Phi / A_{\text{ТЭ}};$$

$$q_{\gamma} = \frac{Q_{\gamma}}{\text{пл.}OB} = \frac{F \sin \Phi}{bC \cos(\Phi - \gamma)} = q_F \nu \frac{\sin \Phi}{\cos(\Phi - \gamma) A_{\text{ТЭ}}}; \quad (3.5)$$

$$q_1 = \frac{Q_1}{\text{пл.}OL} = \frac{F_1 \nu}{bh_{\text{зп}} A_{\text{ТЭ}}}.$$

В этих формулах площади OA , OB и OL - это соответственно площадь условной плоскости сдвига и площади контакта стружки с передней и задней поверхностями инструмента.

Если приходные статьи теплового баланса определяются относительно просто и с достаточно высокой точностью, то составляющие расходной (правой) части уравнения (3.3) определяют либо экспериментально, либо путем сложных теплофизических расчетов.

Обычно количество теплоты, отводимой в стружку, заготовку и инструмент, определяют экспериментально с помощью калориметров. По данным отечественных и зарубежных исследователей установлена следующая картина распределения теплоты по указанным направлениям (рис. 3.11) [3, Бобров]. Здесь с ростом скорости резания ν количество теплоты, уходящей в стружку Q_c , монотонно возрастает, причем наиболее интенсивно это происходит при резании на низких скоростях. Доля теплоты, поступающей в заготовку Q_3 и инструмент $Q_{\text{и}}$, при увеличении скорости резания наоборот сокращается. Например, при точении стали 40X со скоростью резания $\nu = 20 \dots 50$ м/мин в стружку уходит 30...50% теплоты, в заготовку – 45...65%; при скорости резания $\nu = 150$ м/мин в стружку уходит 75% теплоты, а в заготовку – около 20%. В инструмент обычно переходит небольшая доля теплоты - около 10...15%.

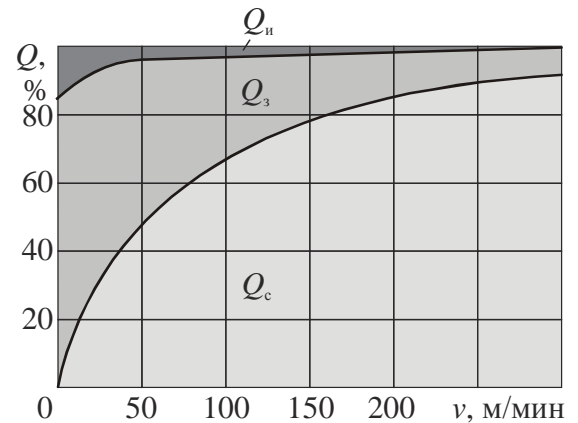


Рис. 3.11. Распределение теплоты между стружкой Q_c , заготовкой Q_3 и инструментом $Q_{\text{и}}$ при точении стали 40X ($T15K6$, $t=1,5$ мм, $s=0,12$ мм/об)

Такое влияние скорости резания на распределение теплоты объясняется тем, что с увеличением скорости резания все большее количество теплоты остается в стружке и все меньшее ее количество успевает перейти в заготовку и инструмент. К тому же с ростом скорости резания снижаются степень деформации обрабатываемого материала, а следовательно, силы резания и площадь контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Все это приводит к сокращению доли теплоты, переходящей в инструмент. Однако это не означает, что температура на контактных площадках инструмента и в самом режущем клине снижается. Напротив, с ростом скорости резания температура значительно увеличивается. Это объясняется тем, что теплота на контактных площадках инструмента концентрируется в

очень узком по толщине слое, составляющем десятые доли микрометра, а также тем, что с ростом скорости схода стружки v_c пропорционально увеличивается работа трения на передней поверхности инструмента.

Из рис. 3.12 следует, что средняя температура на передней поверхности инструмента θ_{cp} намного выше, чем температура в стружке θ_c [3]. В связи с тем, что на площадке контакта стружки с инструментом эти температуры примерно равны, то это свидетельствует о неравномерности распределения температуры по толщине стружки, которая постепенно снижается по мере приближения к ее свободной стороне.

Наряду со скоростью резания на распределение отводимой теплоты большое влияние оказывают механические и теплофизические свойства обрабатываемых материалов. При этом чем выше теплопроводность обрабатываемого материала, тем больше теплоты переходит в заготовку, а чем выше скорость резания, тем меньше теплоты переходит в инструмент (табл. 3.4).

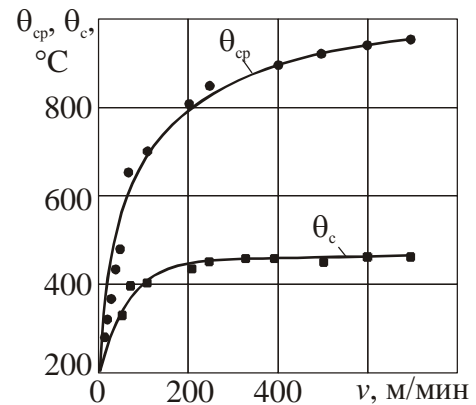


Рис. 3.12. Влияние скорости резания v на среднюю температуру резания θ_{cp} и температуру стружки θ_c при точении стали 40X (T15K6, $t=1,5$ мм, $s=0,12$ мм/об)

Таблица 3.4. Распределение тепловых потоков при резании некоторых металлов [3, 34]

Обрабатываемый материал	Скорость резания, м/мин	Количество теплоты, %		
		в стружке	в инструменте	в заготовке
Сталь 40X	21...51	45	4,5	47
	102...312	75	1,5	22
Жаропрочная сталь ЭИ 867	3...15	25	30	45
Алюминий	100	21	2,2	73

При обработке жаропрочных сталей, обладающих по сравнению с конструкционными сталями повышенными прочностью и пластичностью, температура при одинаковых режимах резания будет выше из-за высокой доли теплоты, переходящей в инструмент, что не позволяет осуществлять резание жаропрочных сталей на больших скоростях.

При сверхскоростном резании (более 1000 м/мин) интенсивность износа увеличивается не так быстро, как производительность, поэтому удельный износ (износ на единицу объема удаляемой стружки) уменьшается. В настоящее время этот эффект используется в станкостроении, когда частоты вращения шпинделя достигают 5000...10000 об/мин. При таких частотах вращения применяются специальные патроны, автоматическая динамическая балансировка шпинделя, в противном случае будет немедленное разрушение станка.

Девятый способ – расчётный, метод **конечных элементов**, заключается в том, что инструмент, стружка и заготовка разбиваются на квадратные, прямоугольные и треугольные элементы (конечные элементы), задаются режимы резания, теплопроводность и теплоёмкость инструментального и обрабатываемого материала и другие механические и теплофизические характеристики.

По специальной программе на компьютере рассчитывается температура и напряжения в центре каждого элемента. Расчёт производится многократно, в каждой следующей серии расчётов используются данные от предыдущего расчёта, в результате чего точность увеличивается. По окончании расчёта точки с одинаковыми величинами температур соединяются линией и получают изотермы, которые представлены на рис. 3.13. Чем меньше размер элементов и большее количество серий вычислений, тем выше точность расчёта, но больше времени требуется на расчёт. При наличии достоверных экспериментальных данных в некоторых точках инструмента или заготовки точность расчёта также увеличивается.

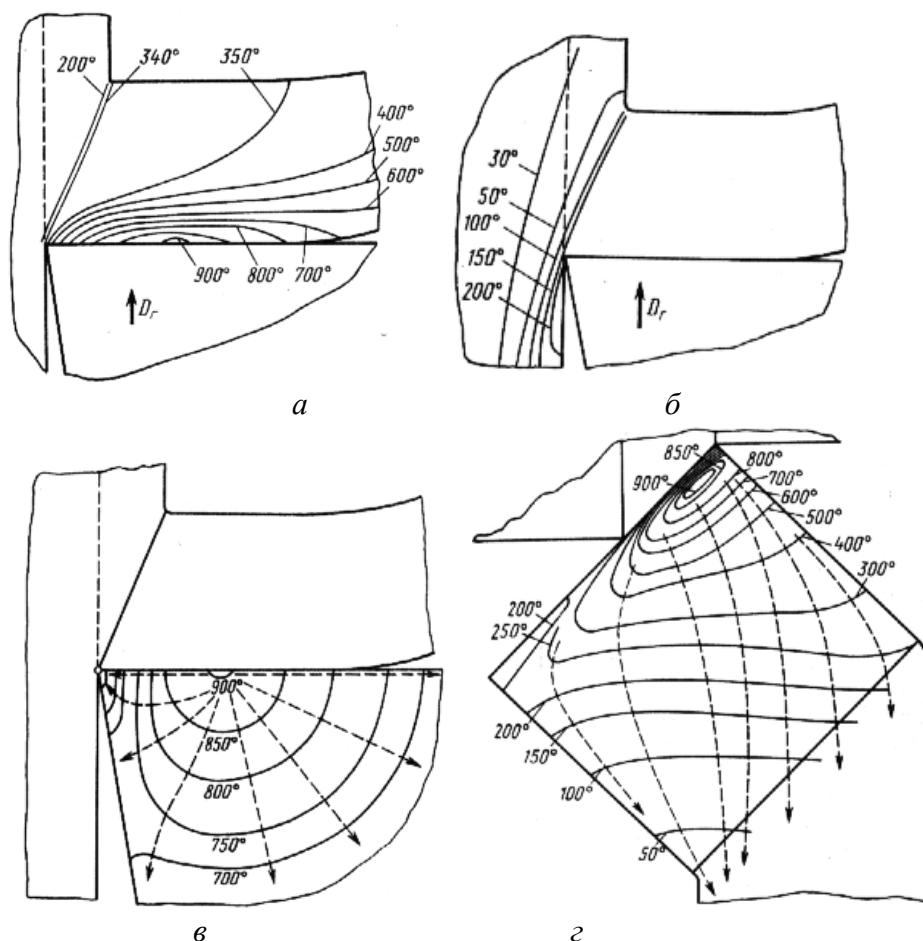


Рис. 3.13. Распределение температуры в стружке (а), заготовке (б), режущем клине (в) и на передней поверхности резца (z) при резании стали 45 резцом из Т15К6. $V=150$ м/мин, $S=0,3$ мм/об, $\gamma=0^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\varphi=45^\circ$.

На рис. 3.13 представлено распределение температуры в стружке, заготовке и токарном резце, полученные расчётом методом конечных элементов по данным тепловизора и искусственных термомпар. Наибольшая температура на поверхности резца наблюдается не у режущей кромки, а на небольшом удалении от неё (рис. 3.13, *a*, *b*, *c*). Это подтверждает версию о том, что тепло не сразу доходит до прирезцовой части стружки и передней поверхности инструмента из средней части зоны стружкообразования.

Десятый способ – это чисто *аналитические способы расчёта* на основе теории теплотехники, однако точность расчётов не велика, они громоздки (вводится ряд коэффициентов, рассчитываемых по сложным формулам, в которые входят другие коэффициенты, зависящие в свою очередь от других и т.п.), а для ускорения расчётов всё равно приходится применять компьютер. Практика расчётов аналитическим способом показывает, что даже незначительные изменения в начальных условиях (например, по длине контакта стружки с передней поверхностью инструмента) приводят к существенным изменениям результатов расчётов. После появления быстродействующих компьютеров с большой памятью аналитические способы утратили свою актуальность, хотя их основы заложены в расчёты методом конечных элементов.

Одиннадцатый способ – это аналоговый, когда выполняется моделирование процесса распространения тепла с помощью сопротивлений, конденсаторов и прочих элементов радиотехники. Этот способ был достаточно распространён в 60-е годы 20 в., однако он неточен, требует экспериментальных данных, полученных непосредственно при резании, громоздок, и поэтому с появлением компьютеров практически не используется.

Нарост и его влияние на шероховатость и точность обработки

Наростом называется клинообразное тело из обрабатываемого материала, налипшего на переднюю поверхность у режущей кромки режущего инструмента (рис. 3.14).

Нарост образуется из-за адгезии обрабатываемого материала с передней поверхностью инструмента, чему способствуют чистая (ювенильная) прирезцовая поверхность стружки, достаточно высокая температура в зоне контакта (200...500 °С), большая величина нормальной контактной нагрузки у режущей кромки. Контактный слой стружки затормаживается, на него налипает следующий слой и т.д., поэтому нарост имеет слоистую структуру. В результате большой пластической деформации (наклёпа) материал нароста имеет твёрдость немного большую, чем исходный материал, поэтому может выполнять роль инструмента. Нарост не имеет постоянной формы, его поверхность неровная, которая в зоне вершины инструмента копируется на обработанной поверхности заготовки, оставляя на ней бороздки. Чем пластичнее обрабатываемый металл и больше толщина срезаемого слоя a , тем больше величина образующегося нароста.

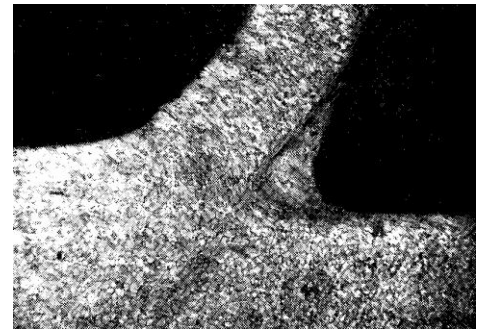


Рис. 3.14. Нарост на реце при строгании незакалённой стали (Я.Г. Усачёв) [Клушин, с. 129]

При увеличении нароста больше критического значения он время от времени начинает разрушаться, его фрагменты внедряются не только в прирезцовую поверхность стружки, но и в поверхность среза, приводя к ухудшению качества обработанной поверхности.

Размеры нароста зависят от обрабатываемого материала, переднего угла режущего инструмента и режимов резания. Чем больше величина нароста, тем больше его влияние на стойкость инструмента и качество обработанной поверхности.

Появление нароста при скорости резания 3...10 м/мин при обработке достаточно пластичного материала Б (рис. 3.15, точка 1) приводит к увеличению фактического (действительного) переднего угла γ_d (см. рис. 3.16, Б, зона II), что облегчает образование стружки, поэтому уменьшается усадка стружки K_a (см. рис. 3.16, В, зона II), уменьшается сила резания P_z (см. рис. 3.16, Г, зона II).

Увеличение действительного переднего угла γ_d при появлении нароста приводит к уменьшению интенсивности роста температуры резания Θ с увеличением скорости резания V (см. рис. 3.16, А, зона II).

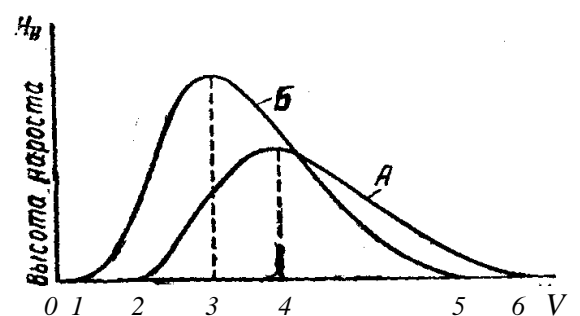


Рис. 3.15. Влияние скорости резания V и пластичности обрабатываемого материала на высоту нароста: А – материал менее пластичный, чем Б. Зоны для материала Б: 0-1 – нарост отсутствует; 1-2 – нарост появился и увеличивается с ростом V ; 2-3 – нарост уменьшается с ростом V ; 3 и правее – нарост отсутствует.

Нарост защищает переднюю и заднюю поверхности инструмента от износа, но из-за своей нестабильности ухудшает качество обработанной поверхности, увеличивает шероховатость обработанной поверхности R_a (см. рис. 3.16, Д, зона II), снижает точность обработки.

При дальнейшем увеличении скорости резания V температура резания θ увеличивается (рис. 3.16, А, зона III) и когда она достигнет $580...620^\circ\text{C}$ (при обработке стали 45 это соответствует скорости резания приблизительно $30...40$ м/мин) происходит отпуск наклёпанного материала нароста, он постепенно теряет свою твёрдость и прочность и не может удерживаться на передней поверхности инструмента, поэтому начинает уменьшаться (см. рис. 3.15, зона правее 3). Это приводит к уменьшению действительного переднего угла γ_d (рис. 3.16, Б, зона III), что затрудняет образование стружки, поэтому усадка стружки K_a увеличивается (см. рис. 3.16, В, зона III), сила резания P_z тоже увеличивается (см. рис. 3.16, Г, зона III).

Уменьшение действительного переднего угла γ_d при уменьшении нароста приводит к увеличению интенсивности роста температуры резания θ с увеличением скорости резания V (рис. 3.16, А, зона III). Рост температуры на этом участке происходит интенсивнее, чем до появления нароста (рис. 3.16, А, зона I), т.к. совместно с увеличением скорости резания происходит и уменьшение действительного переднего угла. Поэтому диапазон скорости резания на участке III существенно меньше (более узкий), чем на участке II.

Дальнейшее увеличение скорости резания приводит к увеличению температуры резания, полному отпуску материала нароста и его исчезновению (см. рис. 3.15, зона правее 5) и (рис. 3.16, А, зона IV). Действительный передний угол γ_d становится равным начальному заточенному γ_3 (рис. 3.16, Б, зона IV). При дальнейшем увеличении скорости резания усадка стружки немного уменьшается (рис. 3.16, В, зона IV). Уменьшение усадки стружки связано с увеличением скорости деформации в зоне первичной пластической деформации, что вызывает её уменьшение

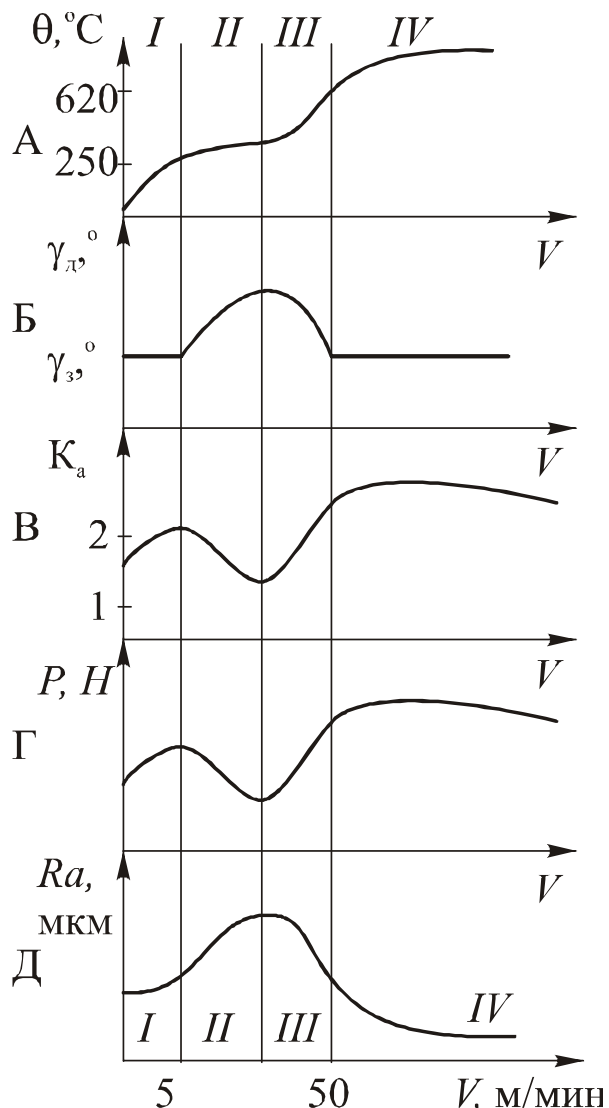


Рис. 3.16. Влияние нароста на действительный передний угол γ_d , усадку стружки K_a , силу резания P_z и шероховатость обработанной поверхности R_a

(сужение) (см. рис. 2.1), что приводит к незначительному уменьшению силы резания (рис. 3.16, Б, зона IV). Уменьшение шероховатости обработанной поверхности Ra (рис. 3.16, Д, зона IV) связано с оплавлением и уменьшением высоты гребешков, остающихся на обработанной поверхности из-за подачи s и наличия положительного вспомогательного угла в плане φ_1 (см. рис. 1.7).

С уменьшением пластичности металла зона наростообразования смещается в область более высоких скоростей резания (см. рис. 3.15, график А), а величина нароста существенно уменьшается по сравнению с пластичным материалом. Появление нароста у материалов с невысокой пластичностью при увеличении скорости резания связано с увеличением температуры в зоне стружкообразования и, соответственно, с увеличением их пластичности, схватыванием с передней поверхностью инструмента у режущей кромки и т.д.

У очень хрупких материалов нарост отсутствует, что связано с практически полным отсутствием зоны первичных пластических деформаций на малых и средних скоростях резания (происходит хрупкое разрушение по плоскости сдвига). При высоких скоростях резания даже небольшая зона первичных пластических деформаций сужается ещё больше (до плоскости сдвига) из-за увеличения скорости деформаций, что компенсирует некоторое увеличение пластичности хрупких материалов под действием повышения температуры резания.

Применение СОЖ и уменьшение подачи уменьшают температуру резания, и зона наростообразования смещается вправо, аналогично малопластичному материалу А на рис. 3.15. При использовании СОЖ на получистовой обработке (обычно подача менее 0,15 мм/об) нарост может присутствовать даже при высоких скоростях резания (до 230 м/мин). Поэтому на получистовой и чистовой обработке скорость резания должна быть не менее 350 м/мин.

Нарост защищает переднюю и заднюю поверхности инструмента от износа, поэтому нарост полезен при черновой обработке (при точности грубее 12 квалитета и шероховатости Ra более 10 мкм), но недопустим при получистовой (точность по 10...8 квалитету и Ra = 6,3...2,5 мкм) и чистовой (точность по 7 или 6 квалитету и Ra = 2,5...0,5 мкм) обработке.

Некоторые виды обработки могут производиться только при наличии нароста, например, шабрение, при котором нарост позволяет снимать стружку при очень малых толщинах срезаемого слоя. Нарост облегчает врезание при существенном износе инструмента по задней поверхности и наличии округления режущей кромки.

Увеличение переднего угла инструмента γ приводит к уменьшению величины нароста, а при $\gamma \geq 40^\circ$ нарост не может удерживаться на передней поверхности. Увеличение γ , однако, приводит к уменьшению прочности режущего клина, поэтому даже при получистовой обработке незакалённой конструкционной стали твёрдосплавным инструментом обычно $\gamma < 12^\circ$, а при использовании быстрорежущей стали $\gamma < 17^\circ$.

При обработке алюминиевых сплавов и, в особенности, чистого алюминия, после выхода из зоны стружкообразования прирезцовая поверхность стружки свободна от окислов. Отсутствие защитной плёнки из окисла Al_2O_3 приводит к высокой химической активности алюминия и появлению *налипа* у режущей кромки. Налип, в отличие от нароста, не имеет повышенной твёрдости и поэтому приводит к уменьшению действительного переднего угла γ_d до $-30^\circ \dots -60^\circ$ (рис. 3.17), существенно увеличивает трение по передней поверхности инструмента, что вызывает нарастание комка из обрабатываемого материала на передней поверхности инструмента и ведёт к поломке инструмента. Поэтому при обработке алюминиевых сплавов стараются использовать инструменты с $\gamma \geq 30^\circ$ (это возможно из-за малой твёрдости и прочности алюминиевых сплавов) и специальные СОЖ, например, керосин.

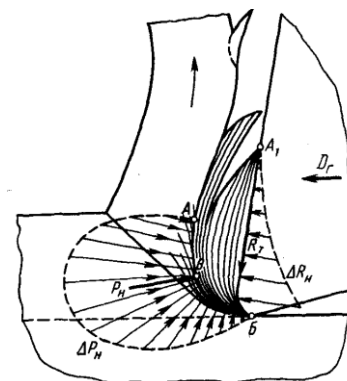


Рис. 3.17. Схема распределения нормальных контактных нагрузок при появлении налива на передней поверхности инструмента

Раздел 4. Прочность и износ режущих инструментов

4.1. Распределение контактных нагрузок на рабочих поверхностях инструмента

Надёжность, стойкость и долговечность работы инструмента зависит не только от его прочности, но и от действующих на него нагрузок и температуры его поверхностей. При измерении составляющих силы резания оперируют сосредоточенной нагрузкой, которая может быть учтена при расчёте державки токарного резца. Однако для оценки работоспособности режущей пластины резца гораздо большее значение имеет распределение контактных нагрузок на рабочих поверхностях инструмента.

Для исследования распределения контактных нагрузок на передней поверхности инструмента может быть использован **поляризационно-оптический** метод. Резец изготавливается из оптически активного материала, например, оргстекла, материал которого изменяет свои оптические свойства при изменении внутреннего напряжения. При прохождении через прозрачный плоский резец поляризованный монохроматический свет образует на экране чередующиеся полосы вследствие интерференции света. Чем ближе полосы друг к другу, тем больше главные напряжения в просвечиваемой области.

Чтобы определить напряжения количественно, пластину из используемого оптически активного материала предварительно тарируют – сжимают постепенно увеличивающейся нагрузкой P до тех пор, пока не появится тёмная полоса. Рассчитывают напряжение при этой нагрузке $\sigma = P/(b \times a)$, МПа, где P – сила сжатия, Н; b – ширина пластины, м; a – толщина пластины, м. Это напряжение будет в рассматриваемой области, если появится только одна тёмная полоса. После этого нагрузку опять постепенно увеличивают до появления очередной полосы, после чего производится расчёт напряжения для второй полосы и т.д.

В процессе резания диска из обрабатываемого материала плоским резцом, ширина которого немного больше толщины диска, резец просвечивается поляризованным монохроматическим светом. При этом считается количество полос и определяется напряжение на линии одинаковых главных напряжений.

Таким образом определяются внутренние напряжения в режущем клине. Считается, что выходящая на переднюю поверхность полоса свидетельствует о соответствующем напряжении и на передней поверхности. На основании этого строится кривая распределения нормальной контактной нагрузки на

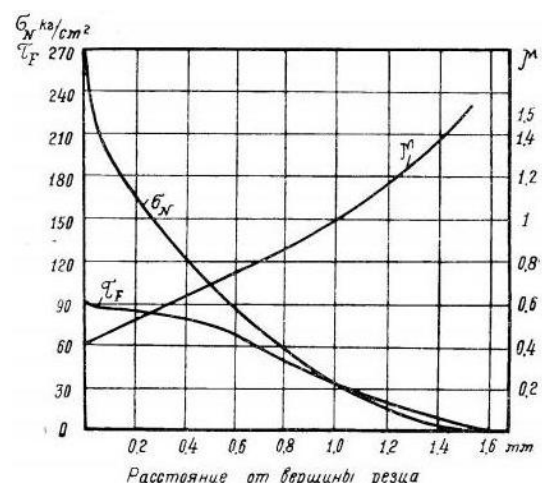


Рис. 4.1. Распределение нормальных и касательных контактных нагрузок, коэффициента трения на передней поверхности, полученных поляризационно-оптическим методом при обработке свинца (Полетика М.Ф.)

передней поверхности (рис. 4.1). Нормальная контактная нагрузка – это нагрузка, перпендикулярная к исследуемой поверхности.

Существенным недостатком поляризационно-оптического метода является возможность обработки только мягких материалов (свинец, кадмий и т.п.). Скорости резания тоже ограничены размягчением материала резца при повышенной температуре.

Для исследования распределения (*эпюр*) контактных нагрузок на передней поверхности инструмента при резании стали и других твёрдых материалов при высоких скоростях резания может быть использован метод *разрезного резца*. Для этого очень широкий резец (шириной 50...100 мм) разрезается таким образом, чтобы размер η (рис. 4.2) дискретно изменялся от 0 до величины, немного большей, чем длина контакта с стружкой с передней поверхностью инструмента. Для увеличения прочности и жёсткости рабочей пластины А на её задней поверхности располагаются рёбра жёсткости (2).

Ширина диска должна быть меньше на 2...3 мм, чем расстояния l между рёбрами жёсткости пластины А. При обработке стружка будет иметь одинаковую длину контакта с передней поверхностью резца, на какой бы секции ни проводилась обработка. Но на разных секциях длина контакта стружки с поверхностью пластины В будет разная (рис. 4.3).

Пластина В закрепляется на верхнем поясе динамометра, который будет воспринимать нагрузку, действующую только на пластину В. По результатам измерения нормальной N_B и касательной F_B сил резания в каждой из секций разрезного резца можно рассчитать нормальную σ_N и касательную τ_F контактные нагрузки по формулам:

$$\sigma_N(x) = \frac{1}{b_1} \frac{dN_B}{dx}; \quad (4.1)$$

$$\tau_F(x) = \frac{1}{b_1} \frac{dF_B}{dx}, \quad (4.2)$$

где b_1 – ширина стружки.

Чем меньше разница $x_i = \eta$ (рис. 4.1 и 4.2) у соседних секций, тем выше точность исследований, но больше их трудоёмкость.

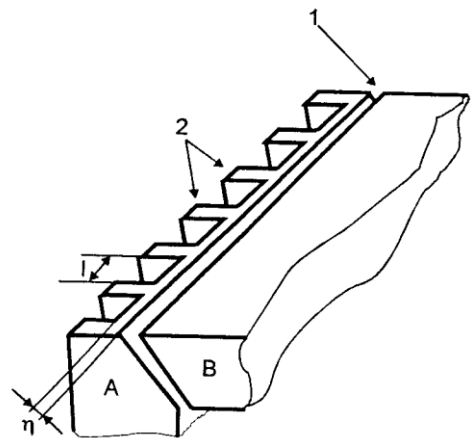


Рис. 4.2. Схема расположения рабочих пластин повышенной жёсткости при исследовании методом разрезного резца. 1 – щель между рабочими пластинами А и В; 2 – рёбра

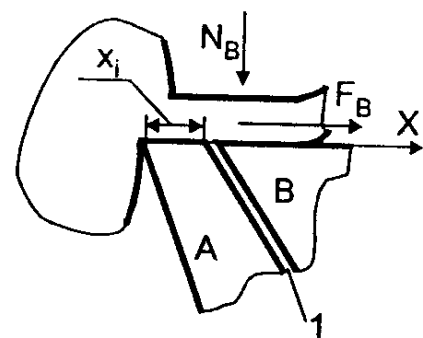


Рис. 4.3. Схема, поясняющая принцип измерения разрезным резцом

Наибольшая величина нормальной контактной нагрузки σ_N наблюдается у режущей кромки, при удалении от которой величина нагрузки уменьшается, но в средней части имеется горизонтальный участок (рис. 4.4).

Касательная контактная нагрузка τ_F имеет горизонтальный участок у режущей кромки и в средней части графика, свидетельствующий о пластическом характере контакта стружки на этом участке.

Горизонтальная ось имеет безразмерную шкалу (x/c) чтобы на одном графике показать результаты экспериментов, проведённые с различными толщинами среза a , и, следовательно, имеющие разные длины контакта с стружкой с передней поверхностью инструмента.

С помощью метода разрезного резца можно исследовать и распределение температуры Θ на передней поверхности инструмента, если электрически изолировать пластины от динамометра.

Результаты этого исследования представлены на рис. 4.4 вверху, а температурная шкала для этого графика указана справа.

Аналогично проводится исследования распределения контактных нагрузок на задней поверхности резца. Для острозаточенного неизношенного резца контакт задней поверхности инструмента с поверхностью заготовки слишком мал, чтобы зафиксировать изменения нагрузки. В связи с этим нагрузки на задней поверхности острого инструмента считают пренебрежимо малыми по сравнению с силами на передней поверхности. Однако при износе инструмента фаска износа по задней поверхности увеличивается настолько, что нагрузки на ней становятся сопоставимыми с нагрузками на передней поверхности, а порой и превышать их. Исследования показали, что характер распределения и величина контактных нагрузок на фаске износа по задней поверхности аналогичен нагрузкам на передней поверхности.

Большая величина нормальных контактных нагрузок приводит к интенсивному износу по передней и задней поверхностям, однако высокая температура, как показывают исследования, гораздо больше увеличивает скорость изнашивания.

Контактные нагрузки влияют на внутренние напряжения в режущем клине и, следовательно, на запас прочности инструмента. Запас прочности инструмента $K_{пр}$ – это соотношение максимально допустимых напряжений σ_e или σ_{-e} с точки зрения разрушения инструментального материала к действительным напряжениям σ_d во время обработки: $K_{пр} = \sigma_e / \sigma_d$. Чем ниже

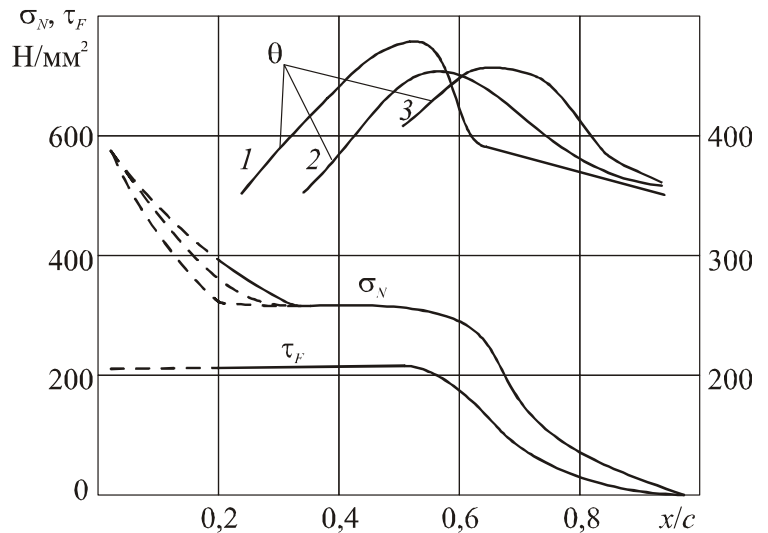


Рис. 4.4. Распределение контактных нагрузок и температуры на передней поверхности инструмента, полученные методом разрезного резца. Сталь 45 – ВК8, передний угол $\gamma=0^\circ$, скорость резания $V=200$ м/мин; толщина срезаемого слоя: 1 – $a=0,39$ мм; 2 – $a=0,2$ мм; 3 – $a=0,1$ мм (Полетика М.Ф., Бутенко В.А.)

запас прочности, тем более вероятно локальное или общее разрушение инструмента.

Считается, что для надёжной работы инструмента $K_{пр} \geq 1,5 \dots 1,8$. Чем больше нестабильность сил резания или, тем более, наличие вибрации, тем больше должен быть $K_{пр}$. При пульсирующей нагрузке оценку запаса прочности ведут не по статически определённым предельно допустимым напряжениям, а по усталостным, которые в 2...3 раз меньше статических в зависимости от инструментального материала.

4.2. Потеря работоспособности инструмента

Потеря работоспособности инструмента классифицируется следующим образом:

1. Хрупкое разрушение:
 - 1.1. Выкрашивание.
 - 1.2. Скол.
2. Пластическая деформация режущего клина.
3. Износ инструмента.

При *хрупком разрушении* изменение геометрии происходит очень быстро. При *выкрашивании* разрушаются и отделяются маленькие объёмы (0,05...0,5 мм) инструментального материала, что происходит обычно на главной режущей кромке. Вызвано это явление чрезмерной подачей или, гораздо реже, большой глубиной резания, появлением вибрации и неправильным выбором геометрии инструмента и его материала.

Так, например, заточка на главной режущей кромке упрочняющей фаски с передним углом $\gamma_{\phi} = -5 \dots -10^{\circ}$ и шириной (0,2...1) s существенно уменьшает вероятность выкрашивания при обработке твёрдых и прочных материалов, при работе с ударами и т.п. Заточка фаски, однако, вызывает увеличение силы резания, что вызывает увеличение упругой деформации СПИД и уменьшение точности обработки; повышение температуры резания, что приводит к уменьшению стойкости инструмента, поэтому применение фаски должно быть обосновано.

Под *сколом* подразумевается отделение большого объёма (размером более 2 мм) инструментального материала, что происходит при чрезмерной подаче или глубине резания, появлении большой фаски износа по задней поверхности, при ударе и неправильном выборе геометрии инструмента и его материала. После скола, в отличие от выкрашивания, резание становится невозможным, а инструмент чаще всего подлежит существенной переточке или даже перепайке режущей пластины при напайной режущей пластине. В случае использования СМП (сменной многогранной пластины) требуется смена режущей вершины, а иногда и замена режущей пластины. Заготовка после скола часто получает серьёзные повреждения поверхности резания, переходящие в обработанную поверхность, и поэтому скол недопустим.

Обычно при соблюдении рекомендованных параметрах режима резания и предельно допустимом износе пластина не скалывается, хотя микровыкрашивания и могут появляться, что тоже нежелательно.

При хрупком разрушении прочность инструмента оценивается сопоставлением напряжений, возникающих в режущем клине при резании, с предельно допустимыми для данного инструментального материала. Комплексные исследования прочности режущей части инструмента были проведены А.А. Аваковым, А.И. Бетанели, Т.Н. Лоладзе, В.А. Остафьевым, Г.Л. Хаеом и многими другими исследователями.

Исследования процесса хрупкого разрушения показали, что при этом происходит зарождение и накопление микротрещин, которые затем сливаются в одну макротрещину (Остафьев В.А.). Эта трещина и становится поверхностью раздела с характерным кристаллическим изломом. Наиболее вероятными местами появления микротрещин обычно являются зоны с наибольшими внутренними напряжениями, однако в некоторых случаях (например, всестороннее сжатие) могут быть и отступления от этого правила.

Наибольшее распространение получили численные методы, особенно метод конечных элементов [1]. Это связано и с большей точностью расчета, и с наличием готовых универсальных программ для его реализации.

Сущность **метода конечных элементов** (МКЭ) заключается в том, что рассматриваемая область разбивается на большое число отдельных элементов простой геометрической формы, связанных в узловых точках налагаемыми связями. Каждому элементу предписываются конкретные свойства, неизменные внутри каждого элемента. На узлы, являющимися общими для выделенного элемента и остальным телом инструмента, налагаются необходимые связи. К

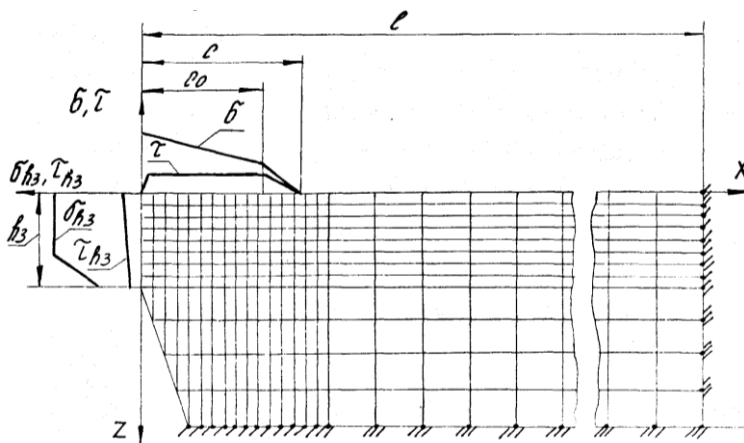


Рис. 4.5. Исходная схема расчёта напряжённо-деформированного состояния режущего клина изношенного инструмента

элементам рабочих поверхностей прикладываются контактные нагрузки, после чего определяются деформации и напряжения в каждом элементе.

Величина контактных нагрузок на рабочих поверхностях резца может быть определена методом разрезного резца, а также расчётами с учетом характера распределения контактных нагрузок и экспериментально найденных сил на передней поверхности. Определение длины контакта на передней поверхности инструмента производится обычно на инструментальном микроскопе по следу контакта.

Режущий клин разбивается на прямоугольные и треугольные элементы (в зависимости от геометрии режущего клина). Чем их больше, тем выше точность расчётов, поэтому их обычно 500...1000 штук. Обычная схема разбивки, выбранная система координат и характер наложенных связей на опорные узлы приведены на рис. 4.5.

При слишком большом числе элементов возрастает трудоемкость описания исходных данных, время счета и вероятность сбоя компьютера. В то же время размеры элементов должны быть достаточно малы с целью

увеличения точности расчета и разрешающей способности. Поэтому обычно ограничиваются расчетом небольшой области режущего клина вблизи режущей кромки: $l = 1 \dots 10$ мм, $h_{\text{расч}} = 3 \dots 6$ мм (рис. 4.5 и 4.6).

Установив при расчете МКЭ величину напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} , а по ним и величину главных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 , действующих в режущей части инструмента, можно оценить запас его прочности.

Для этого необходимо выбрать определенный критерий прочности, с которым будут сравниваться рассчитанные главные напряжения. Например, можно взять рассчитанное максимальное напряжение растяжения в режущем клине, который будет сравниваться с пределом прочности на растяжение, определённым при простом растяжении инструментального материала. Однако при этом не будут учитываться другие напряжения в инструменте. Так, при всестороннем сжатии все материалы не разрушаются даже при превышении предела прочности на сжатие.

В настоящее время широко используется критерий предельного состояния, разработанный в институте проблем прочности АН УССР Г.С. Писаренко и А.А. Лебедевым. Основанный на современных представлениях о кинетике деформирования и разрушения материалов, критерий Писаренко-Лебедева обладает высокой достоверностью (выше 92%) и описывается следующим выражением:

$$\sigma_{\eta} = \chi \times \sigma_t + (1 - \chi) \times \sigma_1 \times p \leq \sigma_{\sigma}, \quad (4.3)$$

где: $\chi = \sigma_{\sigma} / \sigma_{-e}$ - константа материала при заданных условиях работы - её величина характеризует степень участия в микроразрушении сдвиговой деформации, создающей благоприятные условия для разрыхления материала и образования трещин;

$\sigma_{\sigma}, \sigma_{-e}$ - величины предельного сопротивления материала при одноосном растяжении и сжатии;

σ_t - интенсивность напряжений в рассматриваемой точке:

$$\sigma_t = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}; \quad (4.4)$$

$p = A^{1-j}$, здесь - A - константа материала, отражающая характер имеющихся в материале дефектов и размеры тела, т.е. отражающая статистическую сущность процесса разрушения;

$j = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_t$, - параметр напряженного состояния, имеющий смысл

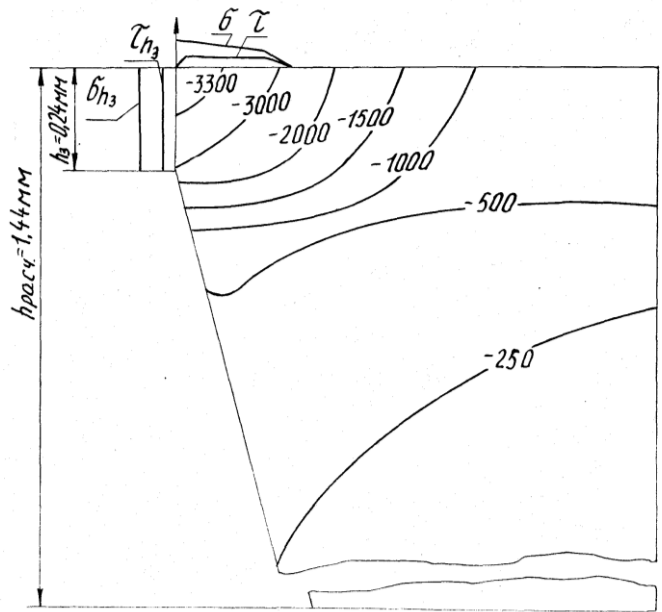


Рис. 4.6. Распределение главного напряжения σ_3 , МПа, при толщине расчётной зоны $h_{\text{расч.}}=1,44$ мм. ВТЗ-1 – ВК8, $\gamma=0^\circ$, $V=60$ м\мин, $S=0,21$ м\об. (Полетика М.Ф., Козлов В.Н.)

жесткости нагружения.

Учитывая изменчивость свойств инструментальных материалов с ростом температуры, В.А.Остафьев рекомендует следующие критерии предельного состояния для сплавов группы WC-Co, когда температура $\theta < 870$ К:

$$\sigma_{\eta} = 0,24 \cdot \sigma_i + 0,76 \cdot \sigma_1 \cdot 0,8^{1 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1}} \leq \sigma_B; \quad (4.5)$$

Запас прочности инструментального материала:

$$n = \sigma_B / \sigma_{\eta}. \quad (4.6)$$

Для твердого сплава BK8 с размером зерна от 1 до 2 мкм пределы прочности: при растяжении $\sigma_B = 780$ МПа, при сжатии $\sigma_{-B} = 4200$ МПа [2].

Критерий Писаренко-Лебедева имеет высокую достоверность в тех случаях, когда разрушение материала происходит от растягивающих напряжений.

В областях сжимающих напряжений его применение не предусмотрено. Анализ напряженного состояния режущего клина показывает, что при значительном износе по главной задней поверхности, в области режущей кромки в большинстве случаев возникают напряжения сжатия, а растягивающие напряжения отсутствуют.

В связи с этим необходимо использовать критерий, удовлетворительно описывающий предельное состояние хрупкого материала при действии сжимающих напряжений. В этой зоне можно использовать критерий первой теории прочности, когда наибольшее по абсолютной величине главное напряжение σ_3 сравнивается с пределом прочности твердого сплава на сжатие (см. рис. 4.6). В отдельных случаях прочность инструмента дополнительно можно оценивать и по максимальным касательным напряжениям (см. рис. 4.7).

Исследования показали, что при обработке титанового сплава BT3-1 острозаточенным инструментом с нулевым передним углом на задней

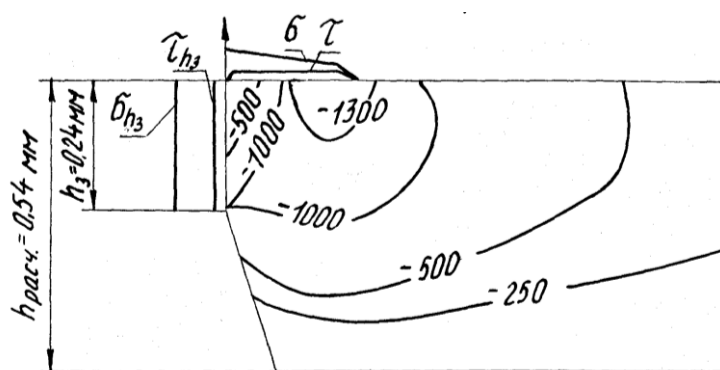


Рис. 4.7. Распределение главного касательного напряжения τ_{max} , МПа, в режущем клине при износе инструмента по задней поверхности $h_3 = 0,24$ мм. BT3-1 – BK8, $\gamma = 0^\circ$, $V = 60$ м\мин, $S = 0,21$ м\об.

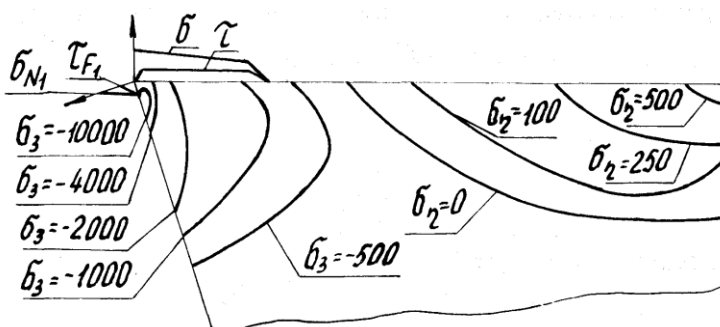


Рис. 4.8. Распределение главного напряжения σ_3 и критерия σ_{η} , МПа, в острозаточенном клине.

BT3-1 – BK8, $\gamma = 0^\circ$, $V = 60$ м\мин, $S = 0,21$ м\об.

поверхности у режущей кромки появляется зона, в которой сжимающие напряжения превышают предельно допустимые, в результате чего в момент врезания и происходит выкрашивание режущей кромки (см. рис. 4.8). На передней поверхности на расстоянии более 1,5 длин контакта стружки с инструментом от режущей кромки появляются напряжения растяжения, наибольшая величина которых достигает $\sigma_{\eta} = 500$ МПа на расстоянии 4-х длин контакта (4с).

Таким образом, на передней поверхности имеется опасная зона, где σ_{η} приближается к предельно допустимому значению ($\sigma_{\sigma} = 780$ МПа). В области режущей кромки расположение линий равных главных напряжений σ_3 примерно совпадает с линиями поверхности раздела при выкрашивании и сколах твердосплавного инструмента.

При появлении фаски износа на задней поверхности зона с запредельно допустимыми значениями σ_3 на задней поверхности исчезает (рис.4.6). Наибольшее значение главного напряжения по абсолютной величине не превышает 3400 МПа у режущей кромки, что на практике косвенно подтверждается уменьшением вероятности выкрашивания при появлении фаски. В то же время увеличивается зона со средними значениями напряжений ($1000 \text{ МПа} \leq |\sigma_3| \leq 3000 \text{ МПа}$), что говорит об увеличении вероятности скола, поскольку возрастает вероятность попадания в этой области различных дефектов твёрдого сплава - потенциальных очагов зарождения микротрещин.

Растягивающие напряжения в рассчитываемой области режущего клина отсутствуют.

Рассматривая уменьшение сжимающих напряжений на задней поверхности и исчезновение растягивающих на передней при небольшой фаске на задней поверхности, необходимо разделять пути её появления в целях правильной оценки ее влияния на прочность инструмента. В том случае, если фаска на задней поверхности появляется в результате выкрашивания режущей кромки, то при этом в месте её образования появляются и микротрещины, которые являются концентраторами напряжений и существенно увеличивают вероятность дальнейшего выкрашивания режущей кромки, несмотря на уменьшение расчетных напряжений.

При расчете не учитывалось появление микротрещин на фаске задней поверхности, т.е. геометрия клина моделировалась заточкой фаски без образования концентраторов напряжения. Поэтому для уменьшения напряжений необходимо притуплять режущую кромку заточкой фаски по задней поверхности величиной 0,05...0,2 мм.

Положительную роль в повышении хрупкой прочности инструмента оказывает высокая температура в режущем клине, при которой происходит «заваривание» микротрещин и локализация дефектов инструментального материала (Утешев М.Х.).

При обработке труднообрабатываемых материалов для увеличения прочности режущего клина рекомендуется затачивать на передней поверхности фаску с отрицательным передним углом $\gamma_{\phi} = -10 \dots -25^{\circ}$ (см. рис. 1.11).

Пластическая деформация режущего клина происходит обычно при черновой обработке труднообрабатываемых материалов (титановых и жаропрочных сплавов и т.п.) и большом износе по главной задней поверхности. Вследствие высокой температуры резания (более 800 °С) инструментальный материал становится более пластичным, а большие нормальные контактные нагрузки на передней и задней поверхностях приводят к появлению эффекта гидростатического давления.

При таких условиях даже хрупкие при комнатной температуре твёрдые сплавы становятся достаточно пластичными, и режущий клин начинает деформироваться. Режущая кромка при этом выдавливается вверх, приводя к появлению отрицательного заднего угла на фаске износа по главной задней поверхности $\alpha_{фз} = -3...-10^\circ$ и округлению главной режущей кромки с радиусом $\rho = 2...10$ мм. Резец при этом остаётся работоспособным вследствие появления застойной зоны на задней поверхности, которая выполняет роль режущего материала. Такой эффект обеспечивается размягчением обрабатываемого материала в зоне стружкообразования, иногда даже до состояния вязко текущей жидкости, предшествующей плавлению, т.е. с температурой 1300...1500 °С.

Повышение температуры при резании отрицательно сказывается на стойкость инструмента, но положительно на его прочность. При повышении температуры связка твёрдых сплавов (обычно кобальт) становится более пластичной, и даже образующиеся в режущем клине микротрещины «самозалечиваются», т.е. свариваются, что приводит к прекращению их роста и перехода в макротрещину. Этим объясняется возможность обработки с ударами хрупкими твёрдосплавными сплавами, в то время как даже незначительное касание инструмента поверхности заготовки без её вращения приводит к сколу вершины режущей кромки.

Хрупкое разрушение и пластическую деформацию режущего клина можно и **нужно** избегать, назначая щадящие режимы резания и не допуская чрезмерного износа инструмента. Однако износа инструмента избежать невозможно. **Износ** инструмента – это постепенное и сравнительно медленное изменение первоначальной геометрии режущего клина.

Зоны износа инструмента появляются:

- 1) на передней поверхности с образованием лунки износа;
- 2) на режущей кромке инструмента с образованием округления радиусом ρ_w ;
- 3) на задней поверхности с образованием фаски износа шириной h_3 и с отрицательным задним углом на фаске износа $\alpha_{фз}$ (рис. 4.5).

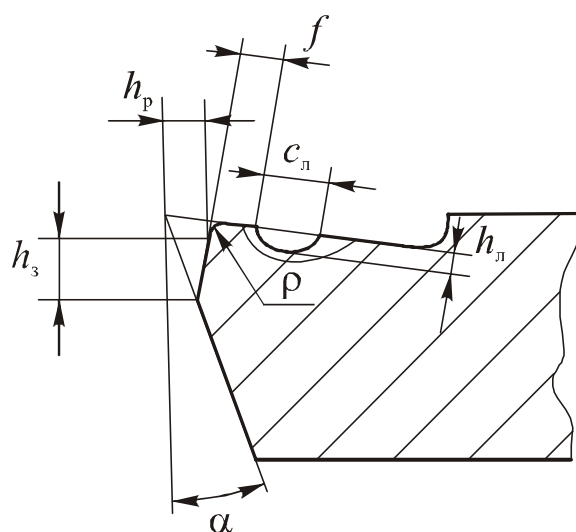


Рис. 4.5. Зоны износа токарного резца.

Лунка на передней поверхности инструмента начинает образовываться в месте наибольшей температуры на передней поверхности инструмента, т.е. на некотором удалении от режущей кромки (см. рис. 3.13, а, в, з), что подтверждает гипотезу о решающем влиянии температуры на износ режущего инструмента. С течением времени лунка углубляется (параметр h_V), увеличивается её ширина a , приближаясь к режущей кромке (параметр f), но это приближение происходит очень медленно по сравнению с увеличением ширины a , поэтому износ на передней поверхности не столь опасен для прочности режущего клина.

Более того, образование лунки на передней поверхности инструмента благоприятно сказывается на завивании стружки, на уменьшение сил резания вследствие увеличения переднего угла γ_f на образующейся фаске шириной f .

Округление режущей кромки инструмента увеличивает прочность режущего клина, но существенно увеличивает силу и температуру резания. Увеличение силы резания уменьшает точность обработки, а при точении маложёстких деталей приводит к образованию погрешностей формы (в продольном и поперечном сечении) и даже вырыванию заготовки из патрона или центров. Быстрое округление режущей кромки характерно при обработке труднообрабатываемых материалов, а при обработке обычных конструкционных сталей и чугунов износ по задней поверхности протекает быстрее, поэтому существенный радиус $\rho_w \geq 0,2$ мм наблюдается крайне редко.

Фаска износа на задней поверхности появляется в первое же мгновение при касании инструмента поверхности заготовки из-за микровыкрашивания режущей кромки. В первые секунды резания фаска увеличивается интенсивно до ширины $h_3 (h_{FL}) = 0,02 \dots 0,06$ мм (приработочный износ), а затем интенсивность износа существенно уменьшается (рис. 4.6).

В период нормальной работы инструмента кривая износа по задней поверхности увеличивается по линейному закону и преобладает над износом в других зонах (на передней поверхности и округлении режущей кромки), особенно при обработке хрупких материалов, образующих элементную стружку.

По мере увеличения ширины износа $h_3 (h_{FL})$ увеличивается и температура резания, и сила на задней поверхности, которая может начать превышать силу резания на передней поверхности. Если прочность инструмента недостаточна, то происходит скол режущего клина. Ширину износа h_3 в этот момент называют критической по прочности $h_{3 \text{ крит.пр}}$ и стараются ни в коем случае не допускать.

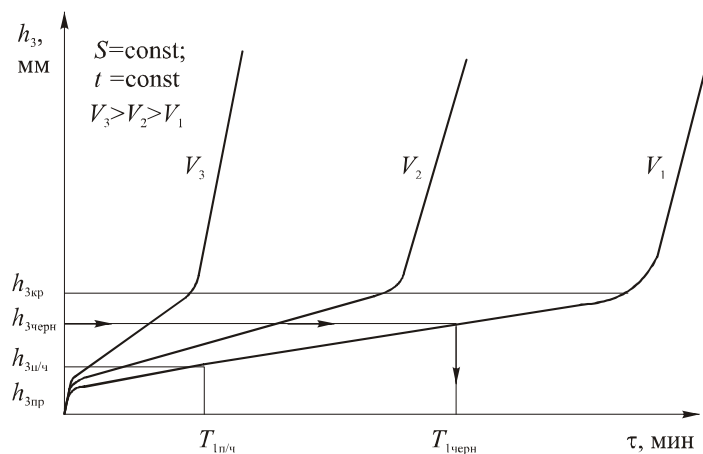


Рис. 4.6. Графики износа по задней поверхности h_{FL} токарного резца в зависимости от времени его непрерывной работы T .

Если прочность инструмента ещё достаточна, то происходит дальнейшее увеличение ширины фаски h_3 пока не наступит момент, когда начнётся резкое увеличение интенсивности износа, или так называемый **катастрофический износ**. При использовании быстрорежущего инструмента это связано с наступлением температуры отпуска (приблизительно 620 °С), после чего твёрдость инструментального материала резко уменьшается, что вызывает ещё большее увеличение интенсивности износа.

При использовании твёрдосплавного инструмента резкое увеличение интенсивности износа связано с наступлением температуры интенсивного окисления инструментального материала (приблизительно 880 °С).

Ширина фаски на задней поверхности в момент резкого увеличения интенсивности износа приблизительно одинакова для данного материала, мало зависит от скорости резания и подачи, и называется критической по износу и обозначается $h_{FL CR}$. Величина $h_{FL CR}$ наступает существенно быстрее при увеличении скорости резания V (рис. 4.6) и менее существенно при увеличении подачи s . Износ до величины $h_{FL CR}$ стараются не допускать, для чего перетачивают или заменяют инструмент заранее при достижении ширины фаски износа по задней поверхности $h_{FL O}$.

Критерии износа режущего инструмента

Под критерием износа понимается наступления явления, после которого резание нецелесообразно и режущий инструмент требуется сменить или переточить. В качестве критериев могут быть использованы следующие параметры:

1. Существенное ухудшение качества обработанной поверхности (увеличение шероховатости, появление рисок или надрывов и т.п.);
2. Появление свиста или вибрации во время резания;
3. Увеличение силы резания, особенно радиальной составляющей P_r , что приводит к увеличению упругой деформации системы СПИД и уменьшению точности обработки;
4. Изменение цвета стружки (например, появление синей стружки при обработке быстрорежущим инструментом недопустимо, т.к. этот цвет свидетельствует о температуре более 620 °С, после которой наступает отпуск и твёрдость инструментального материала резко уменьшается, делая дальнейшее резание невозможным);
5. Появление конусности вместо цилиндрической формы, что свидетельствует об увеличении интенсивности размерного износа h_s (см. рис. 4.5);
6. Увеличение ширины фаски износа по задней поверхности до предельно допустимой величины. Например, при черновом точении (по 14...11 квалитету) конструкционной незакалённой стали твёрдосплавным резцом $h_{3 max} = h_{FL max} = 0,75$ мм, при полустачковом точении (по 10...9 квалитету) – $h_{3 max} = h_{FL max} = 0,2$ мм (рис. 4.5).

Могут быть и другие критерии износа, например, ухудшение завивания стружки, появление местного износа на главной задней поверхности в месте

контакта с загрязнённой твёрдыми окислами и окалиной обрабатываемой поверхностью (ус), износ вершины инструмента (при сверлении и фрезеровании это износ по уголкам) и т.п.

Чаще всего в качестве наиболее объективного критерия износа принимается предельно допустимый износ по задней поверхности ($h_{3, max}$), тем более, что все остальные параметры вызваны увеличением h_3 .

Критерии износа для разных видов обработки также различаются. Например, при сверлении и фрезеровании концевыми фрезами основным критерием является износ по уголкам с образованием фаски износа по задней поверхности. Это приводит к увеличению температуры резания и при наступлении критической температуры (приблизительно 620 °С в зависимости от марки быстрорежущей стали) наступает отпуск и твёрдость инструментальной стали резко уменьшается, делая дальнейшее резание невозможным. Для твёрдосплавного инструмента эта температура выше, поэтому резание можно производить и при появлении синего цвета у стружки. По уголкам износ происходит быстрее из-за того, что на периферии свёрл и фрез диаметр наибольший, а значит и скорость резания тоже наибольшая.

Виды износа режущего инструмента

Виды износа режущего инструмента по его природе (причине появления) классифицируются следующим образом:

1. Абразивный износ.
2. Адгезионно-усталостный.
3. Химический (окислительный).
4. Диффузионный.

Абразивный износ происходит из-за царапания поверхностей инструмента острыми и твёрдыми включениями обрабатываемого материала: окислами, нитридами, карбидами и т.п. При наблюдении через окуляр микроскопа на поверхностях инструмента, очищенной от стружки и налипов обрабатываемого материала, видны царапины, перпендикулярные главной режущей кромке, т.е. на передней поверхности по ходу движения стружки, а на задней поверхности в месте контакта инструмента с поверхностью резания. Этот вид износа имеет превалирующее (преимущественное) значение при малых скоростях резания (менее 5...15 м/мин), когда остальные виды существенно ещё не проявляются. Абразивный износ происходит и при средних, и при высоких скоростях резания, но другие виды износа начинают происходить более интенсивно.

При появлении нароста у режущей кромки на передней поверхности инструмента абразивного износа под наростом практически нет из-за отсутствия непосредственного контакта движущейся стружки с передней поверхностью инструмента. Этим объясняется появление лунки на передней поверхности на некотором удалении от режущей кромки на малых скоростях резания, когда действие температуры ещё не существенно (температура поверхности контакта инструмента со стружкой менее 150...200 °С).

Для уменьшения абразивного износа применяются вещества, создающие на поверхности инструмента достаточно твёрдую плёнку, препятствующую царапанию непосредственно инструментального материала.

Эта защитная плёнка быстро стирается, однако создаётся новая и т.д.

Существенно уменьшить интенсивность абразивного износа позволяет применение напылённых покрытий из нитридов титана и других очень твёрдых соединений. Цвет покрытия обычно золотистый, но могут быть и другие цвета. Толщина покрытия небольшая – несколько сотых или десятых долей миллиметра, поэтому после его истирания наступает износ основного инструментального материала. При нанесении покрытия большое значение имеет прочность его сцепления с инструментом, поэтому поверхности инструмента тщательно очищаются от загрязнений, моются, обрабатываются специальными реагентами.

Чаще всего покрытия делаются многослойными: нижний слой из материала мягкого, но имеющего хорошее сцепление с инструментом (подложка), затем промежуточный слой прочного материала, имеющего хорошее сцепление и с материалом подложки, и с материалом основного покрытия. Количество слоёв может быть достаточно много (до шести), целью которых служит не только увеличение твёрдости и прочности покрытия, но и уменьшение теплопередачи к основному инструментальному материалу, увеличение жёсткости подложки для предотвращения растрескивания основного покрытия и т.д. Для каждой группы обрабатываемого и инструментального материала разрабатывается свой состав, зависящий и от режимов резания (например, для черновой или чистовой обработки). Основной задачей покрытия является уменьшить размерный износ h_s (см. рис. 4.5) для увеличения точности обработки.

После износа пластинки с покрытием она не перетачивается и покрытие заново не наносится, а сама пластинка может быть использована в качестве лигатуры (легирующих материалов) в металлургии.

Адгезионно-усталостный износ происходит из-за схватывания (прилипания, адгезии) материала стружки с зёрнами режущего инструмента. После адгезии происходит рывок зерна из-за движения стружки, срыв поверхности стружки в месте контакта с зерном, снова схватывание и т.д. Из-за частых рывков происходит усталостное разрушение на поверхности контакта зерна или группы зёрен инструментального материала с другими зёрнами режущего клина.

Предел прочности при пульсирующей нагрузке в 1,5...2 раза меньше предела прочности, определённого при статической нагрузке, поэтому на поверхности инструмента появляются микроскопические вырывы зёрен или группы зёрен из инструмента, приводящие к износу инструмента.

Адгезионно-усталостный износ происходит при всех скоростях резания, но при средних (более 50 м/мин) и высоких существенно увеличивается, когда температура поверхности контакта достаточно высока для появления эффекта адгезии (более 150 °С). С увеличением температуры связь зерна с поверхностью стружки становится более прочной, происходит как бы приваривание, а значит и сила вырыва становится больше, поэтому интенсивность износа возрастает. Адгезии способствует и высокая химическая активность прирезцово́й поверхности стружки из-за отсутствия окислов и загрязнений на ней после выхода обрабатываемого материала из зоны стружкообразования. При скоростях резания для конструкционной стали от 35 до 250 м/мин адгезионно-усталостный износ оказывает

превалирующее значение на износ инструмента.

Адгезионно-усталостный износ происходит более интенсивно при большом сродстве инструментального и обрабатываемого материалов. Например, при обработке титанового сплава двухкарбидным твёрдосплавным инструментом группы ТК износ происходит более интенсивно по сравнению с применением однокарбидного группы ВК, т.к. в состав группы ТК входит карбид титана.

Для снижения интенсивности адгезионно-усталостного износа используются смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), которые не только уменьшают температуру резания, но и способствуют появлению защитной масляной плёнки на поверхностях инструмента, уменьшающей адгезию. Применяются также специальные присадки для СОЖ, способствующие интенсивному образованию окислов на прирезцовой поверхности стружки и на рабочих поверхностях инструмента, что уменьшает адгезию.

Большой проблемой для проникновения СОЖ к режущей кромке являются большие контактные нагрузки на поверхностях инструмента вблизи зоны стружкообразования, поэтому в СОЖ добавляются присадки для увеличения её проникающей способности (увеличения смачиваемости). Такого вида присадки способствуют и облегчению стружкообразования в связи с их расклинивающей способностью.

Для уменьшения длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента *s* применяют укороченную переднюю поверхность за счёт заточки фаски с длиной, меньшей в 1,5...2 раза предполагаемой *s*. Применение такой фаски также облегчает проникновение СОЖ к зоне резания. С этой же целью используются лунки на передней поверхности инструмента вблизи режущей кромки, порошки и уступы различной формы. Все эти меры улучшают также дробление и завивание стружки.

Применение напылённых покрытий на поверхностях инструмента также уменьшает адгезию и позволяет увеличить стойкость инструмента в 1,5...3 раза.

Химический, или *окислительный* износ происходит из-за окисления поверхностного слоя инструмента. Этот вид износа начинается при высоких скоростях резания (более 200 м/мин для конструкционной стали), когда температура резания настолько велика (более 700 °С), что резко возрастает интенсивность химических реакций, и, в частности, окисления. При взаимодействии карбидов вольфрама и титана с кислородом воздуха происходит образование окислов этих элементов, которые имеют гораздо меньшую твёрдость и прочность по сравнению с карбидами WC и TiC. Окислительный износ рассматривают преимущественно для твёрдых сплавов и других сверхтвёрдых материалов, поскольку инструментальные стали не способны вообще работать при столь высоких температурах из-за отпуска.

Ярким примером окисления твёрдого сплава является превращения твёрдосплавной пластины в зеленовато-серый порошок после её нагрева в печи до температуры более 800 °С и выдержки там в течении 5...8 часов. Конечно, при резании время гораздо меньше, но для износа достаточно окисление на несколько десятых долей миллиметра в глубину для существенного изменения геометрии режущего инструмента. К тому же при резании окислы на поверхности инструмента немедленно удаляются

стружкой, и во взаимодействие с воздухом вступают всё новые ещё не окисленные слои инструмента, что существенно увеличивает интенсивность окисления.

Для уменьшения окислительного износа применяют СОЖ с присадками, образующими защитный слой на рабочих поверхностях инструмента и препятствующими окислению.

Таким образом, создаются СОЖ с присадками, каждая из которых начинает действовать в определённых интервалах температуры. Поэтому появилось большое количество видов и марок СОЖ, предназначенных для использования при обработке определённых марок обрабатываемого материала, для определённых марок инструментального материала и при определённых режимах резания. Экономически считается оправданным применение СОЖ, если её использование привело к увеличению стойкости инструмента всего на 10%.

Некоторые СОЖ очень эффективны, но опасны для здоровья (например, сульфохрезол, увеличивающий риск появления онкологических заболеваний). В таких случаях должны применяться индивидуальные средства защиты: резиновые перчатки, каски с защитным экраном от брызг СОЖ, респираторы или даже противогазы.

В тех случаях, когда применение СОЖ недопустимо (например, при обработке титановых сплавов недопустимо загрязнение стружки из-за невозможности её переработки), используется сжатый воздух, который под давлением 4...5 атм. подаётся через сопло в зону резания. Это уменьшает температуру и длину контакта стружки с передней поверхностью инструмента, уменьшает адгезию. Для предотвращения окисления стружки обработку производят с достаточно малой скоростью резания. Для уменьшения вредного влияния шума от воздуха, проходящего через сопло, оператор станка должен использовать наушники.

Применение напылённых покрытий на поверхностях инструмента также уменьшает химический износ и позволяет увеличить стойкость инструмента в 1,5...3 раза.

Диффузионный износ происходит из-за диффузии атомов инструментального материала (например, кобальта) в стружку, а атомов материала стружки – в контактирующие поверхности инструмента (например, железа). В результате такого перехода связка между зёрнами твёрдого сплава становится более хрупкой и слабой, что способствует более интенсивному адгезионно-усталостному износу. Скорость диффузии при комнатной температуре настолько мала, что ею можно пренебречь. Однако при высокой температуре (более 600 °С) переход атомов существенно увеличивается, чему способствует и ювенильная (чистая, свободная от окислов) поверхность прирезцово́й поверхности стружки и достаточно чистая поверхность инструмента в местах контакта со стружкой из-за износа. Интенсивность диффузии, однако, остаётся невысокой по сравнению с остальными видами износа.

Раздел 5. Стойкость режущих инструментов и обрабатываемость материалов резанием

5.1. Стойкость режущих инструментов и её определение

Время непрерывной работы инструмента до его замены или переточки называется **стойкостью** инструмента T . Момент наступления этой замены определяется критерием износа.

Для построения стойкостных зависимостей производится обработка заготовки из выбранного обрабатываемого материала с постоянной подачей, глубиной и скоростью резания. Инструментальный материал, геометрия инструмента, глубина резания и подача выбираются оптимальными для исследуемого вида обработки (например, получистового точения) и обрабатываемого материала.

Выбирается критерий износа (предельно допустимый параметр при износе). Чаще всего выбирается ширина износа по задней поверхности h_z . Например, при получистовом точении незакалённой стали $h_{z \text{ макс}} = 0,25$ мм. Если износ будет больше, то увеличится радиальная составляющая силы резания P_y и из-за повышенной упругой деформации системы СПИД требуемой точности обработки достигнуть не удастся.

При неизменной скорости резания V_1 производится обработка, и время от времени (например, через 10 с при малой ожидаемой стойкости, или через 5 мин при большой ожидаемой стойкости) резание прекращается, инструмент отводится от заготовки и измеряется износ по задней поверхности h_z . Если максимально допустимый параметр ($h_{z \text{ кр}}$, существенное увеличение шероховатости обработанной поверхности или другой выбранный критерий (параметр) износа) не достигнут, то резание продолжается с периодическими измерениями. Если до допустимого предела далеко, то время до следующего измерения увеличивают, если же он близко – то уменьшают.

Для первой серии экспериментов рекомендуется выбирать такую скорость V , чтобы ожидаемое время до предельно допустимого износа было в пределах 10...30 минут. При большей скорости интенсивность износа может быть настолько высокой, что исследователь не сможет достаточно точно зафиксировать наступление $h_{z \text{ кр}}$. Если выбранный параметр износа визуально легко определим (например, существенное увеличение шероховатости обработанной поверхности, то исследования проводить проще, не обязательно время от времени прекращать резание.

При малой скорости резания интенсивность износа может быть очень малой, что приведёт к необоснованно долгому ожиданию

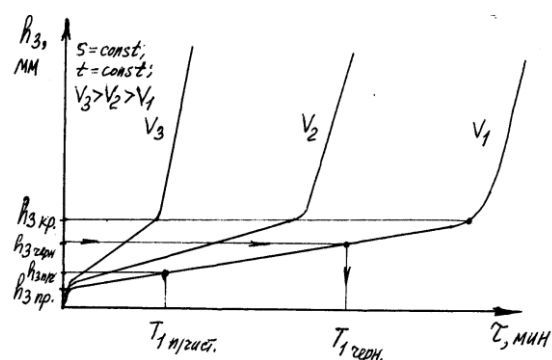


Рис. 5.1. Графики износа по задней поверхности h_z токарного резца в зависимости от времени его непрерывной работы t .

наступления предельно допустимого износа (например, несколько часов).

При проведении исследований стойкости на других скоростях резания (как больших, так и меньших) можно с большей уверенностью судить об ожидаемой стойкости и о промежутках времени для оценки степени износа.

При использовании в качестве критерия износа длину фаски износа по задней поверхности h_z рекомендуется строить график зависимости износа от времени, на котором по оси абсцисс откладывается общее время работы инструмента τ , а по оси ординат – измеренный износ h_z (рис. 5.1). Если допустимый предел был пройден, то время непрерывной работы инструмента можно определить пересечением горизонтальной линией с построенным графиком при неизменной скорости резания V_1 .

Так, при черновой обработке быстрорежущим резцом незакалённой стали 45 максимально допустимый износ по задней поверхности часто принимают равным 0,75 мм ($h_{z\text{ черн}} = 0,75$ мм). Время, соответствующее точки пересечения горизонтальной линии $h_{z\text{ черн}}$ с графиком изменения износа V_1 , и будет стойкость инструмента $T_{1\text{ черн}}$ при черновой обработке при скорости резания V_1 .

При черновой обработке стали твёрдосплавным инструментом допустимый износ по задней поверхности может быть установлен больше, т.к. отпуск у твёрдосплавного инструмента отсутствует, и предельный износ ограничивается либо существенной упругой деформацией системы СПИД и потерей точности обработки, либо интенсивным окислительным износом при температуре более 800 °С.

При получистовой обработке допустимый износ по задней поверхности принимается обычно 0,25 мм ($h_{z\text{ п\ч}} = 0,25$ мм), т.к. при большем износе на резец будут действовать большие силы со стороны задней поверхности, что приведёт к упругой деформации системы СПИД и потери точности размера и формы обработанной поверхности. Стойкость инструмента будет соответственно меньше – $T_{1\text{ п\чист}}$ (рис. 5.1).

После того как стойкость инструмента при скорости резания V_1 определена, инструмент меняется или перетачивается, и проводятся аналогичные испытания при других скоростях резания (V_2, V_3, \dots, V_i) и определяют стойкости T_2, T_3, \dots, T_i для соответствующих условий резания (черновая или получистовая обработка).

Затем строится график зависимости стойкости T от скорости резания V при постоянной глубине резания t_1 и подаче s_1 (рис. 5.2). Он всегда имеет выпуклый характер, т.е. чем больше скорость резания, тем быстрее уменьшается стойкость (при небольшом увеличении скорости резания происходит гораздо большее уменьшение стойкости). Эта зависимость имеет степенной (нелинейный) характер, поэтому для построения графика кривой зависимости $T = f(V)$ требуется большое количество точек ($A_1, A_2, A_3, \dots, A_i$).

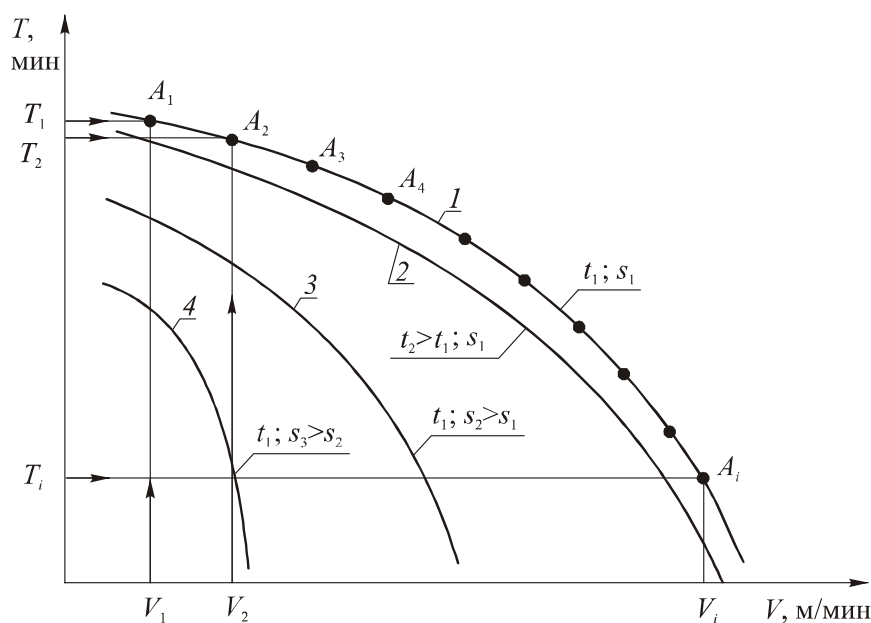


Рис. 5.2. Влияние скорости резания V на стойкость инструмента T .

Для уменьшения трудоёмкости испытаний строят стойкостные зависимости в двойных логарифмических координатах $\lg T = f(\lg V)$. При этом используется свойство логарифмических функций: логарифм степенного уравнения преобразует его в уравнение с **линейной** зависимостью

$$y = ax^b; \rightarrow \lg y = \lg ax^b = \lg a + b \lg x. \quad (5.1)$$

В уравнении (5.1) $\lg a$ есть постоянная величина $\lg a = c$, а b уже не показатель степени, а коэффициент у переменной составляющей $\lg x$ рассматриваемого уравнения, он будет определять угол наклона линейной зависимости.

Таким образом степенное уравнение принимает вид линейного $y = c + b \times x$.

При линейной зависимости для построения графика требуется знать положение только двух точек, максимально удалённых друг от друга, (см. рис. 5.3, график 1, точки A_1 и A_2). Положение промежуточных точек укажет, имеются ли у стойкостной зависимости точка перелома, после которой интенсивность

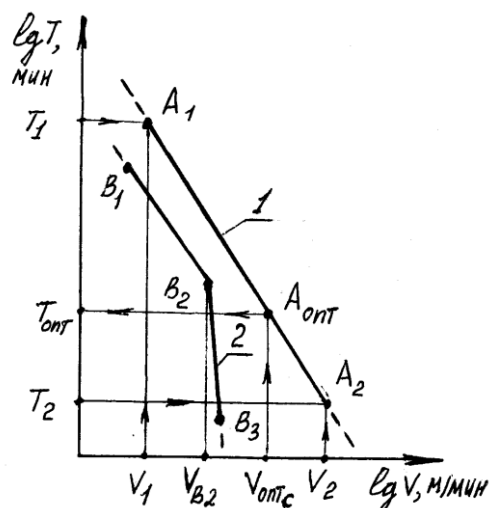


Рис. 5.3. Влияние скорости резания V на стойкость инструмента T .

1 – график при неизменной интенсивности износа при увеличении скорости резания; 2 – график при

после которой интенсивность

износа меняется (см. рис. 5.3, график 2, точка B_2).

Для построения графика $lgT = f(lgV)$ берут логарифмическую бумагу, у которой на обеих осях координат уже нанесена **неравномерная** логарифмическая шкала, что не требует логарифмирования и удобно в работе. Например, скорость резания $V_1=5$ м/мин наносят на горизонтальной оси над цифрой 5, а стойкость инструмента $T_1=120$ мин наносят на вертикальной оси напротив цифры 120 (точка A_1). Скорость резания $V_2=80$ м/мин наносят на горизонтальной оси над цифрой 80, а стойкость инструмента $T_2=10$ мин наносят на вертикальной оси напротив цифры 10 (точка A_2).

Для увеличения достоверности результатов при одной и той же скорости необходимо получить значение стойкости несколько раз, и желательно при использовании инструментов или режущих пластин из разных партий. У высококачественных инструментов разброс по стойкости как правило не превышает 10%, у некачественных – от 50 до 500%.

Конечно, строить стойкостные зависимости для некачественного материала инструмента при таком разбросе невозможно, поэтому проводят серии экспериментов, и в каждой серии используются режущие пластины из одной партии или даже только одна и та же пластина (например, многогранная, имеющая 5 вершин). После этого производится сравнение результатов, полученных в разных сериях. Если характер зависимостей и интенсивность износа сохраняется (графики параллельны), то результаты испытания могут быть использованы с уточнением величины разброса. Если же характер и интенсивность износа различаются, то результаты исследований использовать практически невозможно.

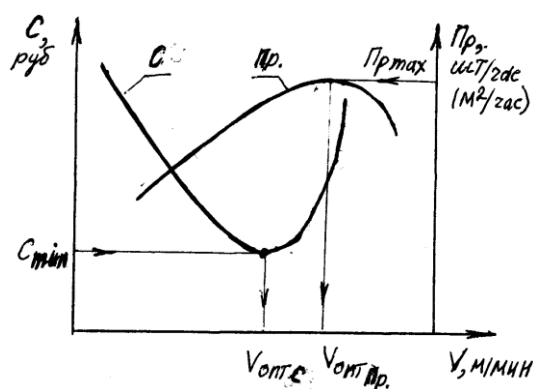


Рис. 5.4. Влияние скорости резания V на производительность $C_{Пр}$ и себестоимость изготовления C

Величина оптимальной скорости резания зависит от экономических показателей и производительности обработки (рис. 5.4).

При увеличении скорости резания производительность $Пр$ сначала увеличивается, а затем начинает уменьшаться из-за потерь времени на замену или переточку инструмента (рис. 5.1). Скорость резания, при которой производительность максимальна ($Пр_{max}$), называется оптимальной скоростью по производительности ($V_{опт Пр}$).

Себестоимость обработки заготовки (C) сначала уменьшается, а затем увеличивается из-за потерь времени на замену или переточку инструмента. Скорость резания, при которой производительность минимальна (C_{min}), называется оптимальной скоростью по себестоимости ($V_{опт C}$).

Чаще всего стараются добиться минимальной себестоимости, поэтому принимается этот **критерий оптимальности**.

Для определения оптимальной стойкости на оси абсцисс графика $lgT = f(lgV)$ (рис. 5.3) откладывается найденная из рис. 5.4 оптимальная скорость по себестоимости $V_{опт C}$. Пересечение вертикальной линии с

графиком $lgT = f(lgV)$ покажет точку $A_{\text{опт}}$. Горизонтальная линия, проведённая влево из этой точки, покажет на оси ординат оптимальную стойкость $T_{\text{опт}}$ ($lg T_{\text{опт}}$), при которой скорость резания будет оптимальна и будет обеспечена минимальная себестоимость обработки поверхности заготовки **по режиму резания**.

Оптимальная стойкость инструмента зависит от вида обработки (черновая или получистовая), от вида и стоимости оборудования и режущего инструмента, количества инструментов, используемых при выполнении операции.

При автоматизированном производстве и обработке на станках с ЧПУ, где оператор не смотрит постоянно на состояние инструмента, часто замена инструмента производится после отработки им определённого времени, равного оптимальной стойкости. Скорость резания при этом рассчитывается по формуле

по формуле
$$V = \frac{C_V}{(T^m \cdot t^x \cdot s^y)} \cdot K_V$$
 при задании стойкости T равной

оптимальной ($T = T_{\text{опт}}$). Коэффициент C_V и показатели степени в знаменателе выбираются из таблиц справочников по обработке резанием. Они зависят от обрабатываемого и инструментального материала, а также от вида обработки. Глубина резания t и подача s выбираются по рекомендациям справочников в зависимости от жёсткости заготовки, требуемой шероховатости обработанной поверхности и радиуса при вершине резца.

При черновой обработке стойкость, как правило, устанавливается достаточно большая. Например, при черновой обработке незакалённой стали на универсальном токарном станке твёрдосплавным инструментом $T_{\text{опт}} = 60 \dots 30$ мин. При получистовой обработке скорость резания должна быть высокой для получения малой шероховатости и товарного вида обработанной поверхности, а это возможно при малой подаче $s = 0,07 \dots 0,13$ мм/об и большой скорости резания $V = 300 \dots 400$ м/мин, что соответствует малой стойкости $T_{\text{опт}} = 15 \dots 30$ мин.

При чистовой обработке на дорогих станках с ЧПУ $T_{\text{опт}} = 5 \dots 10$ мин; при обработке на автоматических линиях – $120 \dots 180$ мин, а иногда и из расчёта работы без замены в течение одной рабочей смены. Последнее вызвано тем, что остановка работы на одном станке для замены инструмента приведёт к остановке всей линии, поэтому частая замена инструмента приведёт к потере производительности и повышения себестоимости. Считается целесообразным замену всех или большинства инструментов производить одновременно, и лучше всего в период пересмены.

Стойкость инструмента на дорогих станках с ЧПУ принимается малой для увеличения скорости резания, а значит и увеличения производительности и уменьшения срока амортизации оборудования. Конечно, при этом будет повышенный расход инструмента, однако его стоимость (даже дорогого инструмента) мала по сравнению со стоимостью оборудования, которую требуется окупить в сжатые сроки.

Для дорогого оборудования моральный износ наступает, как правило, быстрее физического, поэтому в промышленно развитых странах оборудование более 5 лет стараются не использовать, а перепродают в развивающиеся страны до наступления их физического износа.

Замена инструментов производится на универсальном оборудовании по мере наступления предельно допустимого износа по выбранному параметру или группе параметров.

При автоматизированной обработке применяется смешанная форма: принудительная (замена через определённое время) при нормальной работе инструмента и аварийная (при неожиданном быстром износе или поломке).

5.2. Смазочно-охлаждающие технологические средства

Знание природы износа необходимо для правильного выбора геометрии режущего инструмента, его материала, режимов резания и смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС). Цель СОТС – уменьшение интенсивности износа режущего инструмента, улучшение качества обработанной поверхности (уменьшение шероховатости и задиоров, величины и глубины остаточных напряжений), увеличение производительности обработки, повышение эксплуатационных характеристик детали. Улучшение обрабатываемости материалов при использовании в процессе резания СОТС является результатом их физико-химических воздействий на обрабатываемый материал, основными из которых являются: *смазывающее, охлаждающее, режущее, моющее, защитное и упрочняющее*.

СОТС должны не вызывать коррозию детали, приспособления и оборудования; не оказывать вредного физиологического влияния на рабочего (раздражение кожи и слизистых оболочек, запах); быть устойчивыми при эксплуатации и хранении; не воспламеняться при температурах, сопровождающих процесс резания; не иметь неприятного запаха.

СОТС делятся на твердые, жидкие, пластичные и газообразные.

К *твердым* СОТС относятся: неорганические материалы со сложной структурой (тальк, слюда, графит, бура, нитрид бора, дисульфиды молибдена, вольфрама и титана, и др.); твердые органические соединения (мыло, воск, твердые жиры); полимерные пленки и ткани (нейлон, полиамид, полиэтилен и др.); металлические пленочные покрытия (медь, латунь, свинец, олово, барий, цинк).

В чистом виде твердые СОТС применяют крайне редко, например, при обработке отверстий малого диаметра, при нарезании резьбы в металлах, склонных к налипанию на инструмент. Твердые СОТС обеспечивают низкий коэффициент трения (графит - $f_{тр} = 0,04$, дисульфид молибдена - $f_{тр} = 0,03$) и выдерживают высокие температуры и давления.

К *смазочно-охлаждающим жидкостям (СОЖ)* относятся: водные растворы минеральных электролитов, эмульсии; минеральные, животные и растительные масла; минеральные масла с добавками фосфора, серы и хлора (сульфофрезолы); керосин и растворы поверхностно-активных веществ в керосине; масла и эмульсии с добавками твердых смазывающих веществ; расплавы металла и др. Наиболее часто используются водные и масляные СОЖ.

Наряду с охлаждающим и смазывающим свойствами СОЖ должна обладать и *моющим действием*, которое заключается в удалении из зоны резания продуктов износа инструмента и заготовки в виде твердых частиц

карбидов, мелкой стружки и т.п., усиливающих абразивный износ инструмента и повышающих шероховатость обработанной поверхности. Моющее действие улучшается за счет введения в СОЖ эмульгаторов, уменьшающих поверхностное натяжение жидкости. Молекулы СОЖ при этом активно обволакивают удаляемые частицы, препятствуют их слипанию и облегчают их удаление из зоны резания. Это особенно важно при резании хрупких материалов и абразивной обработке.

Наибольшее распространение получили водосодержащие эмульсии, которые состоят из воды с мельчайшими капельками масла. Применение воды в качестве основного ингредиента уменьшает стоимость СОЖ и повышает её способность отводить тепло, т.к. вода по сравнению с маслом имеет большую теплопроводность, а теплоёмкость её тоже достаточно высока. Капельки масла оказывают антифрикционное действие, увеличивают проникающую способность, уменьшают коррозию приспособления и станка. Для уменьшения коррозии применяются также специальные присадки (ингибиторы ржавчины).

Масляные эмульсии изготавливают на основе концентрата, называемого эмульсолем, который состоит из масляной основы, эмульгатора, а также большого числа противоизносных, противозадирных и других присадок. Масляная основа **эмульсола** представляет собой смесь различных минеральных масел, например, индустриального, объемом до 70...85%. Эмульгаторы предотвращают слипание капель масла и играют роль смазочных веществ и ингибиторов (замедлителей) коррозии.

В качестве ингибиторов коррозии используют кальцинированную соду, тринатрий фосфат и др., содержание которых составляет 0,5...5,0%.

При резании прирезцовая поверхность стружки и контактирующая с ней поверхность инструмента свободны от загрязнений. Эти ювенильные поверхности активно реагируют друг с другом, схватываются, чему способствуют высокая температура и нормальная контактная нагрузка. Для уменьшения схватываемости применяются присадки, способствующие адсорбированию на ювенильных поверхностях образующихся химических соединений и появлению защитной плёнки. Эта плёнка также защищает поверхности инструмента от контакта с кислородом воздуха и препятствует окислению.

Для увеличения проникающей способности в СОЖ добавляются вещества, уменьшающие коэффициент поверхностного натяжения жидкости и увеличивающие смачиваемость поверхностей стружки, заготовки в зоне контакта и инструмента. Это приводит и к расклинивающему эффекту, облегчающему стружкообразование.

Специальные вещества вводят в СОЖ и для увеличения пластифицирующего свойства, т.е. облегчения пластического деформирования металла. Это приводит к локализации пластической деформации в тонком поверхностном слое обрабатываемого материала, уменьшает трение между стружкой и инструментом, улучшает качество обработанной поверхности.

Действие даже одной капли СОЖ может сказываться в течении нескольких минут при невысокой скорости резания. Для повышения эффективности на высоких скоростях резания и улучшения завивания или

дробления стружки применяется подача СОЖ в зону резания под небольшим давлением.

Образование паровой подушки уменьшает охлаждающий эффект СОЖ, поэтому желательна её подача струёй с достаточно большим напором.

В некоторых случаях в целях экономии СОЖ она подаётся в зону резания в виде тумана. При испарении СОЖ температура резания существенно снижается, хотя охлаждающий эффект при этом существенно меньше, чем при поливе. Достоинством воздушно-капельной смеси является и меньшее загрязнение станка и приспособления.

В зависимости от характера операции эмульсии изготавливают с разной концентрацией эмульсола – чем больше нагрузки, тем выше должна быть концентрация (от 0,05 до 20,0%). Наиболее распространенными являются *эмульсола* марок ЭТ-2, НГЛ-205, Аквол, Укринол и др.

При лезвийной обработке высоколегированных, жаропрочных и коррозионностойких сталей в водные СОЖ часто вводят полимерные высокомолекулярные соединения. Разработано несколько марок *полимеросодержащих* СОЖ, таких как МХО-60, МХО-65 и др., содержащих кроме обычного эмульсола ЭТ-2 латекс поливинилхлорида, триэтаноламин и др. При их использовании в зоне резания под воздействием температуры и давления происходит разрушение полимера с образованием различных активных продуктов, которые взаимодействуют с обрабатываемым и инструментальными материалами.

Основными компонентами *синтетических* СОЖ являются водорастворимые органические вещества, в основном, поверхностно-активные вещества (ПАВ) при отсутствии в их составе минерального масла. Это прозрачные растворы, обладающие стабильными свойствами.

В состав *полусинтетических* СОЖ входят маловязкие минеральные или синтетические масла, органические жидкости и водорастворимые полимеры. Такие СОЖ называют *микроэмульсиями*, так как они обладают высокой степенью дисперсности (измельчения), увеличивающей их проникающую способность.

Химическую активность и эффективность СОЖ можно увеличить за счет введения в жидкость антифрикционных, противоизносных и противозадирных присадок. В современных СОЖ та или иная присадка начинает эффективно работать при достижении заранее определённого температурного диапазона.

В качестве антифрикционных присадок используют *поверхностно-активные вещества (ПАВ)*, технические масла и жиры, коллоидные дисперсии графита и дисульфида молибдена. Содержание жировых добавок составляет 0,5...0,25% и они способствуют повышенному смачиванию поверхности инструмента и образованию адсорбционных смазывающих пленок, уменьшающих трение при небольших нагрузках и температурах.

В качестве противоизносных присадок, которые снижают износ режущих инструментов за счет образования химических пленок, чаще всего используют фосфорорганические соединения (0,15...5,0%).

В состав противозадирных присадок, предотвращающих схватывание стружки и заготовки с поверхностями инструмента, входят вещества, содержащие серу, хлор, фосфор, йод и др. в количестве от 0,5 до 3 %.

В состав СОЖ часто вводятся антипенные и антитуманные присадки, а для стабилизации СОЖ – антиоксиданты.

Для предотвращения размножения бактерий в СОЖ производится добавка бактерицидных присадок (до 0,05...0,15%).

Масляные (углеводородные) СОЖ состоят из минерального масла, к которому добавляют специальные присадки различного назначения, улучшающие их свойства.

Достоинствами масляных СОЖ являются хорошие смазывающие и антикоррозионные свойства, а недостатками – в 5...8 раз более низкая, чем у водных СОЖ, охлаждающая способность, теплопроводность и теплоемкость, более высокая стоимость и повышенная пожароопасность. Поэтому масляные СОЖ применяют в основном при резании с большими контактными давлением и малым тепловыделением, требующих смазывающего действия СОЖ (резьбонарезание, протягивание, зубонарезание, глубокое сверление).

Чем ниже вязкость масла, тем лучше оно проникает в зону резания и тем выше его моющее и охлаждающее действия.

Эффективность масляных СОЖ также связана с их химической активностью, то есть способностью создавать на трущихся поверхностях смазочные пленки. Последние образуются в результате взаимодействия ювенильных поверхностей инструмента и стружки с химически активными молекулами, например, кислорода, йода, хлора и др. Эти пленки уменьшают силы трения, а также адгезионный и диффузионный износы режущего клина.

Основным компонентом масляных СОЖ являются масла: минеральные (70...90%), индустриальные (И-5А, И-20А) и авиационные (МС-8, МС-14 и др.). В качестве дополнительных компонентов применяют технические растительные масла (рапсовое, касторовое, подсолнечное и др.) и в малых количествах технические животные жиры, которые в основном используются для получения олеиновой кислоты. Наиболее часто используются масляные СОЖ серий МР, ОСМ и ЛЗ.

Для уменьшения номенклатуры масел иногда применяют **многофункциональные** СОТС, которые представляют собой масла, использующиеся в гидросистемах, для смазки оборудования и как СОЖ при резании. Иногда в их состав включается раствор для очистки заготовок. В результате их использования детали после лезвийной обработки остаются совершенно чистыми, а гидросистеме не угрожает попадание воды..

В некоторых случаях в качестве СОЖ могут применяться даже **сжиженные газы**, например, азот, который безвреден, но в связи с низкой температурой существенно уменьшает температуру резания и защищает инструмент от окисления, образуя при своём испарении защитную атмосферу вокруг инструмента.

Некоторые жидкости существенно улучшают качество обработки, как, например, четырёххлористый углерод CCl_4 . Он предотвращает появление нароста, облегчает стружкообразование, но при нагреве происходит выделение газа фосгена, что ограничивает его применение только в научных исследованиях с большой осторожностью. Некоторые СОТС могут быть использованы только при защиты органов дыхания и глаз с помощью противогаза, а иногда при работе в ОЗК.

При обработке труднообрабатываемых материалов могут быть использованы **расплавы лёгкоплавких металлов**, таких, как эвтектика олово-цинк, что позволяет проводить обработку высокопрочных материалов, не поддающихся резанию с другими СОТС. Однако необходимость нагрева металлов ограничивает применение таких СОТС.

При обработке труднообрабатываемых материалов, например, при сверлении хромоникелевой стали 18Х2Н4ВА (*HRC 36-40*), могут быть использованы **суспензии** – это взвеси мелкодисперсного порошка (5...15%) в вододисперсионной, масляной или иной жидкой среде. При попадании частиц порошка в зону резания они могут даже расплавляться после выпаривания жидкой составляющей. Наиболее ярко преимущества суспензионных СОТС проявляется при невысоких скоростях резания (5...10 м/мин).

К пластичным (пастам) смазочным веществам относятся густые мажеобразные продукты, занимающие по консистенции промежуточное положение между твердыми и жидкими смазочными веществами. Их получают загущением минеральных и синтетических масел. Применяют в основном четыре вида загустителей: мыльные, углеводородные, неорганические и органические.

Пластичные смазки лучше жидких удерживаются на поверхностях при тяжелых режимах резания и трения, но используются в основном при обработке давлением. При резании они применяются весьма ограничено из-за трудностей введения в зону резания, невозможностью сбора, очистки и повторного использования. Поэтому пластичные смазки применяют в основном на ручных операциях с низкими скоростями резания путем периодического смазывания инструмента кистью, шприцами и т.п., например, при нарезании резьбы метчиками и плашками, разворачивании, полировании и др.

Капсулированные СОТС представляют собой мелкие (от нескольких микрометров до 3 мм) капсулы из желатина и т.п. с СОТС, как жидких, так и пластичных, и твердых. Для улучшения смазочного действия СОТС в их состав в качестве присадок вводят трибоактивные (от греч. *tribos* – трение) элементы (сера, фосфор, йод). Для придания капсулам направленного движения в сторону режущей кромки инструмента часто в их оболочку вводят магнетит Fe_3O_4 . Действующая магнитная сила всегда направлена в сторону пространственной неоднородности магнитного поля, которую при резании представляет режущая кромка инструмента. При определенном механическом или термическом воздействии путем диффузии сквозь оболочку капсулы СОТС высвобождается и попадает на поверхности трения. Капсулированные СОТС позволяют значительно упростить их утилизацию и сократить расход.

К газообразным СОТС относятся активные (воздух, азот, двуокись углерода) и инертные газы (азот, аргон); пары поверхностно-активных веществ, распыленные жидкости. Наиболее дешёвым и доступным газообразным СОТС является воздух. Охлаждение воздушной струёй не требует специального оборудования (на производстве практически всегда имеется компрессор для подачи сжатого воздуха к механизированным приспособлениям), способствует завиванию и дроблению сливной стружки, не загрязняет стружку, но от этого вида охлаждения часто отказываются из-

за сильного шума.

В некоторых случаях применение СОТС приводит к уменьшению стойкости. Чаще всего это происходит при черновой обработке. В большинстве случаев это связано с уменьшением нароста или даже полным его исчезновением. Нарост защищает и переднюю поверхность у режущей кромки от непосредственного соприкосновения с быстро движущейся стружкой, и заднюю поверхность, выступая относительно режущей кромки. В таких случаях в СОТС не добавляют антифрикционные присадки и масло, чтобы оставалось лишь охлаждающее действие СОЖ, хотя это уменьшает противозадирный эффект.

При снятии тонких стружек часто полностью отказываются от применения СОТС, т.к. даже малое округление режущей кромки, связанное с зернистым строением инструментального материала, приводит к вдавливанию тонкого слоя обрабатываемого материала на поверхности среза под заднюю поверхность. Стружка при этом не образуется, особенно в период постепенного врезания.

Этот эффект нами наблюдался при работе отрезного резца, смазанного пастой из ПАВ, главное назначение которой было снизить коэффициент трения и препятствовать образованию нароста. При врезании резец двигался радиальном направлении, но стружка не образовывалась. Осмотр резца через несколько секунд показал, что произошёл огромный износ по задней поверхности: инструментальный материал был просто размазан по поверхности заготовки в зоне контакта. Благодаря антифрикционному эффекту ПАВ сила трения в зоне контакта, а значит и температура, были малы даже при большой радиальной составляющей силы резания. Поэтому не наблюдался существенный нагрев резца, и не было даже подозрений, что происходит катастрофический износ инструмента.

При строгании толщина среза при врезании сразу большая, поэтому антифрикционный эффект на стружкообразование сказывается положительно.

Выбор СОТС определяется физико-механическими свойствами обрабатываемого и инструментального материалов и технологического метода обработки. Для каждого конкретного случая подбирают определенное, наиболее эффективное СОТС.

При **черновой и получистовой обработке**, когда необходимо эффективное охлаждающее действие, применяют водные растворы электролитов и поверхностно-активных веществ, масляные эмульсии.

При **чистовой обработке**, когда требуется получить высокое качество обработанной поверхности, основное значение приобретают смазочные свойства СОТС. В этих случаях применяют чистые и активированные минеральные масла и сульфофрезол. При чистовой обработке с высокими скоростями резания рекомендуется применять эмульсии с 5—10 %-ным раствором эмульсола.

При **черновой обработке хрупких материалов** (чугунов, бронзы), когда образуется стружка надлома, а также при прерывистой обработке заготовок твердосплавным инструментом в качестве СОТС применяют газы: сжатый воздух, углекислоту. Газ охлаждает зону резания и одновременно

удаляет стружку в специальные стружкосборники. Конкретные рекомендации по правильному выбору СОЖ при различных видах обработки конструкционных материалов даны в работе.

Эффективность действия СОЖ в значительной степени зависит *от способа подвода* их в зону резания. Наиболее распространенным способом подачи СОЖ является *полив свободной струей* (см. рис. 5.5, а). Этот метод подачи жидкости в зону резания малоэффективен и обладает следующими недостатками: большой расход жидкости (от 10 до 16 л/мин), разбрызгивание жидкости, слабое смазочное действие.

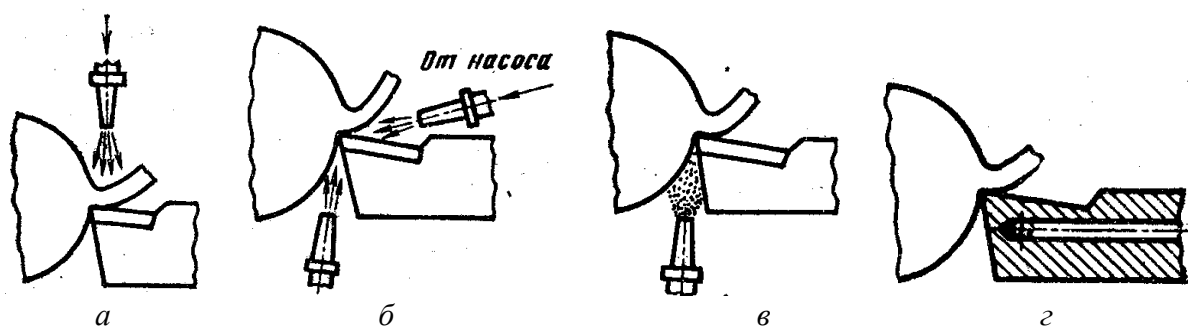


Рис. 5.5. Способы подвода СОЖ в зону резания:
а - полив свободной струей; б - струйное охлаждение; в - охлаждение распыленной жидкостью; г - внутреннее охлаждение резца

Более эффективным является *высоконапорное охлаждение* (см. рис. 5.5, б). Жидкость подаётся под давлением 1,5...2,0 МПа со стороны задней и (или) передней поверхности инструмента через отверстие малого диаметра 0,3...0,5 мм с высокой скоростью струи (40...50 м/с). При этом способе расход жидкости меньше, чем при поливе, и составляет примерно 0,5 л/мин. В результате высокого давления частицы жидкости интенсивнее проникают в микротрещины и зазоры, быстрее превращаются в пар и охлаждают нагретые поверхности. Однако высоконапорное струйное охлаждение имеет и недостатки: необходимость применения насосов; сильное разбрызгивание жидкости, требующее применения специальных защитных устройств; необходимость тщательной очистки жидкости; высокий уровень шума.

В некоторых случаях, например при глубоком сверлении, жидкость под давлением 2,0...2,5 МПа подают в зону резания по каналам, сделанным внутри инструмента, или по трубкам, вмонтированным в инструмент. В этом случае охлаждаются инструмент и зона резания и одновременно вымывается стружка.

Исследования, выполненные Б.М. Орловым при точении сталей, показали, что более эффективным является подвод СОЖ напорной струей со стороны задней поверхности резца. При этом подача воды по сравнению с резанием без применения СОЖ снижает температуру резания в зоне активного наростообразования ($v < 60$ м/мин) на 400°C, эмульсии – на 200°C, а масляной СОЖ - на 100°C. За зоной наростообразования ($v > 60$ м/мин) снижение температуры находится в пределах 50...100°C. Если СОЖ подается поливом, то даже такая сильная охлаждающая среда, как вода, снижает

температуру очень слабо, примерно на 50...80°С. Исследования также показали, что СОЖ не устраняет наростообразование, а наоборот способствует расширению зоны его образования на бóльшие скорости резания. Уменьшение шероховатости, глубины и степени наклепа в области наростообразования объясняется стабилизацией формы нароста и увеличением фактического переднего угла при напорной подаче СОЖ.

Для реализации «сухой» обработки производится охлаждение *распыленной жидкостью* с помощью инжекторной установки. Распыленная СОЖ подаётся в зону резания чаще всего со стороны задней поверхности инструмента (рис. 5.5, в). При выходе из сопла воздушно-жидкостная смесь расширяется, вследствие чего происходит понижение ее температуры на 10...12 °С. При попадании на нагретые поверхности заготовки и инструмента частицы жидкости мгновенно испаряются и отводят большое количество теплоты. При небольшом расходе жидкости (20...400 г/ч) полно и эффективно используются ее смазывающие и охлаждающие свойства. Стойкость инструмента при охлаждении распыленной жидкостью по сравнению со стойкостью при охлаждении свободной струей значительно увеличивается. Для защиты оператора от воздействия тумана на станке устанавливаются отсасывающие устройства.

Иногда применяется *внутреннее охлаждение инструментов* (при сверлении или точении хрупких материалов или когда недопустимо загрязнение стружки, предназначенной для её дальнейшей переработки). Для этого в инструменте делают каналы, по которым прокачиваются сильно охлаждённые жидкости или сжиженный газ (рис. 5.5, з).

5.3. Обрабатываемость материалов

Обрабатываемость материалов резанием - это способность материалов поддаваться обработке резанием. Под этим термином понимается комплекс свойств *обрабатываемого* материала, обеспечивающих достижение следующих технологических показателей:

- 1) скорость резания v_T при заданной стойкости T (например, v_{60} , т.е. скорость резания при стойкости $T=60$ мин);
- 2) качество обработанной поверхности (шероховатость, наклёп, остаточные напряжения);
- 3) сила резания и потребляемая мощность;
- 4) форма стружки, наибольшая длина, ее транспортабельность и т.д.

Разные критерии обрабатываемости для одного и того же материала могут давать противоположные результаты. Например, при обработке закалённой стали 45 по скорости резания она хуже, а по шероховатости – лучше по сравнению с обрабатываемостью отожженной той же самой стали.

Обрабатываемость зависит не только от химического состава обрабатываемого материала, его механических и теплофизических свойств, но и вида обработки резанием, конструкции инструмента, инструментального материала, режима резания, применяемых СОТС и других факторов.

Результаты исследований обрабатываемости используются для

назначения режимов резания, совершенствования химического состава и улучшения свойств не только обрабатываемых, но и инструментальных материалов.

В производстве наиболее часто используют критерий v_T - скорость резания при заданной стойкости. По нему определяется производительность обработки данного материала и необходимые затраты для осуществления процесса резания.

Для сравнения обрабатываемости разных материалов часто используют **коэффициент обрабатываемости**, под которым понимают отношение

$$K_{об} = \frac{v_{60}^A}{v_{60}^B}, \quad (5.2)$$

где v_{60}^A - скорость резания исследуемого материала А при $T=60$ мин; v_{60}^B - скорость резания эталонного материала Б при $T=60$ мин.

За эталон обычно принимают сталь 45 ($\sigma_b=650$ МПа, $HB 180$) и поэтому для неё коэффициент обрабатываемости $K_{об}=1$. При полустачковом точении стали 45 твердосплавным резцом $v_{60}=135$ м/мин, а резцом из быстрорежущей стали Р18 при использовании СОЖ - $v_{60}=75$ м/мин.

Чем выше значение коэффициента обрабатываемости, тем лучше обрабатываемость материала. По этому коэффициенту для разных металлов можно рассчитать v_{60} . Например, при точении твердосплавным резцом аустенитной нержавеющей стали $K_{об}=0,5$ [31] и тогда для неё $v_{60}=135 \cdot 0,5=67,5$ м/мин. При точении этой же стали резцом из стали Р18 $K_{об}=0,3$, а $v_{60}=75 \cdot 0,3=22,5$ м/мин.

Для определения коэффициента обрабатываемости материала необходимо экспериментально найти зависимость стойкости от скорости резания.

Для сокращения затрат разработаны различные экспресс-методы оценки обрабатываемости. Рассмотрим простейший из них – метод оценки обрабатываемости по интенсивности износа, предложенный А.С. Кондратовым. Суть метода состоит в том, что заготовку из испытуемого материала обтачивают только одним резцом при постоянной глубине резания и подаче на различных скоростях резания v_i . Для каждой скорости через определенные, чаще всего одинаковые, отрезки времени τ_i замеряют соответствующие этим временам приращения износа по задней поверхности резца Δh_{3i} и оценивают интенсивность износа по формуле

$$U_i = \Delta h_{3i} / \tau_i \quad (5.3)$$

В двойных логарифмических координатах строят зависимость $U = f(v)$, представляющую собой прямую, тангенс угла наклона которой к оси U принимается равным показателю относительной стойкости m в формуле

$$v = \frac{C}{\tau^m}. \quad (5.4)$$

Для нахождения коэффициента C в этой формуле определяют

эквивалентную интенсивность износа за весь период

$$U_{\text{эКВ}} = \frac{\sum \Delta h_{zi}}{\sum \tau_i}. \quad (5.5)$$

По графику $U = f(v)$ находят скорость резания $v_{\text{эКВ}}$, соответствующую эквивалентной интенсивности износа $U_{\text{эКВ}}$. Так как $v_{\text{эКВ}} = C/\tau^m$, то постоянный коэффициент $C = v_{\text{эКВ}} \cdot \tau^m$. Отсюда находят показатель обрабатываемости, подставив значения m и C в уравнение

$$v_{60} = \frac{C}{60^m}. \quad (5.6)$$

Метод А.С. Кондратова даёт хорошую точность при резании твердосплавными резцами и по сравнению с классическим методом определения стойкости, в 6...10 раз сокращает время испытаний.

Используются и другие экспресс-методы оценки обрабатываемости. Для испытаний токарных резцов часто применяется метод торцевой обточки, при котором обтачивается торец диска из обрабатываемого материала при постоянной частоте вращения шпинделя n , при этом обточку начинают от центра с малого диаметра $D_{\text{min}} = 20...30$ мм до наибольшего диаметра D_{max} . Скорость резания при этом возрастает пропорционально диаметру D_i , а поскольку стойкость уменьшается гораздо быстрее, то на определённом диаметре $D_{\text{кр}}$ инструмент изнашивается до заданного предельного значения. При этом методе важно правильно установить частоту вращения шпинделя n : при заниженной частоте инструмент не успеет изнашиваться до предельного значения, а при завышенной износ наступит чересчур быстро.

Аналогично испытания выполняются и при использовании метода конического точения [8].

По обрабатываемости материалы делятся на 4 группы, от I до IV: чем меньше цифра, тем лучше обрабатываемость.

Рассмотрим обрабатываемость и способы её улучшения для наиболее распространённых материалов.

1. Углеродистые и легированные конструкционные стали применяют для изготовления деталей машин. Они отличаются химическим составом, физико-механическими и теплофизическими свойствами, которые отражаются на их обрабатываемости.

По химическому составу и содержанию легирующих элементов эти стали можно условно разделить на следующие подгруппы: углеродистые стали (стали 20, 40, 45 и др., с содержанием углерода до 0,65%); низколегированные хромистые, хромоникелевые и другие стали, содержащие углерод в пределах $C=0,2...0,5\%$ и легирующие элементы (хром, никель, марганец, кремний, вольфрам и молибден), суммарное количество которых достигает 3%; углеродистые инструментальные стали ($C=0,8...1,2\%$); высоколегированные стали с высоким содержанием легирующих элементов.

Обрабатываемость всех углеродистых сталей зависит в основном от содержания в них углерода, с увеличением которого твердость сталей повышается, а скорость резания v_{60} снижается.

У среднеуглеродистых и низколегированных сталей ($C=0,35...0,55\%$) коэффициент обрабатываемости колеблется в пределах $K_{об} = 0,7...1,0$. Введение в эти стали в небольшом количестве ($1...2\%$) легирующих элементов обеспечивает повышение прочности и других механических свойств (предела текучести, относительного удлинения) при небольшом снижении коэффициента обрабатываемости. Обрабатываемость этих сталей может быть улучшена за счет изменения структуры методами дополнительной термообработки (отжиг, нормализация, закалка с последующим отпуском).

Наилучшей обрабатываемостью обладают стали со структурой перлит (феррит+цементит). У пластинчатого перлита цементит, обладающий повышенной твердостью, имеет форму пластин и феррит в виде сетки. Путем термообработки пластинчатый перлит может быть превращен в зернистый перлит с цементитом в виде мелких глобулярных (округлых) зерен. При этом обрабатываемость такой стали существенно улучшается. Однако с увеличением размеров глобулей шероховатость обработанной поверхности ухудшается. Для чистовой операции лучшую обрабатываемость по этому критерию обеспечивает пластинчатый перлит.

Чтобы максимально улучшить обрабатываемость высокоуглеродистых сталей ($C>0,6\%$), они должны иметь структуру зернистого перлита, обладающего меньшей истирающей способностью, даже если это ухудшает качество поверхности.

В *инструментальных высокоуглеродистых* ($C = 0,8...1,2\%$), *легированных и быстрорежущих сталях* увеличение легирующих элементов всегда приводит к ухудшению обрабатываемости (до $K_{об}=0,6$) и росту шероховатости обработанной поверхности вследствие образования твердых карбидов. При этом, как правило, повышается предел прочности σ_B при растяжении и твердость сталей, возрастает сопротивление сталей обработке резанием. Наихудшую обрабатываемость имеют структуры: сорбитообразный перлит, сорбит и троостит после закалки и отпуска. Наилучшей по обрабатываемости структурой инструментальных сталей является зернистый перлит с равномерно распределенными мелкими карбидами после тщательной проковки и сфероидизирующего отжига.

На обрабатываемость сталей оказывают влияние также некоторые металлургические факторы, в частности способы литья и прокатки. Например, конверторные низкоуглеродистые стали обрабатываются лучше, чем выплавленные в мартеновских и электрических печах, так как содержат больше серы и фосфора, хотя это и ухудшает их прочностные свойства. Холоднокатаные стали, содержащие углерод до $0,3\%$, обрабатываются лучше, чем горячекатаные, а при содержании углерода $C>0,4\%$ - хуже.

Самой худшей обрабатываемостью обладают высоколегированные коррозионностойкие и жаростойкие стали, так как содержат в больших количествах легирующие элементы: хром ($15...18\%$), никель ($8...11\%$), марганец ($1...2\%$). Иногда в них входят в небольших количествах титан, вольфрам, молибден, ниобий при некотором снижении содержания хрома и никеля. Снижение обрабатываемости этих сталей связано с изменением их механических и теплофизических свойств. Например, жаростойкие (окалиностойкие) и жаропрочные стали аустенитного класса

отличаются высокой упрочняемостью при резании. Некоторые марки сталей в процессе пластического деформирования склонны к структурным превращениям, заключающимся в переходе аустенита в мартенсит. Эти стали, как правило, имеют низкую теплопроводность, что затрудняет отвод теплоты из зоны резания в стружку и заготовку. При этом повышается температура резания и интенсивность износа инструментов.

Присутствие в ряде сталей и сплавов карбидов и интерметаллидов, имеющих высокую твердость, вызывает повышенный абразивный износ инструментов и особенно инструментов из быстрорежущей стали. Для обработки этих сталей чаще всего используют инструментальные материалы высокой прочности, такие как, например, однокарбидные твердые сплавы, обладающие к тому же высокой износостойкостью.

Для некоторых марок сталей обрабатываемость улучшают правильно подобранными режимами термообработки (отжиг, закалка).

В целом же в зависимости от химического состава у высоколегированных сталей коэффициент обрабатываемости снижается от $K_{об} = 0,65$ (хромистые, коррозионностойкие стали) до $K_{об} = 0,3$ (хромоникелевые жаростойкие стали).

Еще меньшую обрабатываемость имеют жаропрочные сплавы на никелевой основе с содержанием никеля до 60...80%, у них $K_{об} = 0,16...0,04$ (сплавы марок ЖС6К, ЖСЗДК).

Наилучшую обрабатываемость имеют низкоуглеродистые ($C < 0,2\%$) - автоматные стали, применяемые для изготовления деталей на станках-автоматах. Для улучшения обрабатываемости в них вводят небольшие добавки серы (0,2...0,3%), фосфора (до 0,15%) и свинца (0,15...0,3%), которые снижают коэффициент трения и интенсивность износа инструмента (сера), а также улучшают дробление стружки (свинец, фосфор). За счет этого коэффициент обрабатываемости таких сталей увеличился до $K_{об} = 1,5...2,1$, производительность обработки возросла в 2 раза, уменьшились силы резания и шероховатость обработанной поверхности. Однако при этом механические свойства автоматных сталей несколько снизились.

2. **Чугуны** применяют, главным образом, для изготовления корпусных деталей машин методом литья из-за хорошей жидкотекучести, низкой стоимости материала и высокой технологичности. Чугуны относятся к материалам с относительно низкой прочностью, у них практически нет пластических деформаций в процессе образования стружки. Поэтому силы резания и затрачиваемая при этом мощность ниже, чем при обработке сталей, а из-за малой пластичности чугунов образуется элементная, реже суставчатая стружка, снижающая площадь ее контакта с передней поверхностью инструмента. В результате контактные напряжения возрастают и концентрируются около режущей кромки. Поэтому при обработке чугунов следует применять более прочные однокарбидные сплавы группы ВК.

Температура резания при обработке чугунов ниже, чем при обработке сталей той же твердости, обрабатываемость их также ниже. Это связано главным образом с высоким абразивным действием весьма твердого цементита, что интенсифицирует износ, особенно у инструментов из быстрорежущих сталей.

Различают белые, серые, ковкие и высокопрочные чугуны. Три

последних чугуна имеют следующие основы, оказывающие определяющее влияние на их обрабатываемость: ферритная; ферритно-перлитная и перлитная.

Из всей номенклатуры чугунов наилучшую обрабатываемость по критерию v_{60} имеют ферритные чугуны, содержащие феррит и графит. Обрабатываемость перлитных ковких и сверхпрочных чугунов, содержащих перлит и графит, ухудшается. Самую низкую обрабатываемость имеют белые чугуны, содержащие перлит, цементит и карбиды легирующих элементов (хром, ванадий, молибден). Например, прокатные валки из отбеленного чугуна обрабатывают твердосплавными резцами со скоростью резания $v=3...10$ м/мин. Однако наилучшие результаты при чистовой обработке таких валков дают инструменты оснащенные эльбором.

Высокопрочные чугуны с шаровидной формой графита обладают лучшей обрабатываемостью, чем чугуны с пластинчатым графитом. Это достигается за счет применения для них в отличие от серых чугунов дополнительной термообработки (отжиг или высокий отпуск).

Для отдельных групп чугунов обрабатываемость связывают с их твердостью

$$v_{60} = \frac{c}{\text{НВ}^n}, \quad (5.7)$$

где c - коэффициент; НВ - твердость по Бринеллю; n - показатель степени, зависящий от формы графита, $n=1,5$ - для шаровидного графита; $n=2,2$ - для пластинчатого графита [22].

3. **Титановые сплавы** обладают высокими физико-механическими свойствами и широко применяются в авиа- и ракетостроении. Их условно можно разделить на следующие основные группы: 1) повышенной пластичности ($\sigma_b < 600$ Н/мм²); 2) средней прочности ($\sigma_b = 600$ Н/мм²); 3) высокой прочности ($\sigma_b = 1000...1500$ Н/мм²); 4) жаропрочные ($\sigma_b = 450...1250$ Н/мм²). При этом, чем выше прочность титанового сплава, тем хуже его обрабатываемость.

В целом титановые сплавы при довольно высокой прочности обладают пониженной пластичностью, обусловленной наличием в их составе алюминия. Теплопроводность титановых сплавов в 17 раз меньше, чем алюминия, а при резании они склонны к упрочнению. Снижение пластичности связано со свойством титана интенсивно поглощать из атмосферы водород, кислород и азот. При этом относительное удлинение после разрыва $\delta \leq 25\%$. Срезаемая стружка имеет малую усадку, а ширина площадки контакта в 1,5...2,0 раза меньше, чем при резании углеродистых сталей. По этой причине нормальные контактные напряжения высоки, хотя силы резания примерно такие же, как и при резании стали. Из-за плохой теплопроводности возникает высокая температура в области вершины режущего клина (в 2 раза большая, чем у стали 40), что приводит к пластической деформации вершины и опусканию режущей кромки.

По обрабатываемости титановые сплавы существенно уступают конструкционным сталям, за исключением титанового сплава ВТ1-0 (практически чистый титан). В зависимости от марки сплава коэффициент обрабатываемости титановых сплавов колеблется в пределах от $K_{об} = 0,8$

(сплав ОТ4-1) до $K_{об}=0,45$ (сплавы ВТ14, ВТ1 и др.). Поэтому для резания титановых сплавов используют инструментальные материалы высокой прочности: быстрорежущие стали повышенной теплостойкости и однокарбидные твердые сплавы группы ВК. Сплавы, содержащие карбиды титана, для обработки титановых сплавов непригодны из-за химического сродства с обрабатываемым материалом.

4. **Цветные металлы и сплавы на основе меди и алюминия** обладают наилучшей обрабатываемостью по сравнению со сталями. Так, при резании твердосплавными резцами меди марок М1...М3 $K_{об}=4...6$, а сплавов алюминия марок АЛ2, АЛ4, АМ3 - $K_{об}=10...12$ [8]. Это объясняется низкой прочностью и твердостью этих металлов и их высокой теплопроводностью. Поэтому температура резания низка, а интенсивность износа мала.

Из-за высокой пластичности меди при ее обработке на низких скоростях силы резания достаточно большие, так как усадка стружки очень велика ($K=6...8$ и более). По этой причине чистая медь с высокой электропроводностью считается труднообрабатываемым материалом и особенно при глубоком сверлении, когда имеет место высокая шероховатость обработанной поверхности и плохой стружкоотвод.

Лучшей обрабатываемостью за счет добавки свинца (до 2...3%) обладают латуни и свинцовистые бронзы. Поэтому, например, латуни широко применяют для изготовления деталей на станках-автоматах.

При резании алюминиевых сплавов из-за высокой стойкости инструментов скорость резания твердосплавными инструментами достигает 600 м/мин, а инструментами из быстрорежущей стали - 300 м/мин. Только при резании некоторых наиболее прочных алюминиевых сплавов, например силиконов, содержащих 17...20 % кремния, даже при использовании твердосплавных инструментов приходится снижать скорость резания почти до 100 м/мин из-за высокой твердости частиц кремния ($HV >400$), вызывающих абразивный износ инструмента [8].

5.4. Порядок выбора и расчёта режимов резания при точении

При назначении элементов режимов резания учитывается характер обработки, тип и размеры инструмента, материал его режущей части, материал и состояние заготовки, тип и состояние оборудования. Элементы режима резания обычно устанавливаются в порядке, указанном ниже.

Прежде всего уточняется вид обработки, например, наружное продольное черновое точение цилиндрической поверхности $\varnothing 31,1h11$, требуемая шероховатость поверхности $Ra \leq 10$ мкм. Уточняется обрабатываемый материал (например, сталь 45), его предел прочности и твердость (например, для нашей заготовки $\sigma_B=750$ МПа, $HV 180$), состояние обрабатываемой поверхности (например, пруток горячекатаный, без окалины и прерывистых поверхностей), её диаметр (например, $\varnothing 34,8h14$).

По этим сведениям выбирается инструментальный материал и вид инструмента. В нашем примере наиболее предпочтителен резец проходной с напайной режущей пластиной Т15К6.

Определяется **максимальная** глубина резания

$$t_{max} = (d_{1max} - d_{2min})/2, \text{ мм} \quad (5.8)$$

где: d_{1max} – максимальный диаметр обрабатываемой поверхности; d_{2min} – минимальный диаметр обработанной поверхности.

В расчёт рекомендуется брать максимальную глубину резания в связи с последующим расчётом требуемой мощности станка. Если расчёт будет выполняться по средней глубине резания t_{cp} , то при маловероятной, но возможной, ситуации совпадения крайних предельных размерах d_1 и d_2 может оказаться, что мощности не хватит для вращения шпинделя, что приведёт к поломке резца.

Например, $d_1 = 34,8h14(-0,62)$, $d_2 = 31,1h11(-0,19)$, тогда

$$t_{max} = (d_{1max} - d_{2min})/2 = (34,8 - 30,91)/2 \approx 1,95 \text{ мм}$$

При черновой обработке удаляется наибольший возможный припуск. Если половина припуска, т.е. t_{max} , для токарной обработки более 4 мм, то припуск удаляется за несколько проходов во избежания появления вибрации. В этом случае количество проходов i рассчитывается по формуле

$$i = (d_{1max} - d_{2min})/2 \cdot t_{max}, \quad (5.9)$$

где: t_{max} – максимальная глубина резания.

При черновой обработке t_{max} не должна превышать **предельно допустимую** максимальную глубину резания $[t_{max}]$ исходя из диаметра и жёсткости заготовки, размеров державки и предполагаемой мощности станка. Если рассчитанное количество проходов более одного, то на первых проходах устанавливают глубину резания равной предельно допустимой $[t_{max}]$, а на последнем – остаточную ($t_{\text{посл прохода}}$), заведомо меньшую, чем на предыдущих проходах. с тем, чтобы на последнем проходе силы резания, а значит и упругая деформация системы СПИД, были меньше для повышения точности обработки.

Например, $[t_{max}] = 4 \text{ мм}$ [2, стр. 266], тогда окончательно принимаем $t_{max} = 1,95 \text{ мм}$, $i = 1$.

По рассчитанной и принятой глубине резания выбирается подача S по рекомендациям [2, табл. 11]. При черновой обработке выбирают лимитирующую (меньшую) подачу, учитывая **три параметра**: а) жёсткость обрабатываемой заготовки (или просто её диаметра) и размер державки резца; б) прочность (толщину) режущей пластинки; в) требуемую шероховатость обработанной поверхности Ra (Rz) и радиус при вершине резца r .

Выбираем резец по рекомендациям [1, стр.438]. Резец - проходной прямой с режущей пластиной из твердого сплава Т15К6: 2100-01 17-Т15К6.

Размер державки резца: 16×25 мм. По прочности державка выдержит большую подачу при сравнительно небольшой глубине резания $t = 1,95 \text{ мм}$. Поэтому окончательно выбираем подачу исходя из требуемой шероховатости поверхности для черновой обработки ($Rz \leq 40 \text{ мкм}$) и радиуса при вершине $r = 2,5 \text{ мм}$ (при черновой обработке радиус при вершине можно взять большей, т.к. высокая точность не требуется и отжатие резца и детали при большей силе P_y не играет решающей роли как при чистовой обработке). По справочнику определяем подачу (наименьшую, учитывая три вышеуказанных параметра) $S = 0,5 \text{ мм/об}$.

Далее приступают к расчёту или выбору скорости резания.

Скорость резания V , м/мин, можно определить несколькими методами:

- 1) расчетным по формуле;
- 2) табличным с использованием уточняющих коэффициентов;
- 3) на основе эмпирических данных (применяемых на предприятии для соответствующих обрабатываемых и режущих материалов, геометрии инструмента и т.п.

Воспользуемся расчетом по формуле. При наружном продольном и поперечном точении и растачивании скорость резания V , м/мин, рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{C_V}{(T^m \cdot t^x \cdot s^y)} \cdot K_V, \quad (5.10)$$

где: T – стойкость инструмента (период работы инструмента до затупления). При черновой обработке в мелкосерийном производстве обычно $T=60$ мин. [1, стр. 415].

Значения коэффициента C_V и показателей степени приведены в табл.17 [2, стр. 422].

Для рассматриваемого примера наибольшая глубина резания $t_{max}=1,95$ мм (иногда расчёт ведётся по средней глубине резания $t = t_{cp} = (t_{max} - t_{min})/2$).

Коэффициенты и показатели степеней определяем из табл. 17 [2]:

$$C_V=350; x=0,15; y=0,35; m=0.20.$$

K_V - поправочный коэффициент, для получения действительного значения скорости резания.

$$K_V = K_{Mv} \times K_{Iv} \times K_{Iv} \times K_{\varphi v} \times K_{\varphi Iv} \times K_{Rv} \times K_{Qv} \times K_{Ov}, \quad (5.11)$$

где $K_{Mv} = K_T \cdot (750/\sigma_s)^{nv}$ - коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала (прочности) на скорость резания. Для стали 45 предел прочности на растяжение $\sigma_s=750$ МПа, $K_T=1$, $nv=1$ [2, стр. 261], поэтому $K_{Mv} = 1 \cdot (750/750)^1 = 1$;

K_{Iv} - коэффициент, учитывающий материал режущей части. Для режущей пластинки из твердого сплава Т15К6 $K_{Iv} = 1$ [2, табл.6];

$K_{Iv} = 0,9$ - коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки [2, табл.15, стр263];

$K_{\varphi v} = 1,0$ - коэффициент, учитывающий геометрические параметры резца (главный угол в плане $\varphi=45^\circ$) [1, табл.18, стр271];;

$K_{\varphi Iv} = 1$ - коэффициент, учитывающий геометрические параметры резца (вспомогательный угол в плане $\varphi_I=10^\circ$);

$K_{Rv} = 1$ - коэффициент, учитывающий геометрические параметры резца (радиус при вершине резца R);

$K_{Qv} = 1,12$ – коэффициент, учитывающий поперечное сечение державки табл.16 [1];

$K_{Ov} = 1$ - коэффициент, учитывающий вид обработки.

$$K_V = 1 \times 1 \times 0,9 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1,12 \times 1 = 1,0$$

$$V = \frac{C_V}{(T^m \cdot t^x \cdot s^y)} \cdot K_V = \frac{350}{(60^{0,2} \cdot 1,95^{0,15} \cdot 0,5^{0,35})} \cdot 1 = 178 \text{ м/мин.}$$

После расчёта скорости резания рассчитывается частота вращения шпинделя $n_{\text{расч}} = 1000 \cdot V / \pi \cdot d$, об/мин. Обычно за диаметр d принимается максимальный, но иногда и номинальный диаметр **обрабатываемой** поверхности. Номинальный диаметр используется потому, что разница в несколько десятых долей миллиметра несущественно изменяет $n_{\text{расч}}$.

Для нашего примера

$$n_{\text{расч}} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_{\text{max}}} = \frac{1000 \cdot 178}{\pi \cdot 35} = 1620 \text{ об/мин,}$$

где d_{max} – наибольший диаметр обрабатываемой поверхности, мм.

Рассчитанная частота вращения округляется до ближайшего *меньшего* паспортного значения $n_{\text{пасп}}$ (или принятого значения $n_{\text{пр}}$), предполагаемого станка. Если округлить до ближайшего *большого* паспортного значения, то скорость может оказаться слишком высокой, что может привести к существенному уменьшению стойкости инструмента, особенно после точки перелома (см. рис. 5.3, график 2, точка B_2).

В техническом паспорте предполагаемого станка в нашем примере находим ближайшее *меньшее* число оборотов шпинделя $n_{\text{пр}} = 1500$ об/мин. Рассчитываем действительную (уточненную) скорость резания при принятом числе оборотов шпинделя:

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n_{\text{пр}}}{1000}, \text{ м/мин.} \quad (5.12)$$

В нашем примере действительная скорость резания V_δ :

$$V_\delta = \frac{\pi \cdot 35 \cdot 1500}{1000} = 164,8 \text{ м/мин.}$$

Для расчёта **мощности** станка необходимо рассчитать составляющую силы резания P_z . Для наружного продольного точения

$$P_{z, y, x} = C_P \times t^x \times s^y \times V^n \times K_P, \text{ [Н]}, \quad (5.13)$$

где C_P – коэффициент, зависящий от обрабатываемого и режущего материала; K_P – поправочный коэффициент.

$$K_P = K_{M_p} \times K_{\phi_p} \times K_{\gamma_p} \times K_{\lambda_p} \times K_{R_p}, \quad (5.14)$$

где K_{M_p} – коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала (прочности) на силу резания. Для стали 45 предел прочности на растяжение $\sigma_s = 750 \text{ МПа}$, поэтому $K_{M_p} = 1$ [1, табл. 45];

K_{ϕ_p} – коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане ϕ на силу резания;

K_{γ_p} – коэффициент, учитывающий влияние главного переднего угла в главной

секущей плоскости γ на силу резания;

$K_{\lambda p}$ - коэффициент, учитывающий влияние угла наклона главной режущей кромки λ на силу резания;

K_{Rp} - коэффициент, учитывающий влияние радиуса при вершине резца R на силу резания;

Для рассматриваемого черногого точения наружной поверхности $\text{Ø}31,1h11$ наибольшая глубина резания $t = t_{max} = 1,95$ мм. Коэффициенты и показатели степеней, найденные в табл. 22 [1], заносим в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Расчет составляющих силы резания при черновой обточке диаметра $\text{Ø}31,1h11$

Компонента	C_P	x	y	n	K_{Mp}	$K_{\phi p}$	$K_{\gamma p}$	$K_{\lambda p}$	K_{Rp}	K_P	$P_{z,y,x}$ Н
P_z	300	1	0,75	-0,15	1	1,0	1,0	1	1	1,0	3478
P_y	243	0,9	0,6	-0,3	1	1,0	1,0	1	1	1,0	618
P_x	339	1	0,5	-0,4	1	1,0	1,0	1	1	1,0	588

$$P_z = 10 \times 300 \times 1,95^1 \times 0,5^{0,75} \times 178^{-0,15} \times 1,0 = 3478 \text{ Н};$$

$$P_y = 10 \times 243 \times 1,95^{0,9} \times 0,5^{0,6} \times 178^{-0,3} \times 1,0 = 618 \text{ Н};$$

$$P_x = 10 \times 339 \times 1,95^1 \times 0,5^{0,5} \times 178^{-0,4} \times 1,0 = 588 \text{ Н};$$

Мощность резания рассчитывается по формуле:

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}, \text{ [кВт]} \quad (5.15)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания (совпадающая по направлению с вектором скорости резания), Н; V – скорость резания, м/мин.

В нашем примере при черновой обточке $\text{Ø}31,1h11$:

$$N_\delta = \frac{3478 \cdot 164,8}{1020 \cdot 60} = 9,3 \text{ кВт.}$$

Рассчитываем требуемую мощность станка

$$N_{ст} = N_\delta \cdot K, \text{ кВт,} \quad (5.16)$$

где K – коэффициент, учитывающий к.п.д. коробки скоростей, потери на коробку подач, увеличение силы резания при износе инструмента. Обычно $K = 1,2 \dots 1,5$.

Для нашего примера $N_{ст} = N_\delta \cdot K = 9,3 \times 1,3 = 12,09 \text{ кВт.}$

По рассчитанной мощности станка окончательно выбирается оборудование. Если предлагаемое оборудование менее мощное чем рассчитанное, то приходится уменьшать частоту вращения шпинделя, что уменьшит скорость резания, а значит и производительность. Если это не помогает, то уменьшают подачу. В исключительных случаях необходимо уменьшать глубину резания, т.к. это вызовет необходимость выполнять обработку за несколько проходов, что ещё больше уменьшит производительность.

Необоснованно увеличенный запас мощности принятого оборудования приведёт к увеличению стоимости оборудования и затрат электроэнергии, требуемой площади для размещения станка, хотя и увеличит

технологические возможности.

При получистовом (по 10...8 качеству) и чистовом (по 7...6 качеству) точении припуск на обработку небольшой ($2z = 0,6...0,1$ мм), поэтому он удаляется за один рабочий ход (проход) с небольшой глубиной резания ($t = 0,3...0,05$ мм). При выборе подачи учитывают требуемую шероховатость поверхности ($Ra = 3,2...0,63$ мкм) и радиус при вершине резца.

Несмотря на большую скорость резания ($V = 250...550$ м/мин), мощность станка требуется небольшая из-за сравнительно малых сил резания, поэтому мощность резания, как правило, не рассчитывается.

При небольшом диаметре заготовки проблемой становится обеспечить требуемую высокую скорость резания, т.к. требуется частота вращения шпинделя более 3000 об/мин. В этом случае приходится ограничиваться наибольшей частотой вращения шпинделя станка, что порой вызывает ухудшение шероховатости поверхности из-за появления нароста.

Раздел 5 (стойкость режущих инструментов и обрабатываемость материалов резанием) – раздел 6 (обработка отверстий мерным инструментом) – раздел 7 (фрез.)

Раздел 6. Фрезерование

6.1. Типы фрезерных станков и основные приспособления

Фрезерование является распространённым и производительным способом обработки деталей, а при обработке деталей, не являющимися телами вращения, это основной способ. Фрезерование может выполняться на двух основных типах станков: горизонтально-фрезерных и вертикально-фрезерных.

Консольные *горизонтально-фрезерные* станки характеризуются горизонтальным расположением шпинделя и наличием у станка трех взаимно перпендикулярных движений – продольного, поперечного и вертикального. Горизонтально-фрезерные станки делятся на две разновидности – простые и универсальные. В универсальных горизонтально-фрезерных станках рабочий стол, помимо указанных перемещений, может еще поворачиваться вокруг вертикальной оси на угол до 45° в каждую сторону. Для установки стола на требуемый угол к оси шпинделя между салазками и рабочим столом имеется поворотная часть, на периферии которой нанесены градусные деления.

На рис. 6.1 показан общий вид консольных горизонтально-фрезерных станков 6P82, 6P82Г, 6P83 и 6P83Г. Основными составными частями станка являются станина 1, шкаф для электрооборудования 2, коробка скоростей 3, механизм управления 4, хобот 5, стол и салазки 6, консоль 7 и коробка подач 8.

Станина станка служит для размещения всех узлов и механизмов станка. Хобот перемещается по верхним направляющим станины и служит для поддержания при помощи серьги конца фрезерной оправки с фрезой. Он может быть закреплен с различным вылетом для получения наибольшей жёсткости станка. Для тяжёлых работ и ещё большего увеличения жесткости крепления хобота применяются две крест на крест расположенные поддержки, которые связывают хобот с консолью. При этом торец хобота должен находиться приблизительно в одной вертикальной плоскости с торцом консоли, к которой поддержки прикручиваются болтами. Серьги

можно перемещать по направляющим хобота и закреплять гайками. Перестановка серег с одного станка на другой не допускается для сохранения высокой точности соосности отверстия серьги с коническими посадочными частями шпинделя.

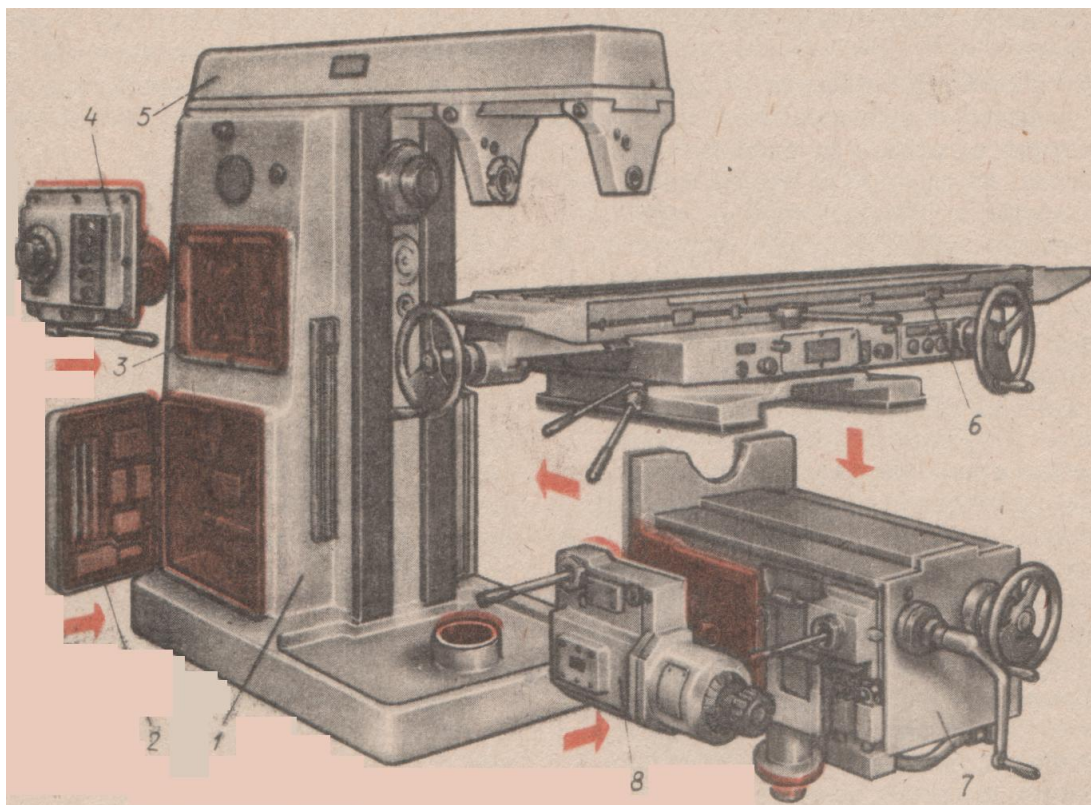


Рис. 6.1. Основные части консольного горизонтально-фрезерного станка

Консоль представляет собой отливку коробчатой формы с вертикальными и горизонтальными направляющими. Перемещение консоли относительно станины происходит по вертикальным направляющим типа ласточкин хвост. По горизонтальным направляющим перемещаются салазки. Консоль закрепляется на направляющих специальными зажимами и является базовым узлом, объединяющим все остальные узлы цепи подач. Консоль поддерживается стойкой, в которой имеется телескопический винт для ее подъема и опускания.

Стол монтируется на направляющих салазок и перемещается по ним в продольном направлении. На столе закрепляются зажимные приспособления и заготовки. Для этой цели на рабочей поверхности стола имеется несколько продольных Т-образных пазов. Салазки являются промежуточным звеном между консолью и столом станка. По верхним направляющим салазок стол перемещается в продольном направлении, а нижняя часть салазок вместе со столом перемещается в поперечном направлении (по верхним направляющим консоли).

Шпиндель фрезерного станка служит для передачи вращения режущему инструменту от главного двигателя через коробку скоростей. От точности вращения шпинделя, его жесткости и виброустойчивости в значительной мере зависит точность обработки.

Коробка скоростей предназначена для сообщения шпинделю станка различной частоты вращения и находится внутри станины. Коробка подач, в отличие от токарных станков, не связана с коробкой скоростей и имеет отдельный электродвигатель. Коробка подач обеспечивает получение рабочих подач и быстрых перемещений стола, салазок и консоли.

Консольные **вертикально-фрезерные** станки характеризуются вертикальным расположением шпинделя, но расположение, назначение и конструкция узлов такое же, как и у горизонтально-фрезерных станков, только нет хобота. Вместо него у станка имеется поворотная головка, которая крепится к горловине станины и может поворачиваться в вертикальной плоскости на угол от 0 до 45 ° в обе стороны.

На рис. 6.2 и в табл. 6.1 показано размещение органов управления вертикальных консольно-фрезерных станков 6P12, 6P12Б, 6P83 и 6P83Б. Для удобства работы на станке основными движениями можно управлять спереди и слева относительно оператора.

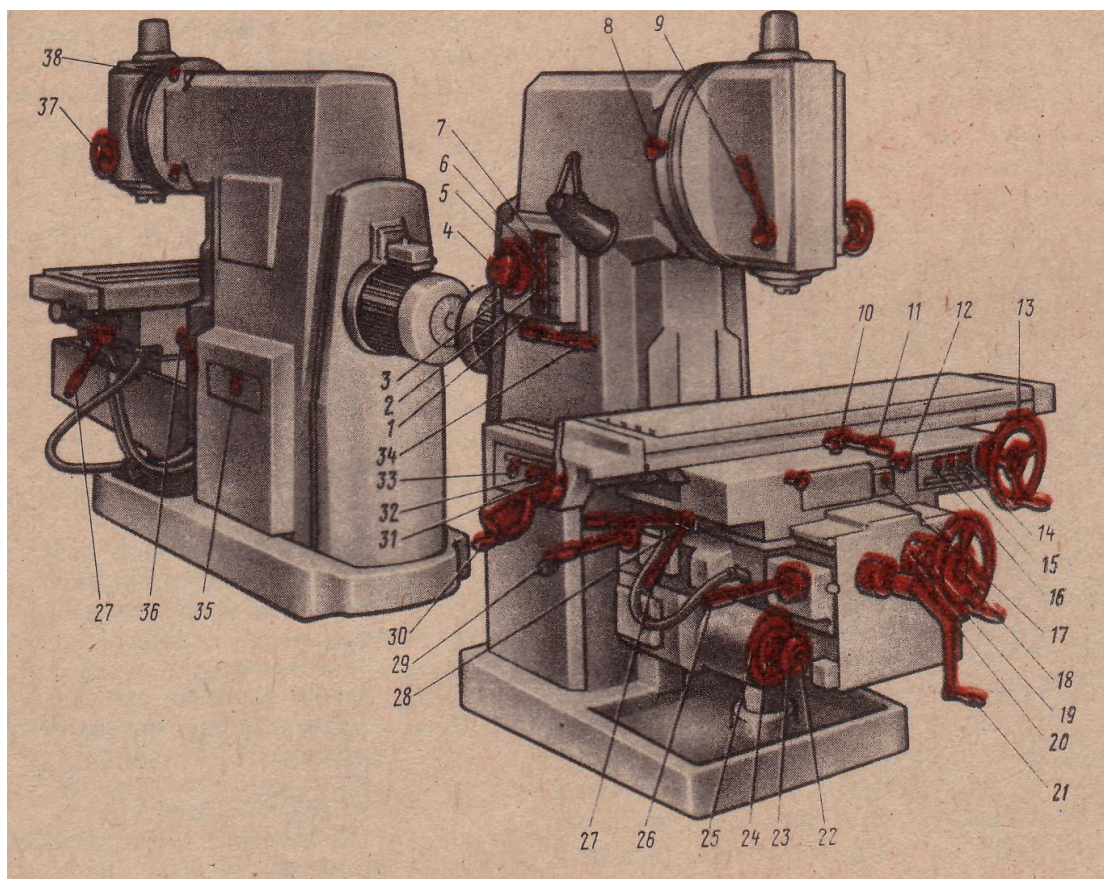


Рис. 6.2. Органы управления консольного вертикально-фрезерного станка

Табл. 6.1. Органы управления консольных вертикально-фрезерных станков (к рис. 6.2)

Номер позиции на рис. 6.2	Органы управления
1	Кнопка «Стоп» (дублирующая)
2	Кнопка «Пуск шпинделя» (дублирующая)
3	Стрелка-указатель скоростей шпинделя
4	Указатель скоростей шпинделя
5	Кнопка «Быстро стол» (дублирующая)
6	Кнопка «Импульс шпинделя»

7	Переключатель освещения
8	Поворот головки

Продолжение табл. 6.1.

9	Зажим гильзы шпинделя
10	Звездочка механизма автоматического цикла
11	Рукоятка включения продольных перемещений стола
12	Зажимы стола
13	Маховичок ручного продольного перемещения стола
14	Кнопка «Быстро стол»
15	Кнопка «Пуск шпинделя»
16	Кнопка «Стоп»
17	Переключатель ручного или автоматического управления продольных перемещений стола
18	Маховичок ручных поперечных перемещений стола
19	Лимб механизма поперечных перемещений стола
20	Кольцо-нониус
21	Рукоятка ручного вертикального перемещения стола
22	Кнопка фиксации грибка переключения подач
23	Грибок переключения подач
24	Указатель подач стола
25	Стрелка-указатель подач стола
26	Рукоятка включения поперечной и вертикальной подач стола
27	Зажим салазок на направляющих консоли
28	Рукоятка включения продольных перемещений стола (дублирующая)
29	Рукоятка включения поперечной и вертикальной подач стола (дублирующая)
30	Маховичок ручного продольного перемещения стола (дублирующий)
31	Переключатель направления вращения шпинделя «Влево-вправо»
32	Переключатель насоса охлаждения «Включено-выключено»
33	Переключатель ввода «Включено-выключено»
34	Рукоятка переключения частот вращения шпинделя
35	Переключатель автоматического или ручного управления и работы круглого стола
36	Зажим консоли на станине
37	Маховичок выдвижения гильзы шпинделя
38	Зажим головки на станине

Универсальные консольные фрезерные станки имеют хобот с серьгой, как горизонтально-фрезерные станки, но могут быть легко преобразованы в вертикально-фрезерные. Для этого достаточно снять серьгу, сдвинуть хобот к задней части станка и установить вертикальную головку, которая обычно закреплена на поворотном кронштейне станка для облегчения её установки. Широко универсальные консольные фрезерные станки имеют к тому же поворотный стол с механической подачей. Стол может быть повернут на 45° относительно обычного продольного направления подачи.

Заготовки сложной формы или больших размеров крепятся непосредственно на столе с помощью прихватов. На рис. 6.3 показаны различные типы прихватов: плиточные (рис. 6.3, а), вилкообразные (рис. 6.3, б), корытообразные (рис. 6.3, в), изогнутые универсальные (рис. 6.3, г). Все прихваты имеют продольные пазы (прорези) для перемещения прихвата относительно крепежного элемента (болта) и

обрабатываемой заготовки.

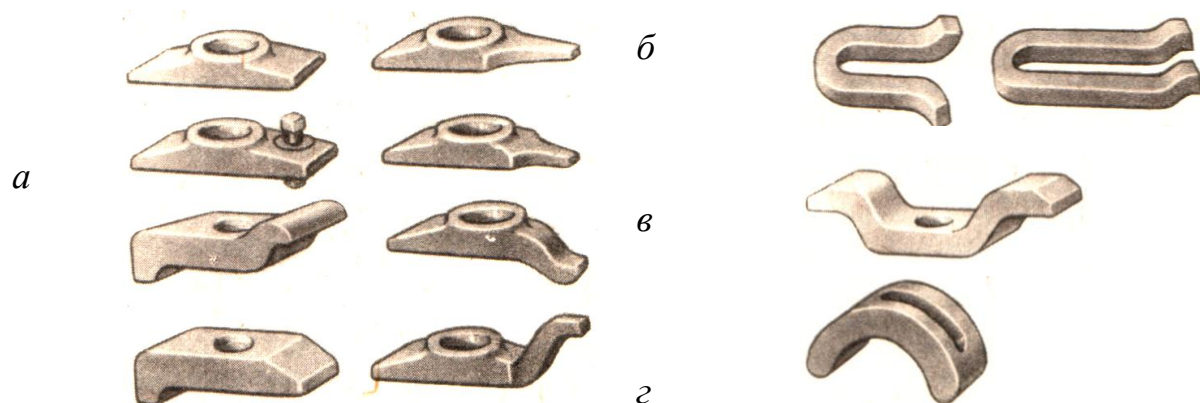


Рис. 6.3. Прихваты

На рис. 6.4, *а* показано закрепление обрабатываемой заготовки 5 на столе станка плиточным прихватом 2, который одним концом опирается на заготовку 5, а другим – на подкладку 1. Сначала удлинённая головка болта 4 заводится сбоку стола в Т-образный паз стола, а затем прихват устанавливается на болте через продольный паз. При завертывании ключом гайки 3 прихват прижимается к заготовке, закрепляя её.

При закреплении заготовки прихватами необходимо соблюдать следующие правила:

болт, крепящий прихват, надо устанавливать возможно ближе к заготовке; прихват должен опираться на подкладку одинаковой высоты с заготовкой или иметь изогнутый выступ для опоры на стол или подкладку меньшей высоты; конец прихвата, опирающийся на заготовку, не должен находиться над её частью, которая не касается плотно поверхности стола; чем больший припуск фрезеруется с заготовки, тем сильнее должны быть затянуты болты.

В качестве подкладки под прихваты используют ступенчатые подставки (рис. 6.4, *б*), различные бруски требуемой высоты или специальные опоры для плиточных прихватов (рис. 6.4, *в*).

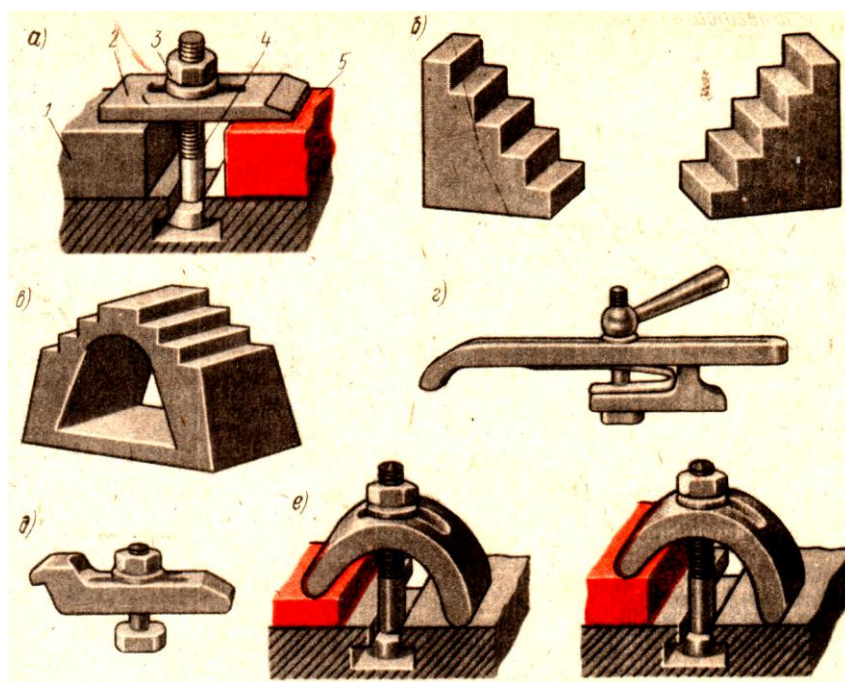


Рис. 6.4. Закрепление заготовок на столе станка

Заготовки, небольшие по высоте, могут быть закреплены непосредственно на столе станка прихватами (рис. 6.4, з, д). В некоторых случаях удобно пользоваться подпружиненным прихватом с достаточно большим диапазоном регулирования по вылету и закреплением заготовки рукояткой (рис. 6.4, з). Удобными в работе являются регулируемые по высоте изогнутые универсальные прижимы (рис. 6.4, е), которыми закрепляют заготовки с разной высотой (толщиной).

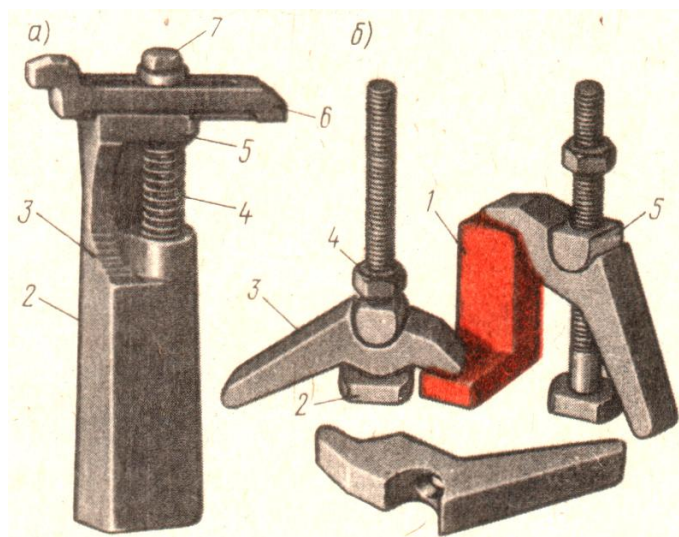


Рис. 6.5. Универсальные прижимы

Ступенчатый прижим (рис. 6.5, а) используется при большой высоте заготовки. Он состоит из корпуса 2, в котором имеются уступы (ступени) 3, расположенные по выемке корпуса на разной высоте. На уступы опирается подкладка 5,

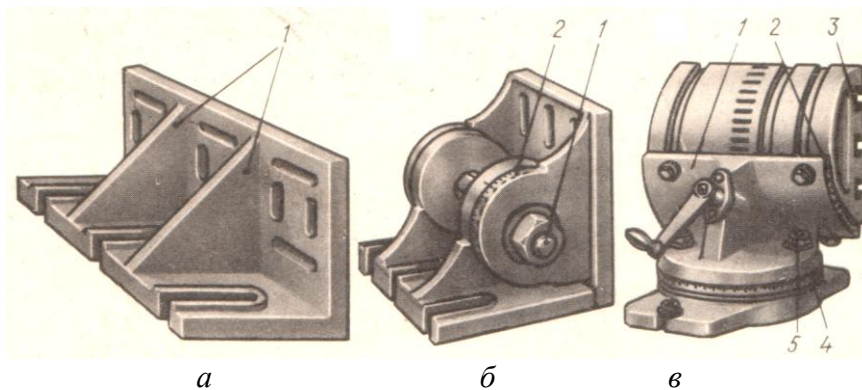


Рис. 6.6. Угловые плиты

входящая своим шлицем в паз прихвата б, и прижимается к нему пружиной 4. Прихват может поворачиваться на 180°. В корпусе прижима имеется сквозное резьбовое отверстие для прижимного болта 7 и для крепления всего прижима к Т-образным пазам станка.

В прижиме, показанном на рис. 6.5, б, заготовка 1 крепится прихватом 3 Т-образной формы с выемкой, в которую устанавливается сухарь 5. Заготовка закрепляется болтом 2 и гайкой 4.

При чистовом фрезеровании затяжка болтов не должна вызывать деформаций обрабатываемой заготовки.

Угловые плиты применяются для установки и крепления заготовок, имеющих плоскости, расположенные под углом 90°. На рис. 6.6, а показана обычная угловая плита. Она имеет одно или два ребра жесткости 1 и две полки (равнобокие или неравнобокие, широкие или узкие), расположенные под углом 90° или иным, выдерживаемым при обработке. На рис. 6.6, б показана поворотная угловая плита, полку которой можно поворачивать вокруг оси 1 после освобождения гайки и устанавливать на требуемый угол по шкале 2. Такие плиты применяют при обработке наклонных плоскостей.

На рис. 6.6, в показана универсальная угловая плита, допускающая

поворот закрепленной заготовки в двух плоскостях: горизонтальной (рукояткой 1) и вертикальной (поворотом колодки 4, закрепляемой болтами 5). Плита представляет собой поворотный стол 3 с тремя Т-образными пазами. Угол поворота стола отсчитывают по шкале 2.

На рис. 6.7 показано крепление заготовки к угловой плите посредством струбцинок.

Цилиндрические заготовки для фрезерования в них шпоночных канавок, пазов и лысок удобно закреплять в призмах, которые вместе с обрабатываемой заготовкой крепятся к столу станка прихватками (рис. 6.8).

Для закрепления заготовок на фрезерных станках большое распространение получили различные по конструкции и размерам машинные тиски (рис. 6.8). Машинные тиски могут быть простыми неповоротными (рис. 6.8, а), поворотными (рис. 6.8, б), корпус которых можно поворачивать вокруг вертикальной оси; универсальными (рис. 6.8, в), позволяющими осуществлять поворот заготовки вокруг двух осей, и специальными (рис. 6.8, г) для закрепления в призме валов.

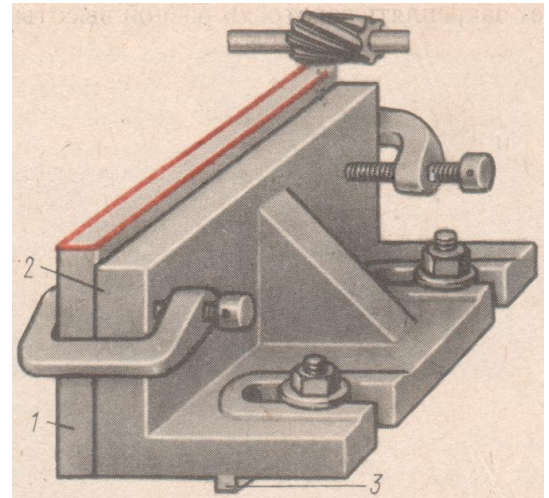


Рис. 6.7. Закрепление заготовок на угловой плите

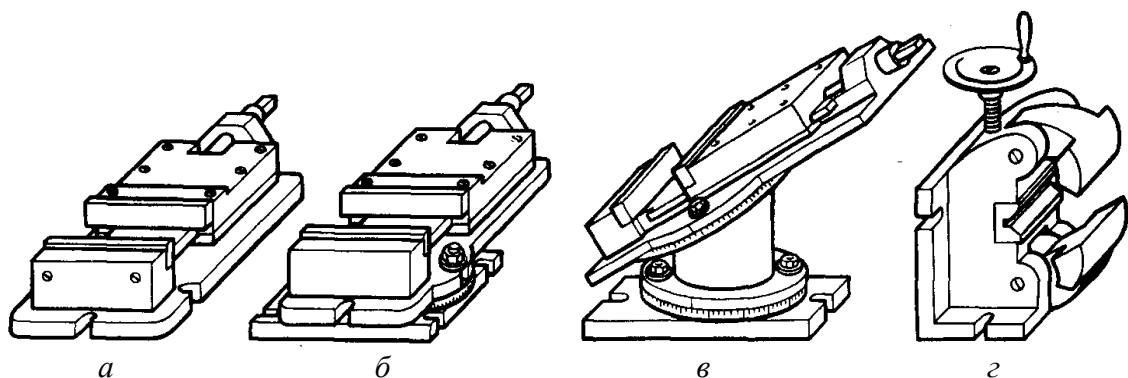


Рис. 6.8. Тиски машинные: а – простые неповоротные; б – поворотные; в – универсальные, позволяющие поворачивать заготовку относительно двух взаимно перпендикулярных осей; г – специальные для закрепления валов;

Тиски своим основанием крепятся болтами на столе фрезерного станка. Специальные тиски можно устанавливать вертикально либо повернув на угол 90° в горизонтальной плоскости. Поворотные и универсальные машинные тиски имеют поворотный корпус с градуированной шкалой для фрезерования плоскостей (скосов) под любым требуемым углом.

При закреплении заготовок в тисках надо развести губки на ширину, несколько большую ширины заготовки. Если высота заготовки меньше высоты губок тисков, то надо взять одну или две стальные подкладки с правильно обработанными параллельными плоскостями и подложить их под заготовку, затем поворотом рукоятки тисков зажать заготовку и ударами медного молотка осадить ее. При неплотном прилегании заготовки к подкладкам или направляющим тисков ее следует осадить еще ударами

медного молотка и дополнительно закрепить.

Цилиндрические заготовки для фрезерования в них шпоночных канавок, пазов и лысок обычно закрепляются в призмах, которые вместе с обрабатываемой заготовкой крепятся к столу станка прихватками (рис. 6.9).

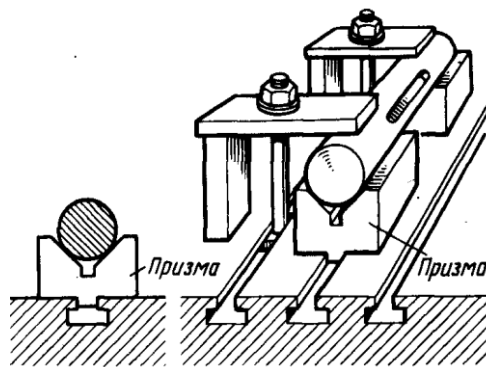


Рис. 6.9. Закрепление вала на призмах

6.2. Типы фрез и их назначение

Режущими инструментами, применяемым на фрезерных станках, являются фрезы. Режущие зубья фрезы могут быть расположены как на цилиндрической поверхности, так и на торце, причем каждый зуб представляет собой простейший резец. Элементы зуба фрезы, геометрические элементы и основные поверхности, образуемые на обрабатываемой заготовке (рис. 6.10), мало чем отличаются от соответствующих элементов при работе обычным резцом при точении. При рассмотрении схем фрезерования необходимо помнить, что вращение придаётся фрезе от шпинделя, а движение подачи – от стола станка.

По направлению зубьев различают фрезы прямозубые и с винтовыми (левыми или правыми) зубьями.

По конструкции зубьев фрезы бывают с острозаточенными и затылованными зубьями. В основном применяют фрезы с острозаточенными зубьями, так как они обладают большой стойкостью, обеспечивают меньшую шероховатость обрабатываемой ими поверхности и проще в изготовлении.

У затылованных фрез задняя поверхность зуба образуется путем ее затылования по определенной кривой (чаще по спирали Архимеда) на специальных затыловочных станках. Эти фрезы относятся к фасонным (канавочным, резьбовые, зуборезные и др.).

Фрезы с острозаточенными

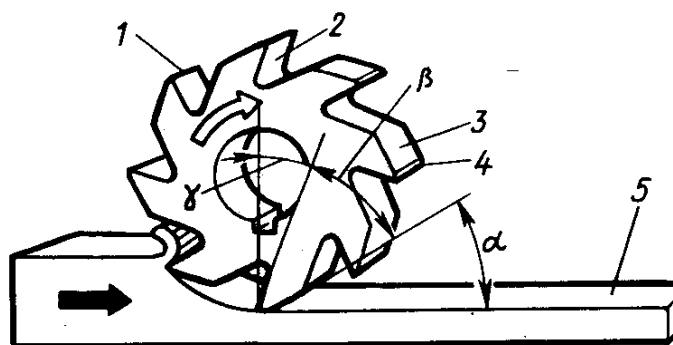


Рис. 6.10. Геометрические элементы режущей части цилиндрической фрезы: 1 – режущая кромка; 2 – передняя поверхность; 3 – задняя поверхность; 4 – ленточка; 5 – обработанная поверхность заготовки

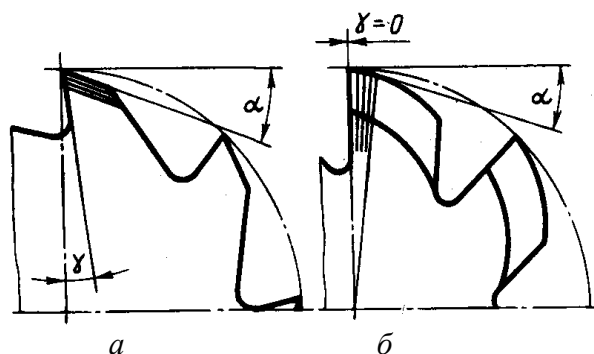


Рис. 6.11. Схема заточки фрез: а – острозаточенных; б – затылованных

зубьями обычно затачивают по задним поверхностям (рис. 6.11, *а*). По передней поверхности зуба заточку производят редко, но обязательно при первой заточке в процессе изготовления и при большом износе. Затылованные фрезы перетачиваются только по передней поверхности зуба, в результате чего она всегда остается радиальной и профиль режущей кромки фрезы сохраняется постоянным (рис. 6.11, *б*).

Фрезы делают цельными (обычно из быстрорежущей стали Р6М5, но фрезы малого диаметра изготавливаются и из твёрдого сплава), составными, сборными (со вставными ножами из быстрорежущей стали или с пластинами твёрдых сплавов). Сборные фрезы более экономичны, так как корпуса изготавливаются из дешёвой конструкционной стали и служат долго, в то время как ножи должны перетачиваться после износа, а режущие пластины заменяться без переточки.

На рис. 4.16, *а...з* показаны наиболее часто встречающиеся типы фрез и элементы срезаемого слоя металла. Цилиндрические и дисковые фрезы применяются в основном на горизонтально-фрезерных станках, а концевые и торцовые – в основном на вертикально-фрезерных.

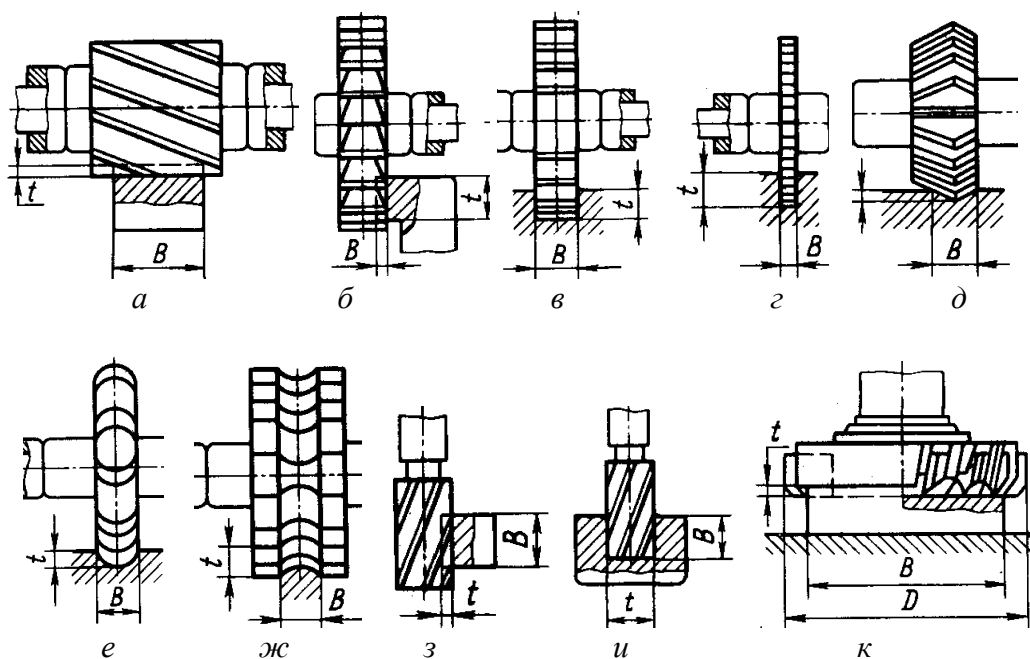


Рис. 6.12. Типы фрез и элементы срезаемого слоя металла: *а* – цилиндрические; *б* – дисковые трехсторонние; *в* – дисковые пазовые; *г* – дисковые прорезные и отрезные; *д* – дисковые угловые; *е* – дисковые фасонные с выпуклым профилем; *ж* – дисковые фасонные с вогнутым профилем; *з*, *и* – концевые; *к* – торцовые. *t* – глубина резания; *B* – ширина фрезерования; *D* – диаметр фрезы

Фрезерование может быть осуществлено двумя способами (по двум схемам): **встречное фрезерование**, когда направление подачи направлено против направления вращения фрезы (скорости резания) (рис. 6.13, а), и **попутное фрезерование**, когда направления движения подачи и вращения фрезы совпадают (рис. 6.13, б).

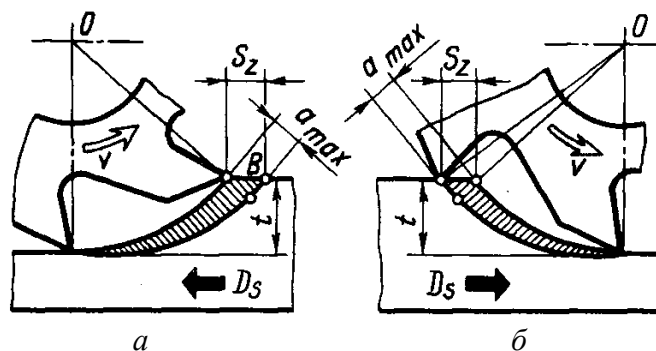


Рис. 6.13. Схемы фрезерования: а – встречное фрезерование; б – попутное

Достоинства встречного фрезерования:

1. Нагрузка на зуб фрезы возрастает постепенно, от нуля при врезании (т.к. $a = 0$) до максимума (т.к. $a = a_{\max}$) на выходе из контакта;
2. Зубья фрезы работают из-под «корки», выламывая её снизу, начинают врезаться в уже обработанную чистую поверхность, что уменьшает износ при фрезеровании поковок с поверхностью, покрытой окалиной и наклёпанным слоем, а также литых заготовок;
3. Составляющая сила резания P_z направлена против движения подачи D_s , поэтому при этой схеме зазоры между боковыми поверхностями резьбы ходового винта и гайкой стола всегда выбраны (см. рис. 6.14), что, в отличие от попутного фрезерования, позволяет избежать рывков, т.е. резкого перемещения стола с гайкой в направлении действия силы резания, при врезании очередного зуба.

Недостатки встречного фрезерования:

1. На этапе окончания работы зуба фрезы составляющая сила резания P_z стремится оторвать заготовку от стола станка (P_z будет направлена вправо и немного вверх, см. рис. 6.13, а), что при больших сечениях среза приводит к дрожанию (вибрации) и ухудшению шероховатости обработанной поверхности;
2. При врезании режущая кромка зуба начинает работу с нулевой толщиной среза, что увеличивает трение по задней поверхности и приводит к повышенному износу по задней поверхности. Но при обработке заготовки с «коркой» этот износ всё таки не такой интенсивный по сравнению с врезанием в «корку».
3. Врезание с нулевой толщиной среза приводит к затиранию поверхности, увеличивает наклёп и шероховатость обработанной поверхности;

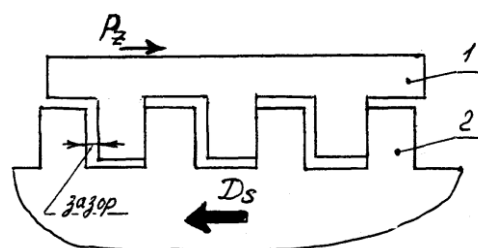


Рис. 6.14. Схема выборки зазора в винтовой передаче при встречном фрезеровании; 1 – гайка стола; 2 – ходовой винт

- К окончанию работы зуба толщина среза максимальна, что приводит к резкому снятию нагрузки на зуб при выходе из контакта с заготовкой, что увеличивает вероятность выкрашивания режущей кромки;

Достоинства попутного фрезерования:

- При попутном фрезеровании заготовка прижимается к столу, требуется небольшая сила для прижатия заготовки к столу;
- Каждый зуб фрезы начинает врезаться с максимальной толщиной среза, поэтому при предварительно обработанной и чистой поверхности износ по задней поверхности уменьшается;
- При выходе из контакта с заготовкой толщина среза равна нулю, что уменьшает шероховатость обработанной поверхности и вероятность выкрашивания режущей кромки из-за плавного уменьшения нагрузки до нуля, увеличивает точность обработки;

Недостатки попутного фрезерования:

- При наличии у заготовки окалины (корки) зуб ударяется о неё, что приводит к быстрому разрушению режущей кромки.
- Составляющая сила резания P_z направлена по направлению движения подачи, поэтому если контакта зуба фрезы с заготовкой нет, то появляется зазор между боковыми поверхностями резьбы ходового винта и гайкой стола из-за люфта (см. рис. 6.15, а, зазор *слева* от витка винта). Когда зуб начинает врезаться, то под

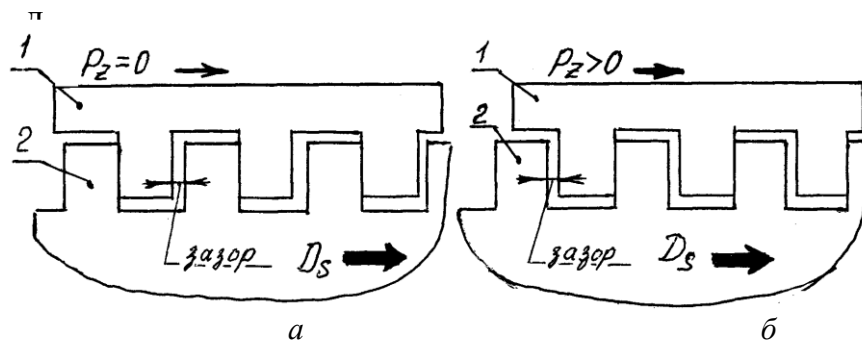


Рис. 6.15. Схема резки выборки зазора в винтовой передаче под действием появляющейся силы P_z в момент врезания зуба при попутном фрезеровании; а – при отсутствии врезания зуба и, соответственно, силы P_z ; б – при врезании зуба и появляющейся силы P_z ; 1 – гайка стола; 2 – ходовой винт

в

ившейся силы P_z стол дёргается в направлении действия этой силы, и зазор исчезает (см. рис. 6.15, б, зазор уже *справа* от витка винта). Чем меньше количество зубьев находится в постоянном контакте с заготовкой и больше сила резания P_z , чем больше люфт из-за износа винтовой пары винт-гайка, тем больше будут рывки. Потому для успешного применения попутного фрезерования необходимо обязательно плотное (без люфта) соединение ходового винта с разъемной гайкой стола.

Исходя из анализа достоинств и недостатков схем фрезерования, встречное фрезерование применяется при черновой обработке, а попутное – при чистовой, но обязательно при наличии без зазорного соединения по

боковой поверхности ходового винта и гайки стола.

При торцовом фрезеровании для достижения производительных режимов резания диаметр фрезы D должен быть больше ширины фрезерования B , т.е. $D = (1,25 \dots 1,5) \times B$, а при обработке заготовок обязательным является их несимметричное расположение относительно фрезы: для заготовок из конструкционных углеродистых и легированных сталей – сдвиг их в направлении врезания зуба фрезы (рис. 4, а), чем обеспечивается начало резания при малой толщине срезаемого слоя; для заготовок из жаропрочных и коррозионно-стойких сталей – сдвиг заготовки в сторону выхода зуба фрезы из резания (рис. 4, б), чем обеспечивается выход зуба из резания с минимально возможной толщиной срезаемого слоя. Несоблюдение указанных правил приводит к значительному снижению стойкости инструмента.

Глубина фрезерования t и ширина фрезерования B – понятия, связанные с размерами слоя заготовки, срезаемого при фрезеровании (см. рис. 3). Во всех видах фрезерования, за исключением торцового, t определяет

продолжительность контакта зуба фрезы с заготовкой; t измеряется в направлении, перпендикулярном к оси фрезы. Ширина фрезерования B определяет длину лезвия зуба фрезы, участвующую в резании; B измеряется в направлении, параллельном оси фрезы. При торцовом фрезеровании эти понятия меняются местами.

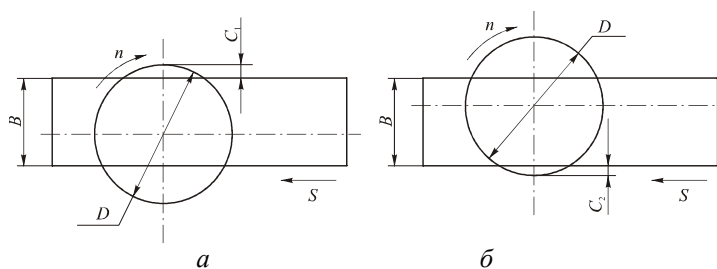


Рис. 6.16. Расположение стальной заготовки при торцовом фрезеровании относительно фрезы: а – врезание зуба фрезы при $c_1 = (0,03 \dots 0,05) D$; б – выход зуба фрезы при $c_2 = 0$.

6.3. Порядок выбора и расчёта режимов резания при фрезеровании

Уточняется марка обрабатываемого материала, вид фрезерования, выбирается тип и размер фрезы, уточняется количество зубьев. Определяется глубина резания, а для чернового фрезерования и наибольшая возможная глубина резания t и ширина фрезерования B , допустимая типом и размером фрезы, мощностью станка. После этого назначается подача.

При фрезеровании различают **подачу** на один зуб s_z , подачу на один оборот фрезы s и подачу минутную s_m , мм/мин, которые находятся в следующем соотношении:

$$s_m = s \times n = s_z \times z \times n \quad (6.1)$$

где n – частота вращения фрезы, об/мин; z – количество зубьев фрезы.

Исходной величиной подачи при черновом фрезеровании является величина ее на один зуб s_z , при чистовом фрезеровании – на один оборот фрезы s , по которой для дальнейшего использования вычисляют величину подачи на один зуб $s_z = s/z$. Рекомендуемые подачи для различных фрез и условий резания указаны в справочнике «Справочник технолога-машиностроителя» под редакцией Косиловой, т. 2, раздел «Общие сведения

о выборе режимов резания», табл. 33 — 38.

Рассчитывается скорость резания. **Скорость резания** – окружная скорость фрезы, м/мин,

$$C_v = \frac{C_v D^q}{T^m t^x s_z^y B^u z^p} K_v. \quad (1)$$

Значения коэффициента C_v и показателей степени приведены в табл. 39, а периода стойкости T – в табл. 40.

Общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания

$$K_v = K_{Mv} \times K_{nv} \times K_{iv}, \quad (2)$$

где K_{Mv} - коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала (см. табл. 1 - 4); K_{nv} - коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки (см. табл. 5); K_{iv} - коэффициент, учитывающий материал инструмента (см. табл. 6).

Рассчитывается частота вращения фрезы $n_{расч} = 1000 \cdot v / \pi \cdot D$, об/мин. По паспорту станка определяется ближайшая наименьшая частота вращения шпинделя, $n_{пасп}$, которая и принимается для установки на станке.

Рассчитывается минутная подача s_m по уравнению (6.1). По паспорту станка определяется ближайшая наименьшая подача, $s_{m пасп}$, которая и принимается для установки на станке.

РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ И РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ

Методические пособие по дисциплине «Резание материалов и режущий инструмент» для студентов, обучающихся по направлению 150900 «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств»

Составители

доц., канд. техн. наук В.Н. Козлов

Рецензент

кандидат технических наук


Скворцов В.Ф.

Подписано к печати 05.11.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.
Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru