

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Д.Л. СКУРАТОВ, В.Н. ТРУСОВ

ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

ПРОЦЕССЫ РЕЗАНИЯ И РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

Часть 1

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2012

УДК СГАУ: 6(075)

ББК СГАУ: 34.5

С 467

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Н.В. Носов,
д-р техн. наук, проф. Н.Д. Проничев

Скуратов Д.Л.

С 467

**Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и
режущие инструменты:** учеб. пособие / Д.Л. Скуратов, В.Н. Трусов.
– Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 196 с.

ISBN 978-5-7883-0896-8

Рассмотрены основы единой геометрии режущих инструментов, физических явлений, сопровождающих процесс резания материалов. Описаны основные процессы обработки материалов и их кинематика, а также принципиальные конструкции инструментов для их осуществления.

Для студентов дневного отделения, обучающихся по машиностроительным специальностям. Может быть полезно студентам заочного отделения.

УДК СГАУ:6(075)

ББК СГАУ: 34.5

ISBN 978-5-7883-0896-8

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое пособие «Обработка конструкционных материалов. Процессы резания и режущие инструменты» является учебно-теоретическим изданием, используемым при изучении студентами, обучающимися по специальности 160700.65 – «Проектирование авиационных и ракетных двигателей» и направлению 151900.62 – «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», таких основополагающих дисциплин, как «Обработка конструкционных материалов», «Процессы и операции формообразования» и «Современный режущий инструмент». Эти дисциплины являются обязательными дисциплинами профессионального цикла, необходимыми при подготовке специалистов и бакалавров в области технологии машиностроения, независимо от их дальнейшей специализации, и в частности производства авиационных и ракетных двигателей, что хорошо согласуется с существующей концепцией подготовки специалистов с высшим образованием, предусматривающей расширенную подготовку по общему машиностроению.

Целью учебного пособия является ознакомление с основными закономерностями явлений, сопровождающих процесс резания, и возможностями воздействия на этот процесс с целью его оптимизации для достижения требуемой производительности и качества обработки.

Используя данное пособие, студенты машиностроительных специальностей имеют возможность подготовиться к зачетам и экзаменам. Они могут применить полученные знания при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также в своей практической деятельности на предприятиях машиностроительной отрасли.

Содержание учебного пособия во многом отражает содержание рабочих программ ранее указанных курсов. В отличие от имеющихся учебников и учебных пособий по резанию материалов и режущему инструменту в предлагаемом пособии в сжатой форме представлены основные материалы по теории резания, конструкциям и геометрии режущих инструментов, а также даны контрольные вопросы для самопроверки.

Данное пособие основывается на знаниях, полученных студентами при изучении высшей математики, физики, химии, материаловедения, сопротивления материалов, теоретической механики, термодинамики.

В учебном пособии представлены разделы, посвященные изучению явлений, протекающих в процессе резания материалов, приведена информация об инструментальных материалах, геометрии и конструкциях режущих инструментов основных видов и процессах механической обработки.

Не претендуя на исчерпывающую полноту, авторы вместе с тем надеются, что предлагаемое учебное пособие, отличающееся доступностью и последовательностью изложения материала, послужит базовой составляющей при изучении ранее указанных дисциплин и будет способствовать успешному усвоению тем. В определенной мере оно восполнит дефицит учебной литературы, освещающей вопросы обработки материалов резанием.

ВВЕДЕНИЕ

Главной задачей современного машиностроительного производства является создание высококачественной, конкурентоспособной техники. Качество изготавливаемых деталей, входящих в состав изделий, при требуемых показателях производительности и экономичности в большинстве случаев обеспечивается за счет использования операций механической обработки резанием. Обработка материалов резанием до настоящего времени, несмотря на значительные достижения в использовании методов литья и обработки металлов давлением, является основным способом изготовления продукции машиностроения. Процесс формообразования поверхностей деталей осуществляется на металлорежущих станках путем снятия слоя материала и удаления его в виде стружки. В результате обработки обеспечивается заданная точность геометрических параметров, формы и расположения поверхностей и требуемое состояние поверхностного слоя. Поэтому дальнейшее повышение эффективности процесса резания, особенно в условиях автоматизированного производства, является актуальной задачей.

Ведущая роль обработки резанием в современном машиностроительном производстве обусловлена следующими её преимуществами по сравнению с другими видами формообразования, а именно:

- универсальностью процессов механической обработки, позволяющих изготавливать детали разнообразных форм и размеров из различных материалов;
- возможностью получения высокой точности геометрических параметров, заданной точности формы и расположения поверхностей, требуемой величины шероховатости поверхности;
- экономичностью и гибкостью процессов обработки резанием.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса резания позволили технологам на основе использования современных методов и средств управлять этим процессом с целью повышения производительности обработки, качества деталей и изделий в целом. Это прежде всего методы обеспечения максимальной износостойкости режущего инструмента, его надежности и долговечности, методы расчетной оценки стойкостных характеристик инструмента, методы выбора рациональных условий обработки, обеспечивающих заданный ресурс инструмента и качество обработки, экономические показатели процесса обработки и т.д.

Тем не менее, несмотря на существенные преимущества процессов механической обработки резанием, проблема повышения её эффективности остается открытой. Эта проблема в настоящее время решается в ходе параллельного развития станкостроения и инструментальной промышленности. Решению данной проблемы способствуют повышение качества режущего инструмента как важного звена технологической системы и интенсификация режимов обработки.

Одним из перспективных направлений этой работы следует считать совершенствование структуры твёрдых сплавов и состава покрытий. Базовой составляющей производства современных твердых сплавов считается комбинация основы сплава с многослойными покрытиями $Ti(CN) + TiC + Al_2O_3 + TiN$.

Повышению эффективности процессов резания способствует также рост скорости резания до 10000 м/мин и, соответственно, частоты вращения шпинделя до 50000 об/мин.

Основным путем повышения эффективности обработки резанием является уменьшение временных и энергетических затрат на формообразование.

Снижение временных затрат связано с уменьшением основного и вспомогательного времени на обработку. Уменьшение основного времени и энергетических затрат может быть обеспечено за счет оп-

тимизации условий обработки. Экономия основного времени достигается также на основе совершенствования конструкций и режущих свойств инструментов. Вспомогательное время уменьшается за счет осуществления непрерывной обработки путем использования предварительно настраиваемых и подстраиваемых инструментов, а также автоматизацией манипулирования инструментом и заготовкой.

Работа с максимальной производительностью обеспечивает уменьшение срока окупаемости дорогостоящего оборудования и диктует необходимость снижения периода стойкости инструмента. Так, по данным фирмы Sandvik Coromant, период стойкости твердосплавных пластин в современных условиях обработки стали составляет 15-20 мин, а при обработке твердыми сплавами нержавеющей сталей может быть ещё меньше.

Решение существующих проблем в области обработки материалов резанием невозможно без знания её основ. Поэтому изучение основ обработки материалов резанием способствует достижению значительных успехов в решении практических задач технологии машиностроения. Эти основы являются научной базой для разработки различных автоматизированных и компьютеризированных систем проектирования и управления технологическими процессами. Информация о закономерностях процесса резания является отправной точкой для разработки новых видов промышленного оборудования, например металлорежущих станков для высокоскоростной и сверхскоростной обработки, а также современных инструментальных систем.

Изучение таких основополагающих дисциплин, как «Обработка конструкционных материалов», «Процессы и операции формообразования», «Резание материалов», позволит будущему специалисту успешно ориентироваться в вопросах выбора металлорежущих станков, инструментов и проектирования технологии механической обработки материалов. На достижение данных целей и направлено предлагаемое пособие.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Процесс резания – это последовательное срезание металла заготовки режущим инструментом, удаление его в виде стружки с целью получения детали определенной формы и размеров, заданных чертежом, и обеспечения определенного технологического качества поверхности.

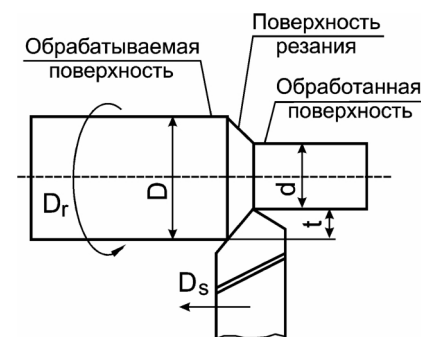


Рис. 1.1. Основные поверхности заготовки и основные движения, необходимые для осуществления процесса резания при точении

На заготовке, подвергаемой обработке, различают: обрабатываемую поверхность, обработанную поверхность и поверхность резания.

Обрабатываемая поверхность – это поверхность, с которой снимается припуск в процессе резания. *Обработанная поверхность* – это поверхность, образующаяся после снятия стружки. *Поверхность резания* – это поверхность, которая образуется режущим лезвием инструмента и является переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями.

На рис. 1.1 показаны основные поверхности заготовки и основные движения, необходимые для осуществления процесса резания при точении.

Для осуществления процесса резания необходимо совершить как минимум два движения, а именно: главное движение резания и движение подачи. *Главное движение резания* (D_r) – это прямолинейное поступательное или вращательное движение заготовки или режущего инструмента, происходящее с наибольшей скоростью. *Движение подачи* (D_s) – прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента или заготовки, скорость которого меньше скорости главного движения резания и которое предназначено для того, чтобы распространить отделение слоя материала на всю обрабатываемую поверхность.

При этом следует отметить, что процесс резания может происходить при обязательном выполнении следующих необходимых условий [8]:

- а) инструмент должен иметь соответствующую форму и рациональную геометрию заточки;
- б) твердость режущей части инструмента должна быть значительно выше твердости обрабатываемого материала;
- в) инструмент и заготовка в процессе резания должны перемещаться друг относительно друга строго по заданным траекториям;
- г) все взаимные перемещения должны происходить с определенными скоростями главного движения и движения подачи в зависимости от различных технологических факторов и условий обработки.

При обработке на токарных станках главное движение резания (вращение) совершает заготовка, а инструмент производит движение подачи (см. рис. 1.1). В случае работы на расточных, сверлильных и фрезерных станках, наоборот, главное движение совершают инструменты, а движение подачи может осуществлять как заготовка, так и инструмент.

Скорость главного движения резания при точении задается в м/мин, подсчитывается по формуле $v = \frac{\pi D n}{1000}$, где D – диаметр обрабатываемой заготовки, мм; n – частота вращения заготовки, об/мин.

Скорость движения подачи v_s или просто подача S может задаваться в мм/мин или мм/об. При токарной обработке различают два вида подачи: S_m – минутную подачу (мм/мин), которая показывает, на какое расстояние переместится инструмент за 1 минуту; S_o – подачу на один оборот заготовки (мм/об), которая показывает, на какое расстояние переместится инструмент за 1 полный оборот заготовки,

$$S_o = S_m / n.$$

При точении задаются v , $S_o(S_m)$, t , которые называются элементами режима резания. Глубина резания t (мм) – это расстояние от обрабатываемой поверхности заготовки до обработанной, измеренное по нормали к последней:

$$t = \frac{D - d}{2}.$$

1.1.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ЕДИНОЙ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Весь существующий режущий инструмент делится на два класса – лезвийный и абразивный инструмент.

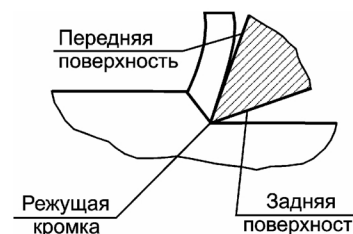


Рис. 1.2. Режущий клин

Лезвийный режущий инструмент состоит из державки или корпуса и одного или нескольких режущих зубьев. Основой режущего зуба является режущее лезвие, на котором обязательно формируются передняя и задняя поверхности. Пересечение этих поверхностей образует режущую кромку. Наи-

выгоднейшей формой режущего лезвия является *клин* (рис. 1.2). Клинья по форме могут быть самыми разными (острый, тупой, несимметричный и т.д.). При этом форма клина зависит от конструкции режущего инструмента.

Абразивный режущий инструмент состоит из отдельных зерен абразивного материала (искусственного или естественного), объединенных в одно целое с помощью специальной связки. Он имеет форму кругов, головок, сегментов, брусков, лент и применяется при шлифовании, заточке, хонинговании, суперфинише и других методах обработки.

Микротвердость абразивного материала в среднем на порядок выше микротвердости любого конструкционного материала.

1.2. ТОЧЕНИЕ

1.2.1. КОНСТРУКЦИЯ И ГЕОМЕТРИЯ ТОКАРНОГО РЕЗЦА

Токарные резцы имеют универсальную геометрию, элементы которой присутствуют у любого режущего инструмента. Они имеют рабочую (режущую) часть и державку (рис. 1.3). Режущая часть изготавливается из соответствующего инструментального материала, а державка – из сталей 40, 45, 40Х. Габариты державки определяются шириной B и высотой H , значения которых устанавливает ГОСТ. Элементы рабочей части резца представлены на рис. 1.3.

Режущая часть резца содержит переднюю (A_γ), главную (A_α) и вспомогательную (A_{α_1}) задние поверхности.

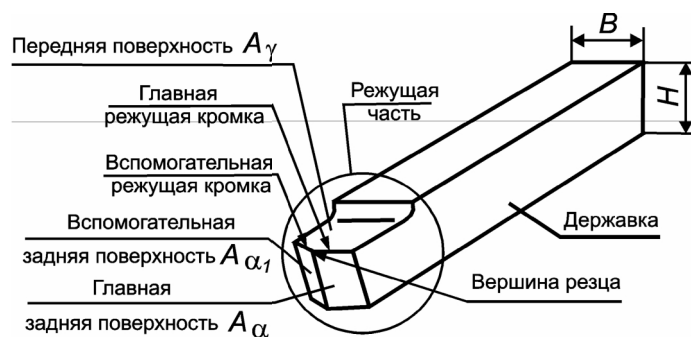


Рис. 1.3. Элементы рабочей части токарного резца

Передняя поверхность A_γ – это поверхность лезвия инструмента, по которой в процессе резания сходит стружка. *Главная задняя поверхность* инструмента A_α – это поверхность лезвия, обращенная в процессе обработки к поверхности резания заготовки. *Вспомогательная задняя поверхность* – это поверхность лезвия инструмента, обращенная к обработанной поверхности заготовки. Так как эти поверхности не параллельны между собой, при пересечении они образуют элементы лезвия резца (см. рис. 1.3).

Для ориентации инструмента в пространстве и определения его геометрии установлено понятие координатных плоскостей. Такими плоскостями в соответствии с ГОСТ 25762-83 являются основная плоскость и плоскость резания. *Основная плоскость P_o* – это координатная плоскость, проведенная через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно направлению скорости главного или результирующего движения резания (рис. 1.4). *Плоскость резания P_n* – это координатная плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная основной плоскости.

Данные плоскости будут менять свое положение в зависимости от используемой системы координат. Различают инструментальную, статическую и кинематическую системы координат. Определения ранее названных систем координат и координатных плоскостей этих систем приведены в ГОСТ 25762-83.

Инструментальная система координат – прямоугольная система координат с началом в вершине лезвия, ориентированная относительно геометрических элементов режущего инструмента, принятых за базу.

Статическая система координат – прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно направления скорости главного движения резания.

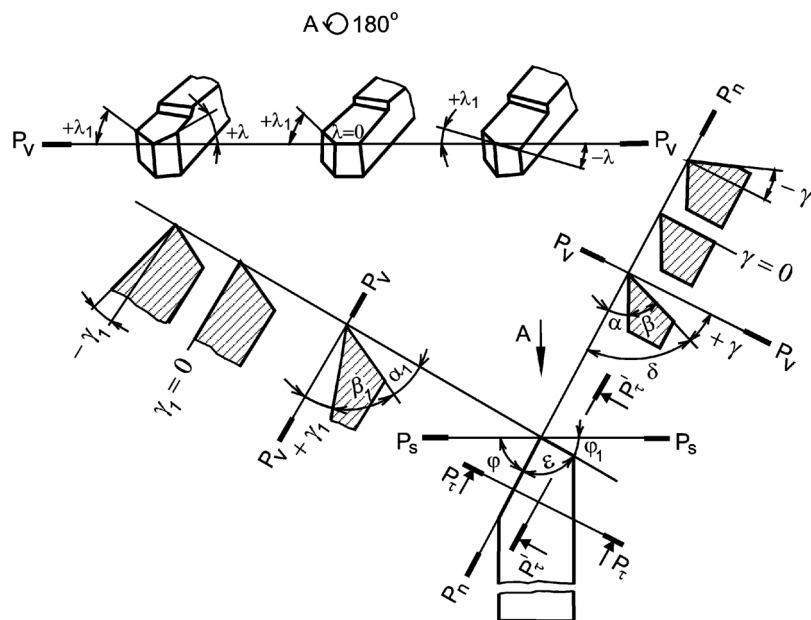


Рис. 1.4. Геометрические параметры проходного токарного реза в инструментальной системе координат¹

Кинематическая система координат – прямоугольная система координат с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно направления скорости результирующего движения резания.

Инструментальная основная плоскость – основная плоскость инструментальной системы координат.

Статическая основная плоскость – основная плоскость статической системы координат.

Кинематическая основная плоскость – основная плоскость кинематической системы координат.

Инструментальная плоскость резания – координатная плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная инструментальной основной плоскости.

Статическая плоскость резания – координатная плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная статической основной плоскости.

Кинематическая плоскость резания – координатная плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная кинематической основной плоскости.

Геометрию резца рекомендуется рассматривать в главной и вспомогательной секущих плоскостях.

Главная секущая плоскость P_t – это координатная плоскость, перпендикулярная линии пересечения основной плоскости и плоскости резания.

Инструментальная главная секущая плоскость – координатная плоскость, перпендикулярная линии пересечения инструментальных основной плоскости и плоскости резания.

Статическая главная секущая плоскость – координатная плоскость, перпендикулярная линии пересечения статических основной плоскости и плоскости резания.

Кинематическая главная секущая плоскость – координатная плоскость, перпендикулярная линии пересечения кинематических основной плоскости и плоскости резания.

Вспомогательная секущая плоскость P_t' – это плоскость, перпендикулярная проекции вспомогательной режущей кромки на основную плоскость.

В главной секущей плоскости рассматриваются (см. рис. 1.4):

– *главный передний угол γ* – это угол между передней поверхностью лезвия инструмента и основной плоскостью, проведенной через рассматриваемую точку главной режущей кромки;

¹ У токарных резцов в инструментальной системе координат направление скорости главного движения резания принимается перпендикулярно конструкторской установочной базе резца.

– *главный задний угол* α – это угол между главной задней поверхностью лезвия инструмента и плоскостью резания;

– *угол заострения* β – это угол между передней и главной задней поверхностями лезвия инструмента;

– *угол резания* δ – это угол между передней поверхностью лезвия инструмента и плоскостью резания; $\delta + \gamma = 90^\circ$, т.е. если $\delta < 90^\circ$, то $\gamma > 0^\circ$, если $\delta > 90^\circ$, то $\gamma < 0^\circ$.

Между рассмотренными углами имеет место также следующее соотношение $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$.

Во вспомогательной секущей плоскости рассматриваются:

– *вспомогательный передний угол* γ_1 – это угол между передней поверхностью лезвия инструмента и основной плоскостью, проведенной через рассматриваемую точку вспомогательной режущей кромки;

– *вспомогательный задний угол* α_1 – это угол между вспомогательной задней поверхностью лезвия инструмента и плоскостью, проходящей через вспомогательную режущую кромку перпендикулярно основной плоскости.

Геометрия резца, кроме того, определяется главным и вспомогательным углами в плане, углом при вершине резца, а также углами наклона главной и вспомогательной режущих кромок (см. рис. 4).

Главный угол в плане φ – это угол между плоскостью резания и рабочей плоскостью. *Рабочая плоскость* P_s – плоскость, в которой расположены направления скоростей главного движения резания и движения подачи. *Вспомогательный угол в плане* φ_1 – это угол между проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость и рабочей плоскостью. *Угол при вершине резца* ε – это угол между проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость; $\varepsilon = 180^\circ - (\varphi + \varphi_1)$.

Угол наклона главной режущей кромки λ – это угол между основной плоскостью, проведенной через вершину резца, и главной режущей кромкой инструмента.

Угол наклона вспомогательной режущей кромки λ_1 – это угол между основной плоскостью, проведенной через вершину резца, и вспомогательной режущей кромкой.

Углы λ и λ_1 принято считать положительными, если вершина резца является самой низкой точкой соответствующей режущей кромки. В противном случае – отрицательными.

Таким образом, при определении значений углов резца следует иметь в виду, что углы γ , γ_1 , λ , λ_1 могут принимать различные по знаку величины (см. рис. 1.4), а остальные углы: α , α_1 , β , β_1 , δ , ε , φ , φ_1 – являются всегда положительными.

1.2.2. ВЛИЯНИЕ УСТАНОВКИ РЕЗЦА И КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА УГЛЫ РЕЗЦА

В зависимости от положения точек режущей кромки резца относительно оси вращения заготовки изменяется положение основной плоскости и плоскости резания, что, в свою очередь, влечет за собой изменение переднего и заднего углов. Это наглядно видно из схем, представленных на рис. 1.5 [31].

В условиях наружного точения при положении точек главной режущей кромки резца выше оси центров станка передний угол γ в секущих плоскостях, проходящих через эти точки, будет увеличиваться на угол μ , а при положении точек главной режущей кромки ниже оси центров станка – уменьшаться на угол μ . Этот корректировочный угол можно определить из соотношения

$$\mu = \arcsin \frac{2h}{d_s},$$

где h – расстояние от рассматриваемой точки режущей кромки до оси центров станка; d_s – диаметр обрабатываемой заготовки, соответствующий рассматриваемой точке режущей кромки.

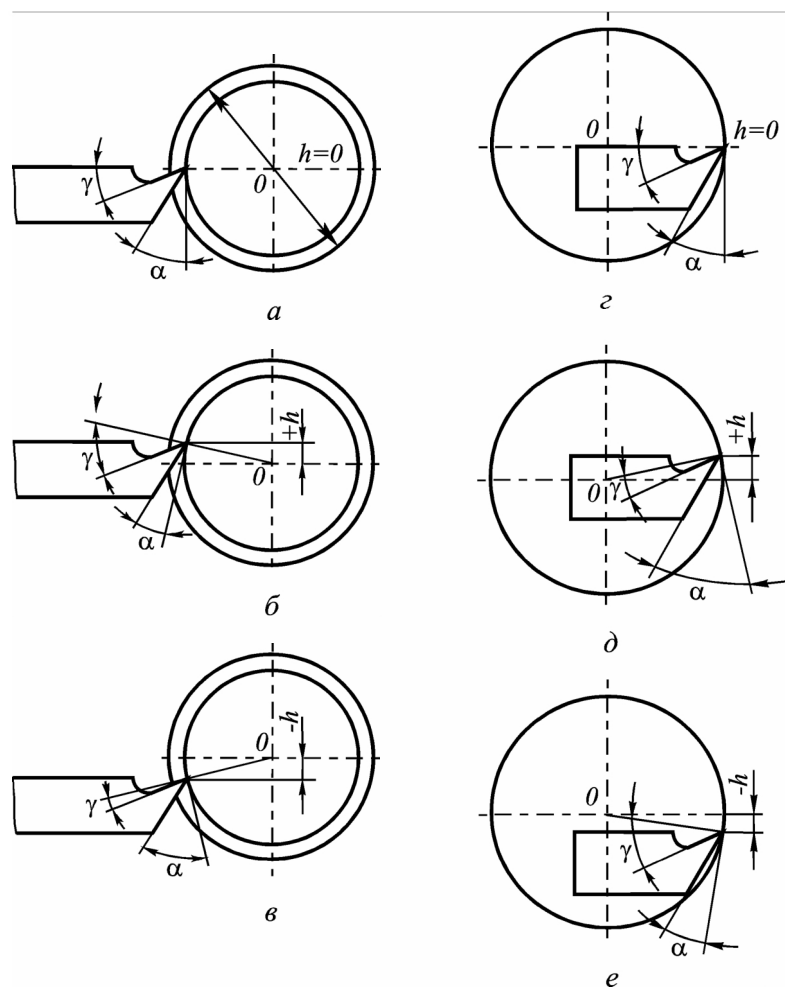


Рис. 1.5. Геометрические параметры резца в зависимости от положения:
а-в – при наружном точении; г-е – при растачивании

При обработке внутренних поверхностей заготовки эти закономерности меняются наоборот: если рассматриваемая точка режущей кромки располагается выше оси вращения заготовки (оси центров станка), то угол γ уменьшается, а если ниже – увеличивается. То есть:

- при наружном точении

$\gamma_y = \gamma_u + \mu$ – для точек режущей кромки, расположенных выше
оси вращения заготовки;

$\gamma_y = \gamma_u - \mu$ – для точек режущей кромки, расположенных ниже
оси вращения заготовки,

- при растачивании

$\gamma_y = \gamma_u - \mu$ – для точек режущей кромки, расположенных выше
оси вращения заготовки;

$\gamma_y = \gamma_u + \mu$ – для точек режущей кромки, расположенных ниже
оси вращения заготовки,

где γ_y – значение переднего угла в сечениях, проходящих через рассматриваемые точки режущей кромки, с учетом установки резца; γ_u – значение переднего угла в сечениях, проходящих через рассматриваемые точки режущей кромки, после заточки резца.

Для задних углов, исходя из классической зависимости $\gamma_y + \alpha_y + \beta = 90^\circ$, можно установить следующее:

- при наружном точении

$\alpha_y = \alpha_u - \mu$ – для точек режущей кромки, расположенных выше
оси вращения заготовки;

$\alpha_y = \alpha_u + \mu$ – для точек режущей кромки, расположенных ниже
оси вращения заготовки,

- при растачивании

$\alpha_y = \alpha_u + \mu$ – для точек режущей кромки, расположенных выше
оси вращения заготовки;

$\alpha_y = \alpha_u - \mu$ – для точек режущей кромки, расположенных ниже
оси вращения заготовки,

где α_y – значение заднего угла в сечениях, проходящих через рассматриваемые точки режущей кромки, с учетом установки резца;
 α_u – значение заднего угла в сечениях, проходящих через рассматриваемые точки режущей кромки, после заточки резца.

Рассмотренные изменения углов относятся к статическому расположению заготовки и резца. Вместе с тем, как уже отмечалось в 1.1.1, при токарной обработке имеют место два движения: главное движение резания и движение подачи. При этом результирующее движение изменяет форму поверхности резания, оно же приводит к изменению положения основной плоскости и плоскости резания, а следовательно, к изменению углов резца. Влияние кинематики продольного точения на изменение углов резца представлено на рис. 1.6.

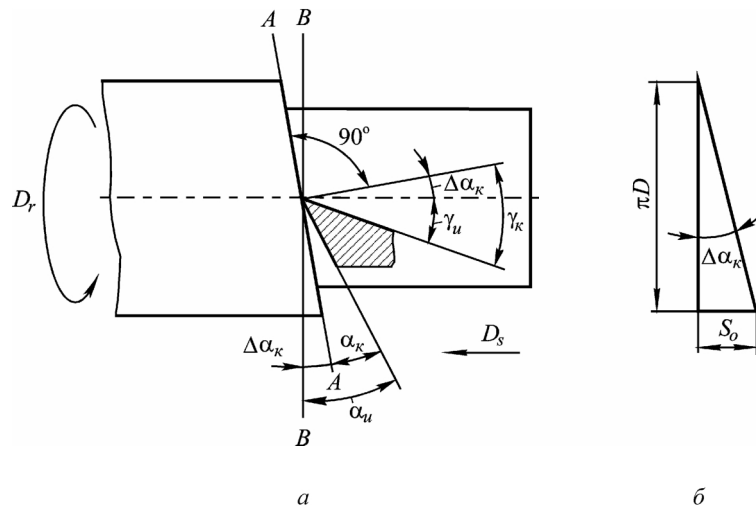


Рис. 1.6. Влияние кинематики процесса продольного точения
на изменение углов резца:

a – схема продольного точения; b – угол подъема винтовой поверхности резания

При точении, когда заготовка вращается, а резец движется вдоль её оси, поверхность резания представляет собой винтовую поверхность. След действительной плоскости резания А-А, касательной к поверхности резания, будет составлять со статической плоскостью резания В-В угол $\Delta\alpha_k$ (рис. 1.6, a), представляющий собой угол подъема винтовой поверхности резания (рис. 1.6, b). Вследствие этого вместо угла α_u при резании получается угол α_k , меньший по сравнению с углом α_u на величину $\Delta\alpha_k = \arctg \frac{S_o}{\pi D}$. Угол α_k именуется кинематическим главным задним углом. Из последней зависимости видно, что угол $\Delta\alpha_k$ увеличивается с увеличением подачи и уменьшением диаметра заготовки. При подачах, обычно используемых на операциях точения, значение угла $\Delta\alpha_k$ невелико, но при нарезании резьб оно может быть соизмеримо с углом α_u . Поэтому в этих случаях величина угла $\Delta\alpha_k$ принимается в расчет при назначении угла α_u . Поскольку положение основной плоскости при резании также изменится на угол $\Delta\alpha_k$, то угол γ_u будет увеличиваться на величину угла $\Delta\alpha_k$. В результате чего вместо угла γ_u при резании получается угол γ_k . Угол γ_k получил название кинематического главного переднего угла.

Таким образом, в реальных условиях обработки

$$\gamma_o = \gamma_u + \arctg \frac{S_o}{\pi D} \pm \mu;$$

$$\alpha_o = \alpha_u - \arctg \frac{S_o}{\pi D} \mp \mu,$$

где γ_o – действительный главный передний угол; α_o – действительный главный задний угол.

1.2.3. ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИН УГЛОВ РЕЗЦА НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ

Главный передний угол γ оказывает влияние на силы резания и на прочность режущего лезвия. Установлено, что увеличение угла γ ($\gamma > 0$) приводит к снижению сил резания и уменьшению прочности режущей кромки. Значения угла γ могут изменяться от $+30^\circ$ до -20° (см. рис. 1.4). Увеличение главного заднего угла α оказывает аналогичное влияние на характер изменения сил резания и прочность режущего клина, однако в меньшей степени. Величина угла α находится обычно в диапазоне от 4° до 12° .

Изменение величины углов ϕ и ϕ_1 оказывает влияние на прочность резца, его стойкость, величину и соотношение составляющих сил резания. Особенно их значения влияют на высоту шероховатости обработанной поверхности. Уменьшение величины этих углов (см. рис. 4) приводит к увеличению прочности и стойкости резца, снижает высоту шероховатости обработанной поверхности и увеличивает величину радиальной составляющей силы резания. При слишком малом значении угла ϕ резко возрастает отжим резца от заготовки и часто наблюдаются вибрации, в результате чего ухудшается качество обработанной поверхности и увеличивается износ инструмента [15]. Обычно угол ϕ выбирают в пределах от 15° до 95° в зависимости от вида обработки, типа резца, жесткости заготовки и резца и способа их крепления. Угол ϕ_1 составляет обычно $15...45^\circ$.

Углы λ и λ_1 влияют на прочность вершины резца. При положительных значениях этих углов прочность вершины резца выше, чем при отрицательных. Величины углов λ и λ_1 колеблются в пределах $-15^\circ...+15^\circ$. Если угол λ имеет положительное значение, то стружка отводится в сторону обработанной поверхности заготовки. В этом случае возможно её наматывание на заготовку и царапание обработанной поверх-

ности, поэтому такое расположение режущей кромки применяют при черновых и получистовых операциях. При чистовых операциях угол λ должен быть отрицательным, так как в этом случае стружка отводится вперед по направлению движения резца, в сторону необработанной поверхности заготовки. При $\lambda = 0$ стружка сходит в направлении, перпендикулярном главной режущей кромке инструмента.

1.2.4. НОМИНАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ СРЕЗА

В процессе токарной обработки при совершении заготовкой одного полного оборота инструмент переместится вдоль оси заготовки из положения I в положение II на величину подачи S_0 . При этом с заготовки будет срезан слой материала с поперечным сечением ABCD (рис. 1.7, а). Это поперечное сечение называется номинальным сечением среза.

Для количественной оценки срезаемого слоя вводятся два параметра: толщина срезаемого слоя (или среза) – a ; ширина срезаемого слоя (среза) – b (рис. 1.7, б).

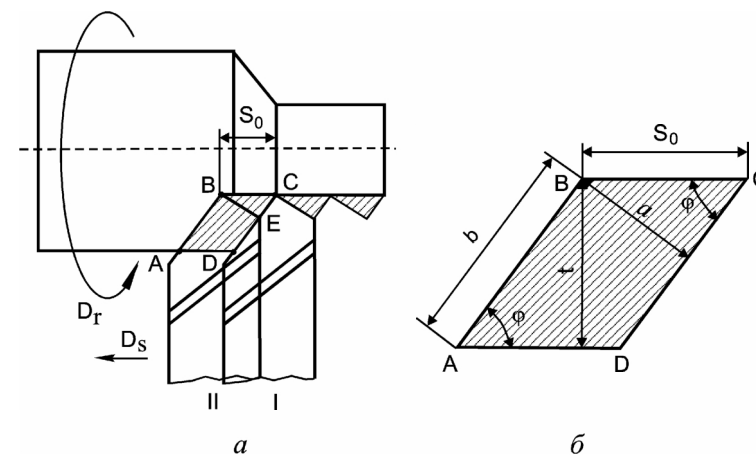


Рис. 1.7. Элементы режима резания при токарной обработке:
а – номинальное сечение среза; б – параметры среза; I, II – положения резца

Толщина срезаемого слоя – это расстояние по сечению среза, измеренное по нормали к главной режущей кромке инструмента: $a = S_o \sin \varphi$.

Ширина срезаемого слоя – это расстояние по сечению среза, измеренное вдоль главной режущей кромки инструмента: $b = t / \sin \varphi$.

1.2.5. ОСТАТОЧНОЕ СЕЧЕНИЕ СРЕЗА

В условиях реального формообразования поверхности детали при перемещении резца из положения I в положение II на обработанной поверхности заготовки остается часть несрезанного материала с поперечным сечением ВСЕ (см. рис. 1.7) и высотой h . Это обусловлено тем, что вершина резца в процессе обработки заготовки движется по винтовой линии. Данное сечение называется остаточным сечением среза.

Поскольку высота остаточных гребешков будет практически одинакова, то именно она будет определять геометрическую составляющую высоты микронеровностей Rz_p без учета приращений, обусловленных упругим восстановлением поверхностного слоя, пластическим течением металла и трением задней поверхности инструмента об обработанную поверхность.

На рис. 1.8 представлена величина остаточного среза после обточки заготовки. Как видно из рис. 1.8, высота остаточного среза h

может быть определена из треугольников ВКЕ и СКЕ: $BK = \frac{h}{\operatorname{tg} \varphi_1}$,

$$KC = \frac{h}{\operatorname{tg} \varphi}. \quad S_o = BK + KC, \quad \text{тогда} \quad S_o = \frac{h}{\operatorname{tg} \varphi_1} + \frac{h}{\operatorname{tg} \varphi} = h \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi} \right),$$

$$\text{откуда} \quad h(Rz_p) = S_o \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi} \right).$$

Данная зависимость справедлива, когда радиус при вершине резца $r = 0$. При $r \neq 0$ величину h можно определить по формуле

$$h(Rz_p) = \frac{\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1} \left[S_o - r \left(\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \operatorname{tg} \frac{\varphi_1}{2} \right) \right]. \quad (1.1)$$

На величину h влияют φ , φ_1 , r и S_o . Увеличение φ , φ_1 и S_o приводит к увеличению h . В то же время увеличение r ведет к снижению значений h . Вышеизложенное видно на рис. 1.9.

Для уменьшения высоты остаточного среза и, следовательно,

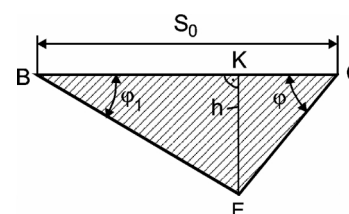


Рис. 1.8. Величина остаточного среза после обточки

шероховатости поверхности заготовки в первую очередь необходимо уменьшить φ , φ_1 или увеличить радиус при вершине r и только в последнюю очередь можно уменьшить подачу S_o , т.к. величина подачи в значительной мере влияет на производительность обработки.

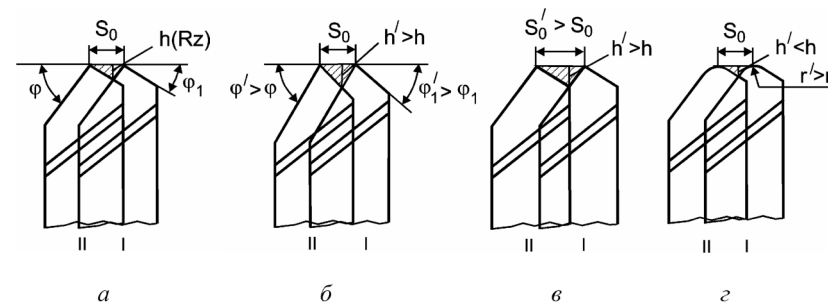


Рис. 1.9. Влияние главного и вспомогательного углов в плане, подачи и радиуса при вершине резца на высоту остаточного среза:

a – исходное состояние; b – влияние главного и вспомогательного углов в плане; v – влияние подачи; z – влияние радиуса при вершине резца; I, II – положение резца

Полученные выше зависимости для определения высоты остаточного сечения среза могут быть использованы лишь для прикидочного расчета шероховатости поверхности (Rz), так как реальная высота микронеровностей будет больше на величину ΔRz . Прира-

щение шероховатости поверхности обусловлено причинами, указанными ранее. Поэтому на практике пользуются эмпирическими зависимостями вида

$$Rz = \frac{C_h t^{x_h} S_o^{y_h} (\varphi \cdot \varphi_1)^{m_h}}{v^{z_h} r^{n_h}},$$

где C_h – коэффициент, учитывающий конкретные условия обработки (геометрию инструмента, свойства обрабатываемого и инструментального материалов, реальное состояние режущей кромки, смазывающе-охлаждающее технологическое средство и т.д.); t – глубина резания, мм; S_o – подача на один оборот заготовки, мм/об; v – скорость резания, м/мин; φ и φ_1 – главный и вспомогательный углы в плане, град; r – радиус при вершине резца, мм; x_h, y_h, z_h, m_h, n_h – показатели степеней, отражающие степень влияния каждого параметра на величину шероховатости.

1.2.6. МЕТОДЫ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Токарная обработка (точение) является наиболее распространенным методом обработки тел вращения, осуществляемым резцами на станках токарной группы. Основными операциями токарной обработки являются: обточка, расточка, подрезка торцов, прорезка канавок, отрезка заготовок, снятие фасок, получение галтелей, нарезание резьбы и т.д. Различают следующие виды точения [19]:

1) *черновое точение (обдирка)* – удаление дефектных слоев заготовок, разрезка, отрезка и подрезка торцов заготовок. Срезается поверхностная «корка» и основная (~70%) часть припуска на обработку, $Rz > 40$ мкм;

2) *получистовое точение* – снятие 20...25% припуска, позволяет получать шероховатость поверхности $Rz = 40...10$ мкм и точность 10...11-го квалитетов. Заготовка получает форму, близкую к форме изготавливаемой детали;

3) *чистовое точение* – обеспечивает получение шероховатости $Rz = 10...6,3$ мкм и точность 7...9-го квалитетов. Деталь получает окончательную форму и размеры;

4) *тонкое точение* – позволяет при срезании очень тонких стружек получать на поверхности детали шероховатость $Rz = 6,3...3,2$ мкм и точность 5...7-го квалитетов;

5) *специальные виды точения*:

5.1. *Скоростное точение* – обработка с большими скоростями. Обработка сталей в этом случае может выполняться при скоростях резания $v = 250...300$ м/мин, а цветных металлов и сплавов – при $v = 800...1000$ м/мин.

5.2. *Силовое точение* – снятие в единицу времени больших припусков. При этом виде точения значительно возрастают нагрузки, действующие на резец, поэтому осуществление силового точения возможно только на жестких и мощных станках.

5.3. *Виброточение* – наложение на резец высокочастотных и ультразвуковых колебаний, облегчающих пластические деформации, уменьшающих коэффициент трения и повышающих температуру.

5.4. *Точение с предварительным подогревом (глубоким охлаждением)* заготовки. Данные виды точения позволяют при определенных условиях повысить стойкость режущего инструмента в 1,5...3 раза и более.

1.2.7. ТОКАРНЫЕ РЕЗЦЫ

Токарные резцы относятся к наиболее распространенной группе режущих инструментов и классифицируются по назначению, направлению движения, форме режущей части и конструкции.

По назначению (рис. 1.10): проходные 6, 8 и проходные упорные 4; подрезные 1; отрезные и прорезные 5; расточные 9, 10; фасонные 2; резбовые 7; резцы для чистовой обработки 3 и др.

По направлению движения: правые и левые (рис. 1.11). У правых резцов при наложении на инструмент сверху ладони правой руки большой палец указывает на главную режущую кромку.

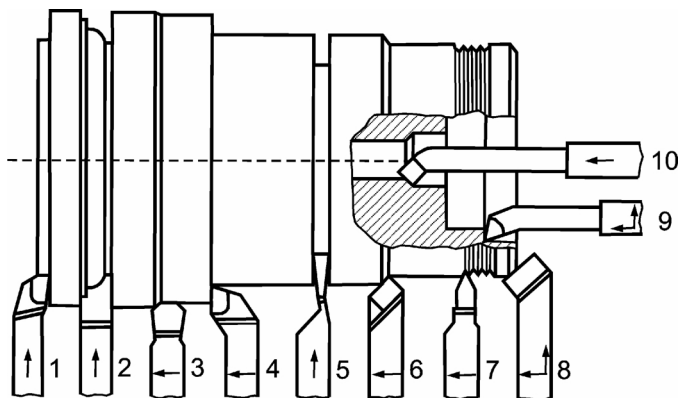


Рис. 1.10. Основные типы токарных резцов [19]

По форме головки (режущей части): прямые 3, 6; отогнутые 1, 4, 8, 9, 10; оттянутые 5, 7 и изогнутые.

По конструкции: цельные и сборные. Цельные резцы изготавливают из инструментальных сталей целиком, сборные резцы оснащают специальными режущими пластинами, что гораздо экономичнее и выгоднее. Сборные резцы различаются между собой по способу крепления режущих пластин. Крепление пластин к державке может осуществляться сваркой, пайкой, приклеиванием, механическим креплением.

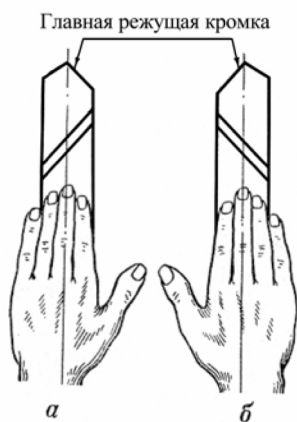


Рис. 1.11. Способ определения правого и левого резцов:
а – левый; б – правый

Резцы с напаянными или приваренными пластинами просты в изготовлении. Однако державка резца после износа режущей пластины подлежит утилизации. Кроме того, при сварке и пайке пластин могут возникать микротрещины, что приводит к разрушению режущих кромок в процессе резания.

Механический способ крепления пластин получил наиболее широкое распространение у резцов с многогранными неперетачиваемыми пластинами (рис. 1.12). У таких резцов державка может использоваться многократно, что, безусловно, снижает их себестоимость.

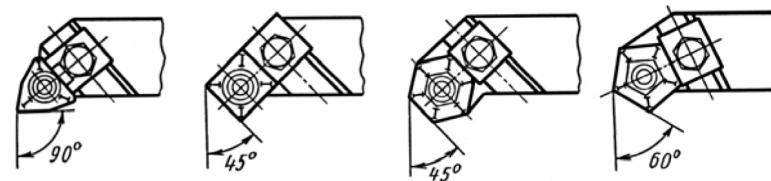


Рис. 1.12. Типы резцов с многогранными неперетачиваемыми пластинами

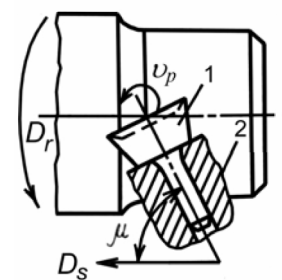


Рис. 1.13. Схема точения резцом с круглой самовращающейся режущей пластинкой:
1 – режущая пластинка;
2 – корпус резца

Стремление конструкторов и технологов повысить стойкость и работоспособность инструментов привело к созданию резцов с самовращающимися (силами трения) круглыми режущими пластинами. Круглые самовращающиеся резцы (КСВР) имеют сложную сборную конструкцию, обеспечивающую легкое самовращение режущего элемента 1, закрепленного в корпусе резца 2 (рис. 1.13) [19]. Самовращение круглой режущей пластинки под действием сил трения достигается путем определенной установки резца под углом μ по отношению к оси заготовки. Подобные резцы применяются при обработке жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и титановых сплавов в условиях получистового и чистового точения. Повышение стойкости пластин в 2...4 раза и снижение шероховатости обработанной поверхности обусловлены хорошим теплоотводом в резец и снижением

сил трения за счет эффективного действия смазочно-охлаждающих жидкостей, подаваемых в зону резания.

ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 1

1. Какие поверхности различают на обрабатываемой заготовке?
2. Какие движения необходимы для обеспечения процесса резания?
3. Какова наивыгоднейшая форма режущего зуба?
4. Какие плоскости и поверхности являются координирующими для определения геометрии режущего лезвия?
5. Как определяется положение координатных плоскостей в инструментальной системе координат?
6. Как определяется положение координатных плоскостей в статической системе координат?
7. Как определяется положение координатных плоскостей в кинематической системе координат?
8. Из каких элементов состоит рабочая часть резца?
9. Какие углы режущего лезвия определяются в главной секущей плоскости?
10. Какие углы режущего лезвия определяются во вспомогательной секущей плоскости?
11. Какие углы режущего лезвия определяются в плоскости резания?
12. Какие углы режущего лезвия определяются в основной плоскости?
13. Как изменяются углы резца в зависимости от положения режущей кромки относительно оси вращения заготовки?
14. Как изменяются углы резца в процессе резания?
15. Как влияет передний угол режущего лезвия на процесс резания?
16. Как влияет задний угол режущего лезвия на процесс резания?
17. Как влияет главный угол в плане на процесс резания?
18. Как влияет вспомогательный угол в плане на процесс резания?
19. Как влияет угол наклона главной режущей кромки на процесс резания?
20. Какие параметры определяют режим обработки?
21. Какими резцами целесообразно проводить наружную обточку заготовок?
22. Какими резцами целесообразно проводить подрезку торца заготовок?
23. Какими резцами целесообразно обрабатывать профильные поверхности?
24. Какими резцами обрабатывают глухие отверстия?
25. Какими резцами обрабатывают сквозные отверстия?
26. Каковы преимущества и недостатки резцов с круглыми самовращающимися режущими пластинами?

2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Способность режущего инструмента обеспечивать требуемую производительность обработки во многом определяется свойствами инструментального материала, которым оснащена его режущая часть. Инструментальные материалы условно группируются в соответствии с их составом и свойствами. Условная схема их классификации представлена на рис. 2.1 [23].

2.1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Инструментальные материалы должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обладать высокими механическими характеристиками (твёрдостью, прочностью, ударной вязкостью);
- 2) быть химически инертными к обрабатываемому материалу. То есть режущий инструмент нужно подбирать таким образом, чтобы исключить совпадение химических элементов, входящих в состав инструмента и заготовки. В том случае, если в инструменте и в заготовке количество одних и тех же элементов превышает 3...5%, то возможно «химическое сродство», приводящее к интенсивному износу режущего инструмента;
- 3) обладать высокой теплостойкостью, теплопроводностью и быть малочувствительными к циклическим колебаниям температуры. Теплостойкость – это свойство инструментального материала сохранять твёрдость, а следовательно, и режущие свойства при высоких температурах;

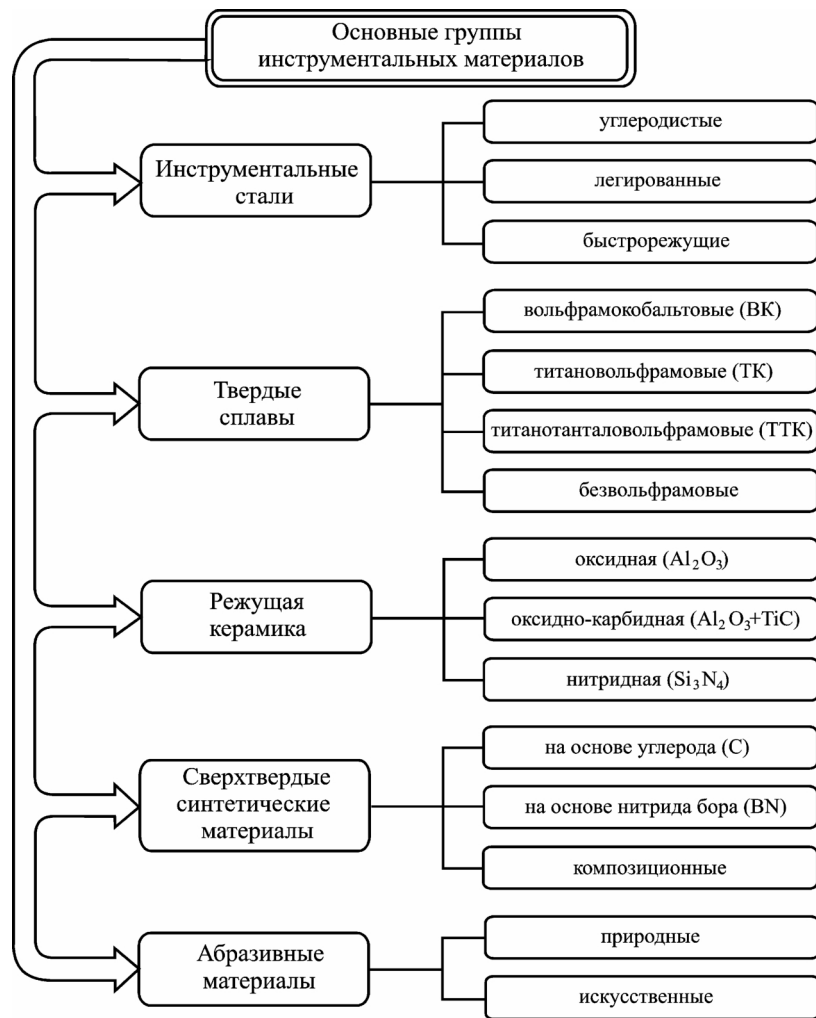


Рис. 2.1. Условная схема классификации инструментальных материалов

4) иметь высокую износостойкость – способность инструментального материала сопротивляться изнашиванию при трении с обрабатываемым материалом;

5) обладать хорошей обрабатываемостью, так как многие режущие инструменты имеют сложную фасонную форму, т.е. быть достаточно технологичными;

6) быть относительно дешевыми.

В настоящее время не существует универсального инструментального материала, который в полной мере удовлетворял бы перечисленным требованиям [3, 6, 19].

2.2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

2.2.1. УГЛЕРОДИСТЫЕ И ЛЕГИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Химическим элементом, определяющим физико-механические свойства этих групп материалов, является углерод. Он образует карбиды железа, которые участвуют в процессе термообработки, активно участвуют в фазовых превращениях и образовании твердой мартенситной структуры.

Для изготовления режущих инструментов используют *углеродистые стали* марок от У7А до У13А. Цифрами в обозначении данных сталей указано содержание углерода в десятых долях процента.

Углеродистые стали при термообработке не дают равномерной по объему твердости, она уменьшается от поверхности к сердцевине инструмента. Так, на поверхности твердость может быть равна $61...64 HRC_3$, а в сердцевине – уменьшиться до $41 HRC_3$.

В процессе термообработки заготовки из этих сталей склонны к поводке и трещинообразованию. Изготовленные режущие инструменты имеют низкую теплостойкость ($200...250^{\circ}C$). Поэтому из углеродистых сталей изготавливают малогабаритные инструменты, обрабатывающие материалы с низкими механическими свойствами на малых скоростях резания. Используют такой инструмент в условиях единичного и мелкосерийного производства, а также для изготовления слесарного, кузнечного и деревообрабатывающего инструмента.

Легированные инструментальные стали отличаются от углеродистых наличием в них повышенного содержания кремния и марганца, а также одного или нескольких легирующих элементов: хрома, вольфрама, ванадия и др., – которые повышают твердость, прочность и износостойкость инструмента.

Для режущих инструментов используются стали марок 9ХС, 9ХФ, ХВГ, ХВСГ, Х6ВФ, 9Х5ВФ и др. Теплостойкость сталей этой группы на 100...200 °С превышает теплостойкость инструментальных углеродистых сталей и составляет 350...400 °С. Легированные стали более технологичны: лучше прокатываются и закаляются, меньше склонны к короблению. Эти стали за некоторым исключением применяются для изготовления того же инструмента, что и углеродистые стали. В частности, из этих материалов изготавливают метчики, круглые плашки, резьбонакатной инструмент, матрицы и пуансоны вырубных и просечных штампов и т. д.

2.2.2. БЫСТРОРЕЖУЩИЕ СТАЛИ

Быстрорежущие стали отличаются от ранее рассмотренных материалов высоким содержанием легирующих элементов – вольфрама, хрома, молибдена, ванадия, кобальта.

Вольфрам и молибден повышают износостойкость и теплостойкость сталей до 600...635 °С. Стойкость инструментов из быстрорежущих сталей в 4...8 раз выше, чем из углеродистых сталей, а при равной стойкости инструменты из быстрорежущих сталей обеспечивают повышение скорости резания в 2...3 раза по сравнению с инструментами из углеродистых сталей [23].

Быстрорежущие стали условно можно разделить на две группы: общего назначения (нормальной производительности) и повышенной производительности [23].

К быстрорежущим сталям нормальной производительности относятся вольфрамовые стали марок Р9, Р12, Р18 и вольфрамомолибденовые стали марок Р6М3, Р6М5, Р9М4, Р12М3. Содержание

легирующих элементов в них определяется в процентах числом, стоящим после буквенного обозначения.

Рассмотренные стали содержат от 6 до 18% вольфрама (число после буквы Р). Их твердость после термообработки составляет 63...66 HRC₃, теплостойкость не превышает 620 °С, предел прочности на изгиб $\sigma_u \leq 3000...4000$ МПа.

Из этих сталей изготавливают все типы металлорежущих инструментов, в том числе сложного профиля. Введение в состав сталей 3...5% молибдена позволило повысить ударную вязкость и пластичность.

К быстрорежущим сталям повышенной производительности относятся стали, имеющие в своем составе увеличенное содержание по сравнению с обычными быстрорежущими сталями углерода (это стали 10Р8М5 и 10Р8М3), ванадия (Р12Ф3, Р14Ф4, Р18Ф2) и кобальта (Р9К5, Р9К10, Р9Ф2К10, Р18Ф2К5).

Повышенное содержание углерода (на 0,1...0,2%) увеличивает вторичную твердость сталей до 67...67,5 HRC₃ и теплостойкость до 635 °С, улучшает износостойкость за счет увеличения количества карбидов. Стойкость инструмента при этом увеличивается до 75% при той же скорости резания.

Наличие в быстрорежущих сталях ванадия в количестве от 1 до 1,4% также обеспечивает повышение их твердости до 67...68 HRC₃ при теплостойкости порядка 635 °С. Вместе с тем следует отметить, что главным недостатком быстрорежущих сталей, содержащих ванадий, является их плохая обрабатываемость шлифованием.

Введение в состав быстрорежущих сталей кобальта повышает их теплопроводность и теплостойкость (~650 °С) и одновременно твердость до 66...70 HRC₃.

Некоторые марки быстрорежущих сталей приведены в табл. 2.1. В маркировке этих сталей цифра перед буквой Р обозначает содер-

жание углерода в десятых долях процента, цифры за буквами Р, М, Ф, К и А обозначают, соответственно, процентное содержание вольфрама, молибдена, ванадия, кобальта и азота.

Таблица 2.1

Марки и химический состав отечественных быстрорежущих сталей (ГОСТ 19265-73) и аналоги других стран, соответствующие этим маркам

Марка стали	Аналоги стандартов других стран					
	BS Англия	DIN Германия	DN-86/ H-85022 Польша	AISI США	NFA Франция	JIS Япония
P18	BT2	1,3355 S18-0-1 1,3558 X7SWCrV1841	SW18	T1	18-0-1	КН-2
P6M5	BM1	—	SW7M	M2C.1	6-5-2	КН-9
11P3AM3Ф2	—	—	—	—	—	—
P6M5Ф3	—	S6-5-3	—	M3	—	КН-52
P12Ф3	—	—	SW12	—	—	—
P18K5Ф2	BT4	1,3558 S18-1-2-5	—	T4	—	—
P9K5	—	—	SK5	—	—	—
P6M5K5	—	S6-5-2-5	SK5M	—	6-5-2-5	КН-55
P9M4K8	0	0	SK10V	0	—	—
P2AM9K5	—	—	SK8M	—	—	—

Улучшение технологических свойств быстрорежущих сталей достигается путем изготовления их методами порошковой металлургии.

Порошковые быстрорежущие стали имеют равномерную однородную мелкозернистую структуру и обозначаются буквами МП. Современная промышленность выпускает порошковые быстроре-

жущие стали следующих марок: P12M3Ф2K8-МП, C12MФ5-МП, C9M4K8-МП, P6M5K5-МП, P0M2Ф3-МП. Их твердость и ударная вязкость выше твердости и ударной вязкости традиционных быстрорежущих сталей, соответственно, на две единицы и 2...6 раз. Кроме того, порошковые быстрорежущие стали достаточно хорошо обрабатываются резанием, а при их упрочнении имеют место незначительные искривления формы инструмента. Период стойкости режущих инструментов из таких сталей возрастает до 1,5-кратной величины.

Порошковые быстрорежущие стали рекомендуется применять для изготовления инструментов, обрабатывающих титановые сплавы, высоколегированные стали и другие труднообрабатываемые материалы в тяжелых условиях резания, а именно: при прерывистой обработке, ударных нагрузках, повышенных скоростях резания.

К сравнительно новым инструментальным материалам относятся дисперсионно-твердеющие быстрорежущие стали.

Дисперсионно-твердеющие быстрорежущие стали (с интерметаллидным упрочнением) имеют пониженное содержание углерода (0,1...0,3%), повышенную твердость после отпуска ($70 HRC_9$) и теплостойкость до $725^{\circ}C$. Основными легирующими элементами в этих сталях являются кобальт (16-25%), вольфрам (11-20%) и молибден (4-7%).

К «безуглеродистым» дисперсионно-твердеющим сталям ($C < 0,06\%$) относятся стали марок В3М12К23, В14М7К25, В18М7К25, В18М4К25, В7К25, а к «углеродистым» ($C = 0,1...0,3\%$) – 25В20К25ХФ и 30В20К16.

Инструменты из дисперсионно-твердеющих быстрорежущих сталей применяются для точения, сверления, фрезерования и строгания труднообрабатываемых материалов и титановых сплавов, обеспечивая повышение стойкости в 30-80 раз по сравнению со сталью P18 [4, 23], а при резании жаропрочных сплавов и нержавеющей сталей с аустенитной структурой – в 10...20 раз по сравнению с P12Ф4К5 [23].

2.3. ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Главными компонентами твердых сплавов являются карбиды вольфрама (WC), титана (TiC), тантала (TaC) и ниобия (NbC), частицы которых соединены связкой из сравнительно мягкого и тугоплавкого кобальта ($t_{пл} = 1493^{\circ}\text{C}$).

Твердые сплавы получают методом порошковой металлургии в виде пластин или коронок различной формы. Одним из основных свойств металлокерамических твердых сплавов является высокая теплостойкость (до $900-1000^{\circ}\text{C}$), что позволяет осуществлять обработку материалов в зависимости от их марки при скоростях до 600 м/мин [7].

2.3.1. ГРУППЫ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Применяемые для механической обработки твердые сплавы подразделяются на следующие группы [23].

Вольфрамовые (однокарбидные) твердые сплавы (ВК), состоящие из зерен карбида, связанных кобальтом. Материалы этой группы содержат от 3 до 22% кобальта. В зависимости от состава и зернистости предел прочности при изгибе у твердых сплавов данной группы ВК изменяется в диапазоне от 1170 до 2100 МПа, а твердость – от 82 до 91 HRA. Марки сплавов вольфрамовой группы обозначаются буквами ВК, после которых цифрами указывается процентное содержание в сплаве кобальта. Например, сплав ВК8 содержит 8% кобальта (Co), остальное (92%) – карбид вольфрама (WC).

В настоящее время в России выпускаются следующие марки твердых сплавов вольфрамовой группы: ВК3, ВК3-М, ВК4-В, ВК6, ВК6-М, ВК6-0М, ВК6-В, ВК8, ВК8-В, ВК8-ВК, ВК10, ВК10-Х0М, В10-КС, ВК11-В, ВК11-ВК, ВК15, ВК20, ВК20-КС (ГОСТ 3882-74).

Буквы, стоящие в конце маркировки, указывают на размер карбидных зерен (мкм): М – (1,0-1,5) мелкозернистый, 0М – (0,1-1,0)

особомелкозернистый, В – (3-5) крупнозернистый. У обычных сплавов (без букв в маркировке) размер карбидов составляет около 2 мкм. Мелкозернистые сплавы по сравнению с обычными твердыми сплавами имеют плотную структуру, более износостойкие, но менее прочные. Крупнозернистые сплавы являются более прочными, лучше сопротивляются ударным нагрузкам, но менее износостойкие.

Вольфрамовые твердые сплавы рекомендуется использовать при обработке заготовок из конструкционных сталей в условиях низкой жесткости технологической системы, при прерывистом резании и работе с ударами, а также для обработки хрупких материалов – чугуна, стеклопластиков, цветных сплавов, в частности, титановых.

Титановольфрамовые (двухкарбидные) твердые сплавы (ТК), кроме карбидов вольфрама и кобальта, содержат карбиды титана. По ГОСТ 3882-74 выпускаются следующие марки твердых сплавов группы ТК: Т30К4 (30% TiC + 4% Co + 66% WC), Т15К6, Т14К8, Т5К10, Т5К12.

Сплавы этой группы предназначены в основном для обработки сталей. По сравнению с однокарбидными сплавами (ВК) они обладают большей стойкостью к окислению, твердостью (87-92 HRA) и теплостойкостью, но меньшей теплопроводностью и прочностью.

Сплавы Т14К8, Т5К10, Т5К12 рекомендуется использовать для чернового точения заготовок, сплав Т15К6 применяется для получистовой и чистовой обработки и сплав Т30К4, обладающий наибольшей износостойкостью и допускающий скорость резания до 500 м/с, применяется для чистовой и тонкой обработки точением и фрезерованием.

Титанотанталовольфрамовые (трехкарбидные) твердые сплавы (ТТК) содержат WC, TiC, TaC и в качестве связки Co. Промышленностью выпускаются трехкарбидные сплавы следующих марок: ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ10К8Б, ТТ20К9. Цифра, стоящая после букв ТТ, указывает суммарное содержание карбидов Ti и Ta, а после буквы К – процентное содержание Co. Основной составляющей в этих

сплавах также являются карбиды вольфрама. Например, сплав ТТ20К9 содержит: 20% (TiC + TaC) + 9% Co + 71% WC. В этих сплавах карбид тантала повышает предел усталости при циклическом нагружении, теплостойкость, прочность и твердость. Твердость и предел прочности на изгиб в сплавах группы ТК в зависимости от марки сплава колеблются, соответственно, в пределах 87-92 HRA и $\sigma_u = 1320-1670$ МПа. Поэтому их используют при черновой обработке с большими сечениями срезаемого слоя, при работе с ударами.

Безвольфрамовые твердые сплавы разработаны с целью экономии таких дефицитных материалов, как вольфрам и кобальт. Определяющим компонентом этих сплавов является карбид титана. Отечественная промышленность выпускает сплавы на никель-молибденовой связке следующих марок: ТНМ20, ТНМ25, ТНМ30, КТНМ30А, МНТ-А2, МНТ-Б2 и др.

Безвольфрамовые твердые сплавы обладают низкой окисляемостью, имеют большую теплостойкость, меньшие коэффициенты трения и теплопроводности, менее склонны к наростообразованию, чем вольфрамосодержащие твердые сплавы. Повышенная износостойкость способствует высокой размерной стойкости инструмента, меньшей шероховатости и большей точности обработки. Твердость безвольфрамовых сплавов лежит в пределах 87,5-91 HRA, а предел прочности на изгиб $\sigma_u = 980-1710$ МПа.

В ГОСТ 26530-85 внесены только две марки безвольфрамовых твердых сплавов, а именно: ТН20 и КНТ-16. Сплав ТН20 рекомендуется применять для чистового точения углеродистых, низколегированных конструкционных сталей, цветных металлов на основе меди, низколегированных сплавов никеля, серых чугунов в условиях непрерывного резания, а также для получистового и чистового торцевого фрезерования заготовок из чугуна. Сплав КНТ-16 за небольшим исключением целесообразно использовать в тех же условиях, что и сплав ТН20 [23].

В настоящее время для изготовления безвольфрамовых твердых сплавов применяется инновационная технология, основанная на самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС). Указанным методом получены новые марки сплавов, названные СТИМ – синтетические твердые инструментальные материалы.

Физико-механические свойства синтетических твердых сплавов приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Физико-механические свойства СТИМ [23]

Марка сплава	Плотность, г/см ³	Средний размер зерна, мкм	Твердость, HRA	σ_u , МПа	Ударная вязкость, Н·м/см ²
СТИМ-1Б/3	4,94	5-7	93,5	700-800	0,9
СТИМ-2	5,50	5-7	90,0	1000-1100	1,5
СТИМ-2А	6,40	1-2	87,0	1700-1800	1,2
СТИМ-3Б	5,37	3-5	92,5	900-1000	0,9

Как показывает производственный опыт, платины из СТИМ целесообразно применять на получистовых и чистовых операциях точения конструкционных и легированных сталей, твердость которых не превышает 53 HRC₉, и чугуна. При этом коэффициент повышения стойкости синтетических твердых сплавов по отношению к сплаву Т15К6 составляет от 1,5 до 5.

В отечественном машиностроении, наряду с российскими инструментальными материалами, приведенными ранее, эффективно используются твердые сплавы различных иностранных фирм (Sandvik Coromant, Kennametal Hertel, Mitsubishi Carbide, SECO, Krupp Widia, ISCAR, KORLOY и др.), состав которых регламентируется национальными стандартами и ISO. По ISO 513-75 твердые сплавы делятся на три группы – Р, М и К, в зависимости от физико-механических свойств материалов, обрабатываемых этими сплавами. Каждая груп-

па сплавов в соответствии с ISO обозначается разными цветами и имеет марки с номерами от 01 до 40. Увеличение номера соответствует увеличению прочности и снижению износостойкости сплава. В табл. 2.3 представлены твердые сплавы по ISO и их российские аналоги, а в табл. 2.4 – рекомендации по их использованию.

Таблица 2.3

Твердые сплавы по ISO и их российские аналоги [23]

Группа сплавов	Маркировочный цвет	Марки сплавов	HRA	σ_u , Н/мм ²	Ориентировочный состав, %			Отечественные аналоги по ГОСТ 3882-74
					WC	TiC+TaC	Co	
Р	Синий	P01	91,5-93	980	32	56	12	T30K4
		P10	90-92	1270	55	36	9	T15K6
		P20	90-91,5	1470	76	14	10	T14K8
		P25	90-91	1714	70	20	10	TT20K9
		P30	89-91	1760	82	8	10	T5K10, TT10K8Б
		P40	88-90	1860	74	12	14	T5K12, TT7K12
		P50	-	-	-	-	-	TT7K12
К	Красный	K01	91,5-93	1180	92	4	4	BK3, BK3-M, BK6-OM
		K05	-	-	-	-	-	BK6-M, TT8K6
		K10	90-92	1470	92	2	6	BK6
		K20	89-90,5	1660	92	2	6	BK8, BK8-M
		K30	87,5-89	1960	93	-	7	BK6, BK6-M
		K40	87-88	2150	88	-	12	BK8
М	Желтый	K50	-	-	-	-	-	BK10
		M05	-	-	-	-	-	BK6-OM, BK3-M
		M10	90,8-92	1320	84	10	6	TT8K6, BK6-M
		M20	-	1620	82	10	8	TT10K8Б
		M30	90-91,5	-	-	-	-	BK10-OM, BK10-M
		M40	87,5-89	2060	79	6	15	TT7K12, BK10-XOM

Таблица 2.4

Марки и области применения твердых сплавов по ISO

Группа сплавов	Марка сплава	Область применения
Р	01, 10, 15	Чистовая и получистовая обработка стали и стального литья при благоприятных условиях. Рекомендуются высокие скорости резания и небольшие подачи без использования СОЖ.
	10, 15, 20, 25, 30, 35	Чистовая и получистовая обработка стали и стального литья, ковкого и модифицированного чугунов, образующих сливную стружку.
	25, 30, 35, 40, 50	Чистовая и получистовая обработка стали и стального литья, ковкого и модифицированного чугунов. Относительно высокие скорости резания и подачи.
М	10	Чистовая и получистовая обработка жаропрочных и нержавеющей сплавов. Сравнительно высокие скорости резания и небольшие подачи.
	20, 30	Чистовая и получистовая обработка жаропрочных и нержавеющей сплавов.
	40	Чистовая и получистовая обработка жаропрочных и нержавеющей сплавов по корке и окалине. Рекомендуются низкие скорости резания, значительные подачи.
К	01, 05, 10, 15, 20	Чистовая и получистовая обработка легированного чугуна, медных сплавов.
	05, 10, 15, 20, 25	Чистовая и получистовая обработка серого чугуна, обработка ковкого и модифицированного чугунов.
	10, 15, 20, 25, 30	Обработка чугунов и медных сплавов в неблагоприятных условиях. Рекомендуются невысокие скорости резания, значительные подачи.

Таблица 2.5

Марки твердых сплавов по российским и зарубежным стандартам [23]

Россия	США	Германия	Япония	Австрия	Швеция	Польша	ISO
ГОСТ 3882-74	Kenna- metal	Krupp Widia	Mitsubishi metal	Plansee Tizit	Sandvik Coromant	PN-60/H- 89500	513-75
BK3-M	K11	THF	THi 05T	H03T	H05	-	K01
BK6-0M	K68	THM-F	THi 10	H05T	H1P	-	-
BK6	K6	THM	THi 20	H20T	H20	H30	K30
BK8	K1	THR	-	H25T	R4	H40	K40
BK10-X0M	K314	THR-F	-	H30T	H10F	-	M30
BK20	K90	GT40-	GTi35-	H60T-	--	--	--
T30K4	K7H	TT1	-	S05T	F02	-	P01
T15K6	K5H	TTX	ST:10T	S10T	S1P	S10	P10
T5K10	K2S	TTS	ST:20T	S36T	S4	S30	P30
TT7K12	K420	TTR	ST:40T	S40T	S6	-	P50
TT10K8B	K21	AT15S	UT:20T	U20T	H13A	-	M20
TT20K9	K29	TTM	ST:25T	S26T	SM	S25	P25
TT8K6	K313	-	UT:10T	U10T	RIP	U10	M10
TH-20	-	-	NX22	-	CT515	-	-
KHT-16	K162B	-	NX33	-	CT520	-	-

2.3.2. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

В связи с необходимостью непрерывного повышения производительности обработки и использованием в различных конструкциях новых материалов сформулированы следующие пути совершенствования твердых сплавов [23]:

- разработка универсальных по применимости твердых сплавов, что позволит сократить их номенклатуру;
- разработка новых составов твердых сплавов с использованием менее дефицитных материалов;
- разработка новых составов покрытий и технологий их нанесения;

- создание твердых сплавов с градиентными свойствами.

Эффективным методом повышения стойкости и режущей способности твердосплавных режущих инструментов является нанесение износостойких покрытий. Материалами для таких покрытий служат карбиды, нитриды, бориды, карбонитриды и силициды тугоплавких металлов, а также оксид алюминия и синтетические сверхтвердые материалы на основе алмаза и эльбора. На практике применяют две группы технологических методов их нанесения:

- химическое осаждение из газовой фазы – CVD (chemical vapour deposition);
- физическое осаждение из газовой фазы – PVD (physical vapour deposition).

Инструменты с покрытиями обеспечивают повышение в 3-5 раз периода стойкости или примерно на 10...30% – скорости резания при неизменной стойкости по сравнению с инструментами, оснащенными твердосплавными пластинами без покрытия.

Износостойкие покрытия формируют на основе одного или нескольких слоев. Толщина однослойных покрытий составляет порядка 3-4 мкм, двух- и трехслойных – 5-8 мкм, а в некоторых случаях – до 12 мкм.

Основные марки отечественных и зарубежных твердых сплавов с покрытиями приведены в таблице 2.6 [4, 23].

Одним из значимых направлений в совершенствовании структуры твердых сплавов является уменьшение размера зерна твердосплавного порошка.

Уменьшение зернистости порошка существенно влияет на изменение физико-механических свойств твердого сплава, а именно: приводит к повышению твердости, прочности на изгиб, ударной вязкости. Важным следствием уменьшения размера зерна является возможность получения более острой кромки с меньшим радиусом

скругления, что приводит к снижению сил резания и тепловыделения в зоне обработки.

Таблица 2.6

Твердые сплавы с износостойкими покрытиями, изготавливаемые в России и за рубежом

№	Фирма, страна	Наименование пластин	Тип покрытия	Число слоев	Толщина покрытия, мкм
1	Россия	BK6	TiC–TiCN–TiN	-	6...8
2	Россия	BK8	TiC–TiCN–Al ₂ O ₃	-	10
3	Россия	T5K10	TiC–TiCN–TiN	-	8
4	Россия	T17K9	TiC–TiCN–TiN	-	-
5	Россия	T30K4	TiC–TiCN–TiN	-	8
6	Россия	TT7K12	TiC–Al ₂ O ₃	-	6...8
7	Россия	TT10K8B	TiC–Al ₂ O ₃ –TiN	-	10
8	Edgar Allen Tools Ltd (Англия)	P20	TiN	1	8-12
9	Kennametal (США)	KC 850 KC 950	TiC–TiCN–TiN TiC–Al ₂ O ₃ –TiN	3 3	10 10
10	Carbex SA (Франция)	RW2110 RW2115	TiC–TiN TiC–Al ₂ O ₃ –TiN	2 3	8 6-7
11	Krupp Widia (ФРГ)	TZ 15	TiC–TiCN–Ti(CN) ₂ –ZrN	4	11
12	Sandvik Coromant (Швеция)	GC400	TiC–Al ₂ O ₃ –TiN	3	-
13	Sandvik J. (Япония)	GC135 GC 315	TiC–Al ₂ O ₃	2	5-7

Кроме того, уменьшение зернистости порошка вызывает снижение теплопроводности сплава и перераспределение тепловых потоков в зоне обработки, т.е. повышение доли тепла, уходящего в стружку.

Совершенствование технологий прессования и спекания пластин из твердого сплава позволяет получать пластины с градиентными свойствами, у которых поверхностные слои имеют уменьшенное содержание связки, что обеспечивает большую твердость и износостойкость по сравнению с более вязкой и прочной основой.

2.4. РЕЖУЩАЯ КЕРАМИКА

Основным материалом для изготовления режущих элементов из керамики является измельченный до 1-2 мкм порошок корунда (Al_2O_3) с небольшой добавкой (0,5...1,0 %) оксида магния MgO .

Режущая керамика по сравнению с твердыми сплавами имеет более высокую твердость (95HRA), повышенную теплостойкость (до 1400 °C), высокую износостойкость, обладает химической инертностью к металлам. Кроме того, минералокерамика является весьма экономичным материалом, так как не содержит дорогостоящих и дефицитных элементов. Недостатками минералокерамики являются низкая ударная вязкость и пластичность, а также невысокая сопротивляемость циклическим силовым и тепловым нагрузкам.

Выпускаемая в настоящее время режущая керамика подразделяется на три группы [23].

В первую группу входит оксидная керамика (белая), состоящая из оксида алюминия (Al_2O_3 – до 99,7 %) и незначительного количества оксидов других металлов.

Наибольшее применение из данной группы получили BO13 и ВШ75 ($\sigma_u = 400-550$ МПа, 91-93 HRA, теплостойкость 1200 °C).

Вторая группа включает в себя оксидно-карбидную (черную) керамику, которая по составу является промежуточной композицией между чисто оксидной керамикой и твердым сплавом.

В качестве карбидной составляющей в этой керамике используются карбиды тугоплавких металлов, таких как вольфрам, молибден и титан.

Процентное содержание карбидов по массе в черной керамике меняется от 20 до 40. Представителями данной группы режущей керамики являются материалы марок ВЗ, ВOK60, ВOK63, ВOK71, ВOK95.

В третью группу режущей керамики входят материалы на основе нитрида кремния: силинит-Р (композиция 36,6 % Si_3N_4 +15,4 % Al_2O_3 +41,8 % TiN) и кортинит ОНТ20, получаемые методом горячего прессования. Силинит-Р имеет $\sigma_u = 500-700$ МПа, 94-96 HRA, теплостойкость 1200°C , а кортинит – $\sigma_u = 650-860$ МПа, 93-95 HRA, теплостойкость $1250-1400^\circ\text{C}$.

Дополнительными достоинствами силинита-Р являются отсутствие в его составе WC и его соединений, отсутствие адгезии по отношению к черным и цветным металлам. Основная область применения инструментов на основе минералокерамики – тонкое, чистовое и получистовое точение (расточивание) и торцевое фрезерование на оборудовании, имеющем высокую жесткость.

2.5. СВЕРХТВЕРДЫЕ СИНТЕТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Развитие физики высоких давлений способствовало созданию широкой номенклатуры различных синтетических сверхтвердых материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора (эльбора).

Синтетические алмазы и эльбор производятся в виде:

- порошкообразных материалов, применяемых для изготовления различных абразивных инструментов;

- поликристаллических материалов, предназначенных для оснащения лезвийного инструмента (поликристаллические материалы изготавливаются в виде цилиндров и пластин небольшой высоты).

Сверхтвердые поликристаллические материалы, в свою очередь, условно делят на группы:

- поликристаллы на основе алмаза;
- поликристаллы на основе нитрида бора;
- композиционные (двухслойные) материалы.

Инструменты, оснащенные поликристаллическими алмазами, обладают высокой износостойкостью, хорошей теплопроводностью ($\lambda \approx 140$ Вт/(м·К)), малыми коэффициентами трения и линейного расширения, слабой адгезией к металлам и сплавам, за исключением железа и сталей. Недостатками синтетических алмазов (АС) являются: во-первых, интенсивное растворение в железе и его сплавах при температуре $700-800^\circ\text{C}$, а во-вторых, высокая хрупкость, что значительно сужает область их применения.

Поликристаллические алмазы АСПК, АСБ-Р, АСБ-Б, АСПВ применяются на операциях точения и растачивания при обработке медных, алюминиевых, титановых сплавов и стеклопластиков. Абсолютная твердость алмазов в 4...5 раз выше твердости существующих твердых сплавов.

Физико-механические свойства различных марок поликристаллов на основе алмазов лежат в пределах [23]: микротвердость – 70-100 ГПа, предел прочности на сжатие – от 200-400 (баллас) до 4400-5000 МПа (карбонит); предел прочности на изгиб – от 500 до 2000 МПа; теплостойкость – $700-800^\circ\text{C}$.

Поликристаллические материалы на основе кубического нитрида бора (КНБ) широко применяются при изготовлении лезвийных инструментов, используемых на операциях точения, торцевого фрезерования и зенкерования при обработке закаленных сталей и высокопрочных чугунов. Уступая алмазу по твердости, эльбор отличается

высокой теплостойкостью, химической инертностью к углероду, входящему в состав многих обрабатываемых материалов. Промышленностью выпускается несколько марок сверхтвердых материалов на основе эльбора: эльбор-Р (композит 01), белбор (композит 02), композит 03, композит 05, композит 09, гексанит-Р (композит 10) и др. Физико-механические свойства этих материалов изменяются в следующих пределах: микротвердость – 20-40 ГПа, предел прочности на сжатие – 2000-4000 МПа; предел прочности на изгиб – 250-1200 МПа; теплостойкость – 800-1500°C.

Особенностью композиционных материалов на основе алмаза и эльбора является то, что спекание порошков сверхтвердых материалов производится при высоких температурах и давлениях на твердосплавной подложке, в результате чего образуется слой поликристаллов толщиной 0,5-2 мм, прочно связанный с материалом подложки.

Двухслойные сверхтвердые материалы имеют следующие преимущества по сравнению с однородными по объему материалами:

- упрощается технология крепления режущих элементов в корпусе инструмента;
- наличие подложки существенно увеличивает ударную вязкость слоя из сверхтвердых материалов.

Наиболее известными композитами на основе алмаза являются ДАП, ДИАМЕТ, АМК-25, АМК-27, АТП, а на основе эльбора – 05Д-2С, 10Д, БПК.

Материалы, относящиеся к абразивной группе и используемые на операциях абразивной обработки, подробно описаны в параграфе 7.1.

ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 2

1. Перечислите требования, предъявляемые к инструментальным материалам.
2. На какие группы делятся инструментальные материалы?
3. Какие марки материалов относятся к группе углеродистых инструментальных сталей? Перечислите их основные физико-механические характеристики.
4. Какие инструменты изготавливаются из углеродистых инструментальных сталей?

5. Какие марки материалов относятся к группе легированных инструментальных сталей? Перечислите их основные физико-механические характеристики.
6. Какие инструменты изготавливаются из легированных инструментальных сталей?
7. Какие марки материалов относятся к группе быстрорежущих инструментальных сталей? Перечислите их основные физико-механические характеристики.
8. На какие группы делятся быстрорежущие инструментальные стали?
9. Чему способствует введение в состав быстрорежущих сталей Со?
10. Чему способствует введение в состав быстрорежущих сталей V?
11. Чем отличаются свойства традиционных и порошковых быстрорежущих сталей?
12. Чем отличаются традиционные и дисперсионно-твердеющие быстрорежущие стали?
13. Какие материалы относятся к твердым сплавам? Перечислите их характеристики.
14. На какие группы делятся твердые сплавы?
15. Какие твердые сплавы не рекомендуется применять при обработке титановых сплавов?
16. Чем отличаются традиционные и безвольфрамовые твердые сплавы?
17. На основе какого процесса основано получение твердых сплавов марки СТИМ?
18. Перечислите основные направления совершенствования твердых сплавов.
19. Какие покрытия применяются для повышения эксплуатационных свойств твердых сплавов?
20. Какие две группы технологических методов применяются для нанесения покрытий?
21. Какие материалы относятся к режущей керамике? Перечислите их основные характеристики.
22. На какие три класса делится режущая керамика?
23. В чем преимущества и недостатки режущей керамики?
24. Какие инструментальные материалы относятся к сверхтвердым материалам? Перечислите их основные физико-механические характеристики.
25. Назовите область применения поликристаллических алмазов.
26. Назовите область применения поликристаллических материалов на основе кубического нитрида бора.
27. Перечислите преимущества сверхтвердых композиционных материалов.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

3.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

В процессе резания происходит деформирование и разрушение материала заготовки, сопровождающееся рядом физико-химических явлений [15]:

1) в деформированном объеме заготовки возникает сложнопластическое состояние материала, имеют место упругие и пластические деформации, происходит хрупкое и вязкое разрушение. В поверхностном слое заготовки происходит изменение текстуры, структуры и всех теплофизических и электрофизических свойств;

2) в зоне резания возникает неоднородное температурное поле. Имеет место сложная схема распространения тепловых потоков и создаются особые условия теплопередачи между инструментом, стружкой и поверхностным слоем детали;

3) трение в области контакта инструмента и материала заготовки происходит при больших давлениях и температурах. Иногда возникает особый вид трения ювенильных поверхностей – чистое трение;

4) при определенных условиях резания на передней поверхности клина возникает слоистое металлическое образование, называемое наростом. Нарост изменяет геометрию клина и влияет на условия обработки;

5) происходит разрушение (износ) клина, имеющее разный характер; оно возникает под действием истирания, царапания, адгезии, диффузии и других явлений;

6) применение смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) сопровождается физико-химическими явлениями, возникающими при её контакте с нагретыми поверхностями инструмента и заготовки;

7) в технологической системе могут возникать вынужденные колебания и автоколебания, ухудшающие процесс резания.

3.2. СТРУЖКООБРАЗОВАНИЕ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

При обтекании режущего лезвия инструмента материалом заготовки часть деформированного материала перемещается по его передней поверхности, превращаясь в стружку, а другая часть, находящаяся ниже линии среза, движется по его задней поверхности и образует поверхностный слой детали.

Стружкообразование и формирование поверхностного слоя детали являются единым процессом деформирования и разрушения материала при резании.

3.2.1. ВИДЫ СТРУЖКИ И УСЛОВИЯ ЕЁ ОБРАЗОВАНИЯ

В зависимости от условий резания заготовок образуются различные виды стружек. Под условиями резания материалов следует понимать: режим резания, схему резания, геометрию режущего инструмента, свойства инструментального и обрабатываемого материалов, смазывающе-охлаждающее технологическое средство (СОТС) и т.д.

Впервые классификацию стружек дал в 1870 г. русский ученый И.А. Тиме в своей монографии «Сопротивление материалов и дерева резанию». Все возникающие при резании стружки можно разделить на четыре типа: сливную, скалывания, или суставчатую, элементную и надлома [25, 31].

Сливная стружка. Сливная стружка имеет вид непрерывной ленты, у которой на верхней и боковых сторонах четко выражены следы пластической деформации в виде мелких заостренных выступов (рис. 3.1, а). Обработанная поверхность заготовки при образовании стружки данного типа имеет гладкий и блестящий вид. Сливная стружка образуется при резании вязких и пластичных материалов с большими скоростями резания, средними и малыми подачами, т.е.

при небольших и средних толщинах среза, при больших положительных передних углах инструмента.

Стружка скалывания, или суставчатая. Стружка скалывания имеет вид отдельных, четко выраженных элементов, прочно связанных друг с другом (рис. 3.1, б). Обработанная поверхность заготовки при образовании такой стружки содержит небольшое количество надрывов. Стружка скалывания образуется при обработке пластичных материалов при средних скоростях резания и подачах, т.е. при средних толщинах среза и средних положительных передних углах.

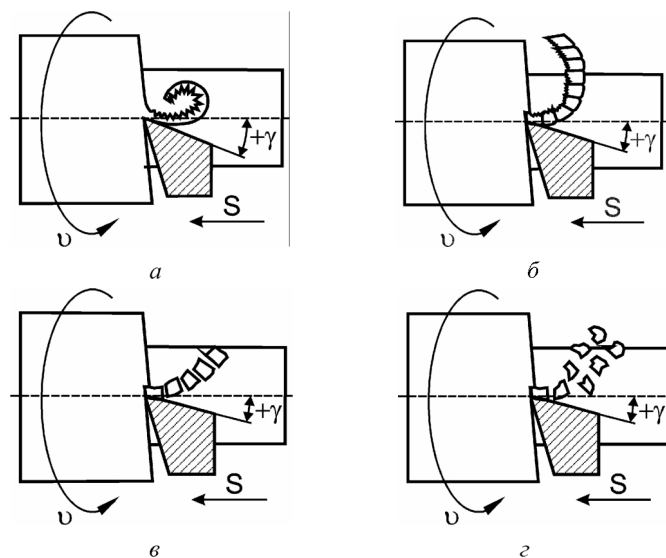


Рис. 3.1. Типы стружек:

а – сливная; б – скалывания, или суставчатая; в – элементная; г – надлома

Если увеличить толщину среза, т.е. подачу, уменьшить скорость резания и передний угол, то отдельные элементы стружки станут менее связанными, в результате чего образуется *элементная стружка* (рис. 3.1, в). Эти три вида стружки образуются при обработке пластичных материалов.

Стружка надлома. Стружка надлома имеет вид отдельных, произвольной формы элементов, не связанных друг с другом (рис. 3.1, г). Обработанная поверхность заготовки – шероховатая с надрывами и зазубринами. Стружка надлома образуется при обработке малопластичных и хрупких материалов, например чугуна и бронзы, при работе с малыми скоростями резания, большими подачами и малыми передними углами. Если увеличить скорость резания, то при обработке хрупких материалов получится элементная стружка, а при резании с высокими скоростями – даже сливная, которая обладает существенно меньшей прочностью по сравнению со стальной стружкой [25].

Таким образом, на формирование стружки оказывают влияние скорость резания, толщина среза, величина переднего угла режущего инструмента, физико-механические свойства обрабатываемого материала и т.д.

Анализируя рассмотренные выше виды стружки, можно сделать выводы:

- независимо от типа стружки вся она состоит из элементов; разные виды стружки отличаются друг от друга только формой элементов и прочностью связей между ними;
- процесс резания цикличен, поэтому всегда сопровождается вибрациями, ухудшающими качество обработки.

3.2.2. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ СТРУЖКИ ПРИ СВОБОДНОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ РЕЗАНИИ

Реальное описание механизма образования стружки, даже с учетом современного развития теории резания материалов, достаточно сложно, поэтому его рассматривают в идеализированном виде при свободном прямоугольном резании, то есть представляют в виде формализованной модели.

Впервые такая модель (схема) образования стружки была предложена проф. И.А. Тиме. В соответствии с этой моделью (рис. 3.2)

срезаемый слой материала толщиной a в результате деформации сдвига в плоскости OA , называемой условной плоскостью сдвига или плоскостью скалывания, превращается в стружку толщиной a_1 . Плоскость сдвига, а точнее поверхность (из-за малой кривизны её условно считают плоскостью), располагается под углом β_1 к плоскости резания $(P_n - P_n)$. Этот угол получил название угла сдвига или угла скалывания. В процессе деформации срезаемого слоя материала и преобразования его в стружку длина последней l_1 становится отличной от длины пути l , пройденного резцом, а толщина a_1 и ширина b_1 стружки, соответственно, становятся больше толщины a и ширины b снимаемого слоя материала. Это явление получило название усадки стружки.

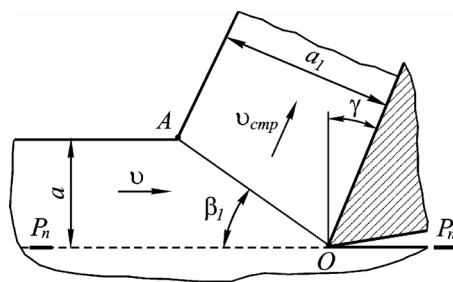


Рис. 3.2. Схема стружкообразования

$(v > v_{сmp})$, то есть должны иметь место бесконечно большие значения градиентов ускорений и напряжений, а это, в свою очередь, противоречит законам механики [13].

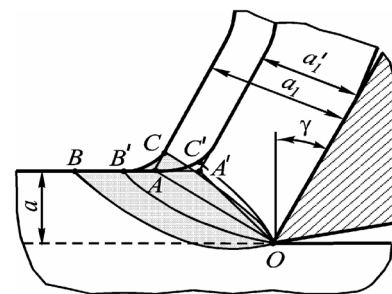


Рис. 3.3. Зона стружкообразования

Многочисленные экспериментальные исследования подтвердили наличие такой переходной зоны OCB , имеющей начальную OB и конечную OC границы (рис. 3.3). Причем с увеличением скорости резания область переходной зоны за счет сближения границ уменьшается ($OB'C'$) и поворачивается вокруг точки O по часовой стрелке.

Изменение величины и положения переходной зоны связано, во-первых, с уменьшением величины усадки стружки, обусловленной повышением пластичности обрабатываемого материала в связи с ростом температуры при увеличении скорости резания, а во-вторых, с запаздыванием пластической деформации по сравнению со скоростью деформации.

3.2.3. ДЕФОРМАЦИИ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ И СТРУЖКИ ПРИ СВОБОДНОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ РЕЗАНИИ

Воздействие режущего инструмента на обрабатываемую заготовку вызывает упругую и пластическую деформации материала. При резании металлов пластическая деформация внешне проявляется в усадке стружки.

Как уже отмечалось, под усадкой стружки понимается изменение размеров стружки по сравнению с размерами срезаемого объема материала заготовки.

Пусть срезаемый объем V материала заготовки, площадь которого $OABC$, имеет толщину a , ширину b и длину l (рис. 3.4),

то есть $V = abl$. В процессе резания режущий клин переместится из положения *I* в положение *II*, т.е. из точки *C* в точку *O*. При этом он деформирует рассматриваемый объем материала и переведет его в стружку.

В процессе деформации фигура *OABC* трансформируется в фигуру *OAEF*. Объем снимаемого материала до и после деформации останется неизменным, т.е.

$$V = V_1; \quad abl = a_1 b_1 l_1 \varepsilon_o;$$

$$\frac{l}{l_1} = \frac{a_1}{a} \cdot \frac{b_1}{b} \cdot \varepsilon_o, \quad (3.1)$$

где V_1 – объем стружки; a_1 – толщина образовавшейся стружки; b_1 – ширина образовавшейся стружки; l_1 – длина стружки; ε_o – коэффициент полноты (сплошности) стружки (для непрерывной стружки $\varepsilon_o = 1$, для элементной $\varepsilon_o = 0,6 \dots 0,8$).

Для количественной оценки напряженного состояния в зоне резания вводят специальные коэффициенты: коэффициент продольной усадки стружки – $K_l = l/l_1$, коэффициент усадки стружки по толщине – $K_a = a_1/a$ и коэффициент усадки стружки по ширине – $K_b = b_1/b$. Данные коэффициенты зависят от условий резания, а их величины изменяются обычно в следующих пределах: $K_l = 0,5 \dots 4,5$; $K_a = 1,35 \dots 4,0$; $K_b = 1 \dots 1,05$. Для практических целей, как правило, используют коэффициент продольной усадки стружки, так как он изменяется в более широком диапазоне.

Тогда формула (3.1) примет вид

$$K_l = K_a K_b \varepsilon_o. \quad (3.2)$$

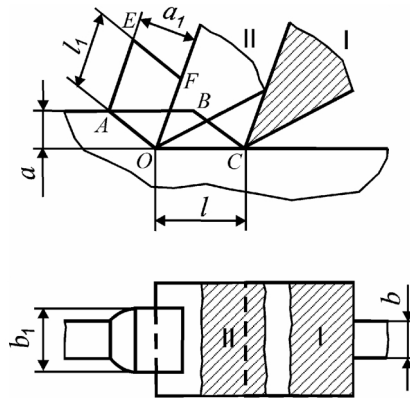


Рис. 3.4. Схема усадки стружки

При отрицательной усадке стружки, т.е. когда $K_l < 1$, скорость перемещения стружки по передней поверхности инструмента может превышать скорость резания в 2 раза, что следует из выражения

$$\tau = \frac{l}{v} = \frac{l_1}{v_{cmp}}; \quad \text{откуда} \quad v_{cmp} = v \frac{l_1}{l} = \frac{v}{K_l},$$

где τ – время перемещения инструмента на расстояние l и время образования стружки длиной l_1 ; v – скорость резания; v_{cmp} – скорость перемещения стружки по передней поверхности инструмента.

Увеличение скорости стружки по сравнению со скоростью резания приводит к возрастанию температуры в зоне резания и более быстрому износу инструмента. Отрицательная усадка стружки имеет место при обработке титановых сплавов.

Большое влияние на усадку стружки оказывают величина переднего угла, скорость резания и физико-механические свойства обрабатываемого материала. В то же время подача и глубина резания на данный показатель пластической деформации оказывают незначительное влияние.

Зависимость усадки стружки от переднего угла γ была получена И.А. Тиме.

При образовании сливной стружки $\varepsilon_o = 1$ (см. формулу (3.2)). Если принять, что $b \approx b_1$, то $K_b = 1$. Тогда $K_l = K_a = \frac{l}{l_1} = \frac{a_1}{a}$. Из

рис. 3.5 можно определить $a_1 = OA \cos(\beta_1 - \gamma)$, $a = OA \sin \beta_1$ и, соответственно,

$$K_a = \frac{a_1}{a} = \frac{OA \cos(\beta_1 - \gamma)}{OA \sin \beta_1} = \frac{\cos \beta_1 \cos \gamma + \sin \beta_1 \sin \gamma}{\sin \beta_1} = \frac{\cos \beta_1 \cos \gamma}{\sin \beta_1} + \sin \gamma.$$

Преобразовав данное выражение, получим

$$(K_a - \sin \gamma) \sin \beta_1 = \cos \beta_1 \cos \gamma;$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\cos \gamma}{(K_a - \sin \gamma)}; \quad (3.3)$$

$$\beta_1 = \arctg \left(\frac{\cos \gamma}{K_a - \sin \gamma} \right).$$

Усадка стружки является качественным показателем величины деформации. Для нахождения её количественной характеристики будем исходить из того, что деформирование и разрушение материала происходит путем простого сдвига, о чем свидетельствуют результаты многочисленных исследований.

При простом сдвиге деформация материала заключается в смещении всех точек тела относительно какой-либо одной оси, например, оси X (рис. 3.6). При этом смещение каждой точки тела будет пропорционально расстоянию её относительно этой оси.

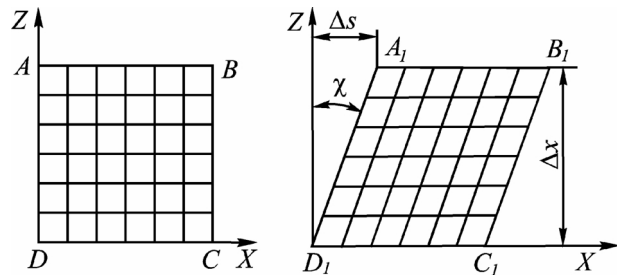


Рис. 3.6. Схема простого сдвига [5]

Применительно к рис. 3.6 расстояние Δs , на которое верхняя сторона квадрата сдвинулась относительно нижней стороны, назы-

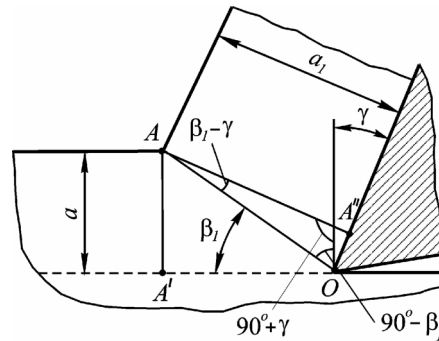


Рис. 3.5. Схема для определения зависимости усадки стружки от переднего угла

вается абсолютным сдвигом. Количественным показателем простого сдвига или его мерой деформации является относительный сдвиг

$$\varepsilon = \frac{\Delta s}{\Delta x},$$

где Δx – расстояние между верхней и нижней сторонами квадрата.

Найдем зависимость для определения относительного сдвига. Для этого воспользуемся схемой, представленной на рис. 3.7.

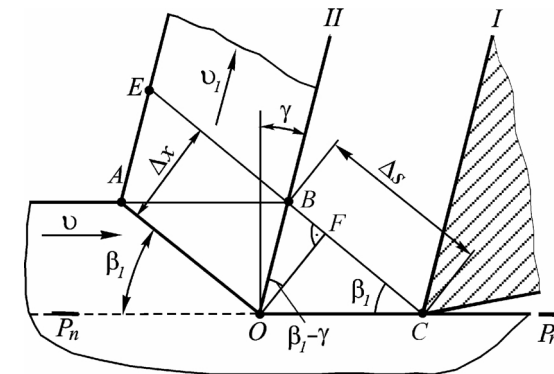


Рис. 3.7. Схема для определения относительного сдвига при резании материалов

В процессе резания, т.е. в процессе перемещения резца из положения I в положение II , его вершина сдвинется, соответственно, из точки C в точку O . При этом происходит деформация срезаемого слоя, в результате которого он полностью переходит в стружку. Если предположить, что сечение недеформированного снимаемого слоя имеет вид параллелограмма $OABC$, то сечение стружки будет иметь вид параллелограмма $OAEB$. При этом, как видно из рис. 3.7, линия BC займет положение EB . Из сопоставления рис. 3.6 и 3.7 видно, что $\Delta s = BC$, а $\Delta x = OF$, т.е.

$$\varepsilon = \frac{\Delta s}{\Delta x} = \frac{BC}{OF} = \frac{FC + BF}{OF} = \frac{OF \operatorname{ctg} \beta_1 + OF \operatorname{tg} (\beta_1 - \gamma)}{OF}. \quad (3.4)$$

После преобразования получим

$$\varepsilon = ctg\beta_1 + tg(\beta_1 - \gamma). \quad (3.5)$$

Используя формулу (3.5), найдем непосредственную связь между относительным сдвигом и коэффициентом усадки стружки. Для этого подставим в правую часть выражения (3.5) формулу (3.3) и, учитывая, что $tg(\beta_1 - \gamma) = \frac{tg\beta_1 - tg\gamma}{1 + tg\beta_1 \cdot tg\gamma}$, проведем следующие преобразо-

вания:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + \frac{tg\beta_1 - tg\gamma}{1 + tg\beta_1 \cdot tg\gamma} = \frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + \frac{\frac{\cos \gamma}{(K_a - \sin \gamma)} - tg\gamma}{1 + \frac{\cos \gamma}{(K_a - \sin \gamma)} tg\gamma} = \\ &= \frac{K_a - \sin \gamma}{\cos \gamma} + \frac{\cos \gamma - tg\gamma(K_a - \sin \gamma)}{(K_a - \sin \gamma) + \cos \gamma \cdot tg\gamma} = \\ &= \frac{(K_a - \sin \gamma)^2 + (K_a - \sin \gamma)\cos \gamma \cdot tg\gamma + \cos^2 \gamma - (K_a - \sin \gamma)\cos \gamma \cdot tg\gamma}{(K_a - \sin \gamma)\cos \gamma + \cos^2 \gamma \cdot tg\gamma} = \\ &= \frac{K_a^2 - 2K_a \sin \gamma + \sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma}{K_a \cos \gamma - \cos \gamma \sin \gamma + \cos^2 \gamma \cdot \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma}} = \frac{K_a^2 - 2K_a \sin \gamma + 1}{K_a \cos \gamma}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Анализируя формулу (3.6), связывающую относительный сдвиг с усадкой стружки, можно сделать следующие выводы [13]:

1. Относительный сдвиг не равен усадке стружки, и поэтому она не может использоваться в качестве количественной характеристики пластической деформации.
2. Усадка стружки может рассматриваться только в виде качественной характеристики пластической деформации.

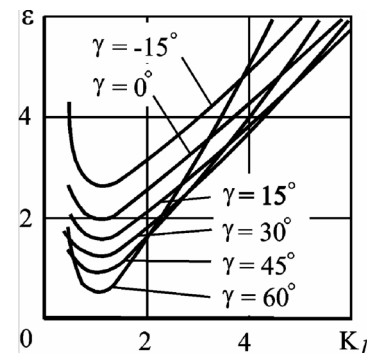


Рис. 3.8. Связь между относительным сдвигом и коэффициентом усадки стружки при различных передних углах [22]

Эти выводы хорошо иллюстрируют графики зависимости относительной деформации от усадки стружки при различных значениях переднего угла (рис. 3.8). Как видно из анализа восходящих ветвей графиков, с ростом усадки стружки величина относительного сдвига увеличивается. Вместе с тем при одной и той же величине усадки стружки, но различных значениях переднего угла величины относительного сдвига существенно отличаются.

К внешнему проявлению деформации обрабатываемого материала при его переходе в стружку относится также текстура стружки.

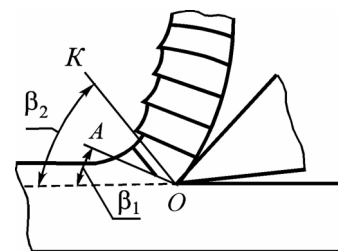


Рис. 3.9. Положение плоскости скольжения

Хотя отдельные элементы стружки сдвигаются под углом β_1 к плоскости резания, внутри каждого элемента сдвиг слоёв происходит под углом β_2 (рис. 3.9). При этом, как видно из рис. 3.9, $\beta_2 > \beta_1$. Величина угла текстуры, как показывают экспериментальные данные, составляет, примерно, $\eta = \beta_2 - \beta_1 \approx 10...30^\circ$.

Несовпадение угла сдвига (по плоскости OA) с направлением деформаций OK внутри элемента обусловлено тем, что пластическая деформация происходит по линиям скольжения до определенной величины. Как только деформируемый материал претерпел значительное упрочнение, или наклеп, разрушение происходит не по ли-

ниям скольжения, а по так называемым линиям сдвига, которые являются огибающими линий скольжения [25].

В связи с тем, что образование стружки связано с пластической деформацией сдвига, стружка имеет текстуру, при которой зерна металла вытянуты по отношению к плоскости сдвига.

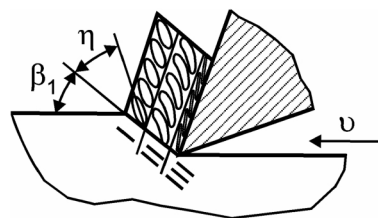


Рис. 3.10. Структура стружки

Металлографический анализ стружки показал наличие в ней трех характерных зон (рис. 3.10):

I – зона *текстурированного слоя стружки*, то есть слоя с зернами, вытянутыми в определенном направлении;

II – зона с *завихренной текстурой*. Данный слой образуется в результате тормозящего воздействия стружки на переднюю поверхность инструмента. В этой зоне наблюдается двойная пластическая деформация;

III – *прирезцовый (граничный) слой*, в котором текстура практически полностью разрушена. Данный слой при определенных условиях резания (сверхскоростное резание) становится текущим.

3.3. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ТРЕНИЕ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ

3.3.1. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ

В условиях высоких скоростей деформаций, присущих процессу резания, в значительной мере меняются физико-механические свойства материала: возрастает число возможных плоскостей скольжения, изменяется соотношение его предела текучести к временному сопротивлению при растяжении (сжатии), возрастает химическая активность материала и т.д.

Экспериментально установлено, что на передней поверхности лезвия инструмента образуется так называемый *граничный слой*. Это очень тонкий слой, в котором лежат контактные поверхности инструмента и стружки. Он возникает благодаря мгновенной адгезии двух разнородных материалов и сопровождающего данный процесс явления диффузии, поэтому для данного слоя в результате твердофазного взаимодействия характерно наличие на поверхности стружки материала инструмента, а на поверхности материала инструмента – материала стружки. Появлению граничного слоя способствует также поглощение химически активных веществ из внешней среды (газовой или жидкой) поверхностным слоем твердого тела (инструмента) и химические реакции новых ювенильных поверхностей с этой средой. В результате ранее описанных явлений в граничном слое образуется большое количество пор между зернами инструментального и обрабатываемого материалов, наблюдается текстура, появляются различные микро- и субмикроструктуры и т.д.

3.3.2. ТРЕНИЕ НА КОНТАКТНЫХ ПЛОЩАДКАХ

К характерным особенностям трения на контактных площадках инструмента при резании следует отнести:

- наличие в зоне контакта как ювенильных (химически чистых), так и окисленных поверхностей инструмента, заготовки и стружки;
- сложный характер распределения нормальных и касательных напряжений на передней и задней поверхностях инструмента;
- неравномерное распределение температуры на контактных поверхностях инструмента;
- незначительная продолжительность контакта инструмента с элементами поверхностей стружки и детали при постоянном обновлении зоны контакта и т.д.

Как видно из рис. 3.11, зона трения на передней поверхности инструмента протяженностью C состоит из участка пластического контакта C_1 и участка упругого контакта C_2 .

Общая длина площадки контакта C , а также длина участка пластического контакта C_1 , как показали исследования, проведенные Н.Г. Абуладзе [1], зависят от толщины срезаемого слоя a материала заготовки, коэффициента продольной усадки стружки K_l и переднего угла γ инструмента, что следует из полученных им формул

$$C_1 = a[K_l(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma],$$

$$C = a(2,05K_l - 0,5).$$

Отношение C_1/C при обработке обычных конструкционных материалов чаще всего составляет 0,5 и не превышает 0,7 [31].

Сложный характер контакта, имеющий место на передней поверхности инструмента, определяет и характер распределения контактных напряжений. На рис. 3.12 приведены эпюры напряжений вдоль площадки контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Расчетные зависимости для определения этих напряжений приведены в работе [23].

С началом процесса резания на передней поверхности инструмента действуют нормальная сила N_n и сила трения F_n (рис. 3.13), которые можно определить, суммируя в пределах площадки контакта нормальные и касательные напряжения. С другой стороны, эти же силы при свободном прямоугольном резании инструментом с углом наклона главной режущей кромки $\lambda = 0^\circ$

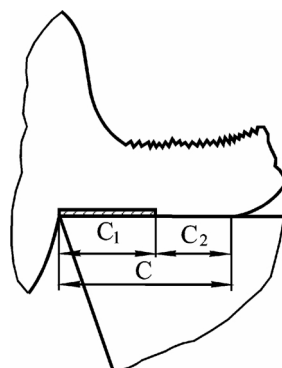


Рис. 3.11. Зоны трения на передней поверхности инструмента

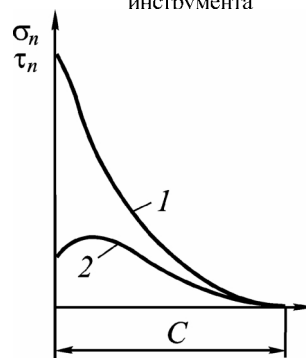


Рис. 3.12. Характер распределения нормальных σ_n (1) и касательных τ_n (2) напряжений вдоль площадки контакта стружки с передней поверхностью

можно рассчитать, измерив с помощью динамометра силы P_z и P_y , действующие на срезаемый слой. Как видно из рис. 3.13, направление действия силы P_z совпадает с вектором скорости резания, а сила P_y перпендикулярна силе P_z .

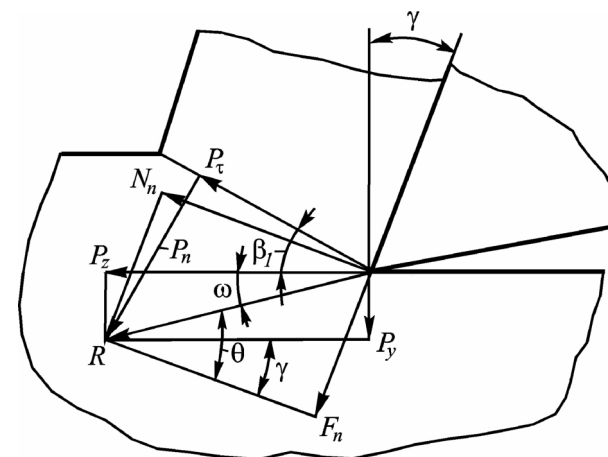


Рис. 3.13. Схема сил, действующих на переднюю поверхность инструмента [31]

Равнодействующая сил P_z и P_y – сила резания R направлена к плоскости резания под углом действия $\omega = \operatorname{arctg} \frac{P_y}{P_z}$. Тогда

$$N_n = R \cos(\omega + \gamma); \quad F_n = R \sin(\omega + \gamma), \quad \text{учитывая что } R = \frac{P_z}{\cos \omega},$$

$$N_n = \frac{P_z \cos(\omega + \gamma)}{\cos \omega}; \quad F_n = \frac{P_z \sin(\omega + \gamma)}{\cos \omega}.$$

Зная силы F_n и N_n , в соответствии с законом Амонтона – Кулона можно определить средний коэффициент трения

$$\mu_{cp} = \frac{F_n}{N_n} = \frac{P_z \sin(\omega + \gamma) \cdot \cos \omega}{\cos \omega \cdot P_z \cos(\omega + \gamma)} = \operatorname{tg}(\omega + \gamma) = \operatorname{tg} \theta, \quad (3.7)$$

или

$$\mu_{cp} = \frac{F_n}{N_n} = \frac{\tau_n \cdot C \cdot b}{\sigma_n \cdot C \cdot b} = \frac{\tau_n}{\sigma_n},$$

где b – ширина площадки контакта.

Таким образом, исходя из формулы (3.7) можно сделать вывод, что угол трения $\theta = \omega + \gamma$ на передней поверхности лезвия инструмента зависит от угла γ и угла действия ω . С увеличением среднего коэффициента трения, а следовательно, и угла трения при неизменном переднем угле γ угол действия увеличивается и растет его влияние на деформационные процессы в срезаемом слое материала. В частности, зависимость между углами β_1 , θ , ω и γ можно описать с помощью формулы, полученной К.А. Зворыкиным

$$2\beta_1 + \theta - \gamma = 2\beta_1 + \omega = c,$$

где c – постоянная величина, близкая к 80° .

Увеличение средних нормальных контактных напряжений приводит к снижению μ_{cp} , и наоборот. Значение μ_{cp} при резании достигает 1,2...3 [31].

3.3.3. НАРОСТООБРАЗОВАНИЕ ПРИ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ

Под влиянием выделяющегося в процессе резания тепла, являющегося результатом работы деформации и сил трения, а также высоких давлений на передней поверхности режущего инструмента наблюдается явление, получившее название «наростообразование». Нарост – это слоистое металлическое образование клиновидной формы, расположенное на передней поверхности инструмента вдоль его режущей кромки и состоящее из сильно деформированного обрабатываемого материала с элементами инструментального материала (рис. 3.14). Его твердость, по данным авторов работы [23], в 1,5...1,7

раза, а по данным авторов работы [25], в 2,5...3,5 раза выше твердости обрабатываемого материала.

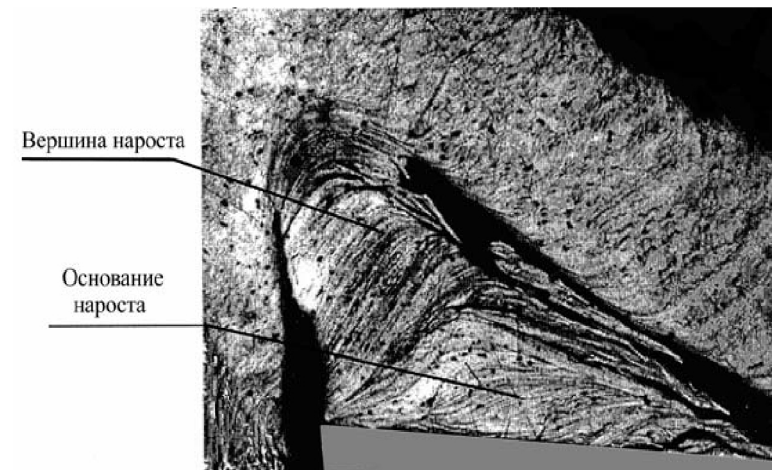


Рис. 3.14. Строение нароста

Нарост после его формирования выполняет роль передней поверхности режущего инструмента, что в конечном итоге приводит к уменьшению длины контакта стружки с реальной передней поверхностью.

Последовательность образования нароста условно можно описать следующим образом. При высоких температурах и давлениях наблюдается адгезионное схватывание химически чистых (ювенильных) поверхностей стружки и инструмента, в результате чего происходит прочное соединение («холодное сваривание») контактного слоя стружки с передней поверхностью режущего инструмента и образование заторможенного слоя. В процессе обтекания этого слоя сходящей стружкой, образующейся в результате последующей обработки, происходит торможение новых слоев металла, их прочное соединение с предыдущими слоями и, следовательно, увеличение размеров нароста. Вследствие чрезвычайно сильной деформации

слои металла, образующие нарост, существенно упрочняются. При этом слои наращиваются друг на друга до тех пор, пока размеры нароста не станут максимально возможными при данных условиях резания, после чего происходит разрушение нароста. Определенная часть его уносится стружкой, а другая часть – поверхностью детали.

В связи с тем, что вблизи режущей кромки стружка в процессе обработки движется не по режущему лезвию, а по передней поверхности нароста, то фактический передний угол γ_{ϕ} увеличивается (рис. 3.15), облегчая процесс резания. Уменьшение фактического угла резания δ_{ϕ} при наростообразовании приводит к изменению характера стружкообразования. Следует отметить, что на определенном этапе жизненного цикла нароста, а именно: во время его частичного срыва, фактический передний угол может принимать отрицательные значения.

Наличие нароста на передней поверхности инструмента может привести к изменению фактической толщины среза $a_{\phi} = a + \Delta a$ (см. рис. 3.15). Это произойдет в том случае, если вершина нароста будет нависать над задней поверхностью инструмента, а, так как нарост периодически возникает и срывается, это приведет к колебанию толщины срезаемого слоя и, следовательно, снижению точности обработки.

Экспериментально установлено, что в большинстве случаев нарост – образование крайне нестабильное. Жизненный цикл его, т.е.

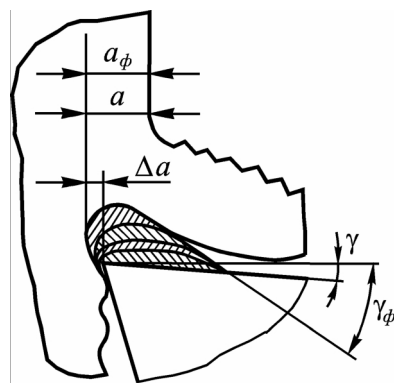


Рис. 3.15. Влияние нароста на величину переднего угла и толщину среза

возникновение, рост до максимальной величины и разрушение, может составлять 0,001...0,0005 с.

Нарост оказывает некоторое положительное влияние на процесс резания:

1) при резании с наростом увеличивается фактический передний угол инструмента ($\gamma_{\phi} \gg \gamma$, см. рис. 3.15). Это приводит к уменьшению сил резания, а следовательно, и к уменьшению работы, затрачиваемой на резание;

2) нарост прикрывает и предохраняет часть передней поверхности инструмента вблизи режущей кромки от износа.

Однако в большинстве случаев отрицательное влияние нароста на процесс резания сводит на нет указанные выше преимущества:

1) периодические срывы нароста возбуждают вибрации в технологической системе, а они, в свою очередь, приводят к колебанию нагрузок на площадках контакта и температуры на поверхностях лезвия. Все ранее перечисленное оказывает негативное влияние на прочность инструмента и приводит к выкрашиванию режущего лезвия;

2) частицы разрушенного нароста, уносимые стружкой и заготовкой, попадая на обработанную поверхность, образуют на ней налипцы, что недопустимо на операциях полустойковой и чистовой обработки.

Таким образом, перечисленные недостатки наростообразования в целом делают этот процесс нежелательным (за некоторым исключением – например, при обдирке сталей аустенитного класса [23]).

Известны следующие способы борьбы с наростом.

1. Повышение скорости резания.

Образование нароста и его рост происходят в определенном диапазоне скоростей, который определяется условиями резания. Поэтому для уменьшения наростообразования необходимо либо уменьшить, либо увеличить скорость резания. При малых скоростях вслед-

ствие невысоких температур в зоне резания процесс наростообразования затухает. Высокие скорости резания способствуют повышению температуры в зоне обработки, а следовательно, и росту пластичности заторможенных слоев, которые удаляются с общим объемом стружки.

2. Увеличение переднего угла.

Увеличение переднего угла до максимально возможных значений ($\gamma = 40...45^\circ$) по условиям прочности режущего клина способствует полной ликвидации нароста при любых скоростях резания.

3. Доводка передней поверхности инструмента.

Доводка передней поверхности инструмента с целью снижения её шероховатости приводит к лучшему скольжению стружки по ней и уменьшению застойных зон.

4. Применение смазочно-охлаждающих технологических средств.

Последние три способа направлены на уменьшение сил трения и температуры в зоне контакта стружки с передней поверхностью инструмента. Опытным путем установлено, что при резании пластичных материалов, к которым относятся, например, углеродистые стали, труднообрабатываемые стали и сплавы, нарост имеет максимальную высоту при скоростях резания, приводящих к возникновению температуры в зоне обработки, равной 300 до 350°C . При температуре резания, равной $\theta = 600^\circ\text{C}$, нарост полностью исчезает.

3.4. СИЛЫ И РАБОТА РЕЗАНИЯ

3.4.1. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ИНСТРУМЕНТ ПРИ СВОБОДНОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ РЕЗАНИИ

Рассмотрим систему сил, действующих на переднюю и заднюю поверхности инструмента при свободном резании (рис. 3.16, а). В процессе обработки материалов на переднюю поверхность режущего клина инструмента со стороны стружки действует нормальная сила N_n и сила трения стружки об эту поверхность F_n , равнодействующей

которых является сила $\vec{R}_n = \vec{N}_n + \vec{F}_n$. В свою очередь, на заднюю поверхность режущего клина действует сила N_3 , являющаяся нормальной силой упругого противодействия обрабатываемого материала, и сила трения задней поверхности режущего клина об обрабатываемую заготовку F_3 . Так как в процессе резания на задней поверхности формируется площадка износа, задний угол α на которой равен нулю, то направление силы N_3 будет перпендикулярно плоскости резания $P_n - P_n$, а сила трения F_3 будет действовать в плоскости резания (см. рис. 3.16, б). Равнодействующей этих сил является сила $\vec{R}_3 = \vec{N}_3 + \vec{F}_3$. Если сложить равнодействующие сил, действующих на передней R_n и задней R_3 поверхностях резца, то их результирующая $\vec{R} = \vec{R}_n + \vec{R}_3$ представляет собой силу сопротивления резанию (рис. 3.16, в).

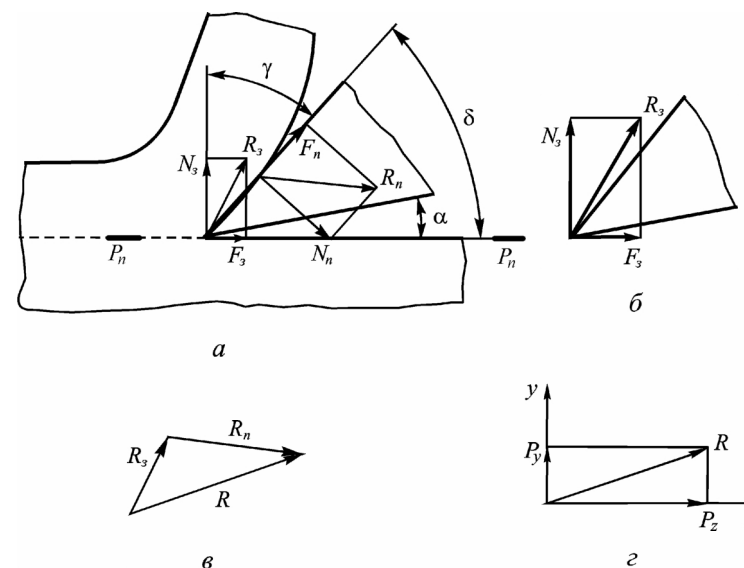


Рис. 3.16. Система сил, действующих при свободном резании [31]

Разложим силу сопротивления резанию R на две составляющие: главную составляющую силы резания P_z , направление действия которой совпадает с вектором скорости главного движения резания, и радиальную составляющую силы резания P_y , лежащую в основной плоскости, проходящей через точку приложения сил, и направленную перпендикулярно плоскости резания. Определим составляющие P_z и P_y , спроецировав силы, действующие на передней и задней поверхностях режущего клина, соответственно, на оси z и y (рис. 3.16, з):

$$P_z = N_n \cos \gamma + F_n \sin \gamma + F_s; \quad P_y = -N_n \sin \gamma + F_n \cos \gamma + N_s.$$

Принципиально все силы, приложенные к режущему клину, можно определить теоретически, используя зависимости, полученные на основе различных теорий механики твердого тела и других областей знаний. Однако все они далеко не в полной мере отражают сложнейший характер физических явлений, протекающих в зоне резания, поэтому данные зависимости являются весьма приближенными. В связи с этим на практике чаще всего применяют простые эмпирические зависимости, полученные экспериментальным путем.

3.4.2. СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ НЕСВОБОДНОМ РЕЗАНИИ

В отличие от свободного прямоугольного резания при несвободном резании силу сопротивления резанию R раскладывают на три составляющие: главную составляющую силы резания P_z , нагружающую привод главного движения станка; радиальную составляющую силы резания P_y , определяющую величину отжима инструмента от заготовки и влияющую на точность обработки; осевую составляющую силы резания P_x , нагружающую привод подачи станка (рис. 3.17). Знание этих сил позволяет рассчитать конструктивные элементы станка на прочность, жесткость и виброустойчивость, а также решить ряд инженерных и технологических задач. Например, знание составляющих силы резания позволяет выполнить расчет державки резца и привода подачи станка

на прочность, определить момент сопротивления резанию $M_{рез}$, определить режим резания, обеспечивающий обработку заготовки с погрешностью, не превышающей заданный допуск на размер или допуск на отклонение формы, определить эффективную мощность, затрачиваемую на процесс резания и т.д.

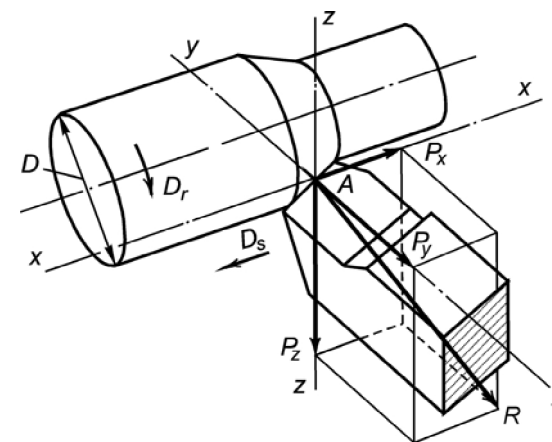


Рис. 3.17. Схема разложения результирующей силы R на составляющие P_z , P_y , P_x

Три указанные составляющие силы резания взаимно перпендикулярны; поэтому величина и направление равнодействующей силы R определяются геометрически. Следовательно,

$$R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2 + P_x^2}, \text{ чаще всего } R \approx (1,1 \dots 1,2)P_z.$$

Экспериментальные исследования показали, что соотношение составляющих P_z , P_y и P_x силы резания не остается постоянным, а зависит от условий резания, в частности, от геометрических параметров рабочей части резца, элементов режима резания (v, S, t), износа резца, физико-механических свойств обрабатываемого материала и т.д.

Например, отношения $\frac{P_y}{P_z}$ и $\frac{P_x}{P_z}$ возрастают с увеличением износа реза; увеличение подачи приводит к увеличению отношения $\frac{P_x}{P_z}$; увеличение главного угла в плане уменьшает отношение $\frac{P_y}{P_z}$. На некоторых операциях токарной обработки одной из двух составляющих сил резания P_y или P_x может и не быть. Так, при разрезке заготовки отрезным резцом сила $P_x = 0$, тогда $R = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}$; при обточке заготовки проходным упорным резцом с $\varphi = 90^\circ$ и $\lambda = 0^\circ$ отсутствует составляющая P_y , при этом равнодействующая $R = \sqrt{P_z^2 + P_x^2}$. Сила P_z действует во всех случаях, и поэтому она получила название главной составляющей силы резания.

Для осуществления процесса резания необходимо выполнение следующих условий:

$$M_{кр} = P_z \cdot \frac{D}{2} \leq M_{шп.см}; \quad P_x \leq Q_{мп},$$

где D – диаметр заготовки; $M_{шп.см}$ – крутящий момент на шпинделе станка; $Q_{мп}$ – сила, допускаемая механизмом подачи станка.

Составляющие силы резания при несвободном резании могут быть определены на основе использования аналитических зависимостей и экспериментальным путем. Однако по причинам, указанным в 3.4.1, на практике наибольшее применение нашли эмпирические зависимости.

Для экспериментального определения составляющих силы резания применяют специальные устройства – динамометры. Независимо от конструкции они состоят из следующих основных частей: 1) датчика; 2) приемника, осуществляющего регистрацию нагрузки; 3) вспомогательных звеньев, связывающих датчик с приемником.

Эмпирические зависимости для расчета сил резания имеют вид [5, 13, 15, 23]

$$P_z = C_P' t^{x_{Pz}} S^{y_{Pz}} v^{z_{Pz}};$$

$$P_y = C_P' t^{x_{Py}} S^{y_{Py}} v^{z_{Py}};$$

$$P_x = C_P' t^{x_{Px}} S^{y_{Px}} v^{z_{Px}},$$

где C_P' – постоянный коэффициент, учитывающий конкретные условия обработки заготовки; t – глубина резания; S – подача; v – скорость резания; x_P, y_P, z_P – показатели степеней.

Для того чтобы использовать данные зависимости для других условий обработки, необходимо ввести поправочные коэффициенты на измененные условия резания: K_{Mp} – коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала; K_{Cp} – коэффициент, учитывающий состояние обрабатываемого материала; $K_{\gamma p}$ – коэффициент, учитывающий влияние переднего угла; $K_{\varphi p}$ – коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане; K_{rp} – коэффициент, учитывающий влияние радиуса при вершине; K_{Op} – коэффициент, учитывающий влияние смазывающе-охлаждающего технологического средства; K_{up} – коэффициент, учитывающий износ инструмента.

$$\text{Тогда } C_P = C_P' K_{Mp} K_{Cp} K_{\gamma p} K_{\varphi p} K_{rp} K_{Op} K_{up}.$$

3.4.3. РАБОТА И МОЩНОСТЬ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

Работу (Дж), затрачиваемую на процесс резания при точении, можно определить по формуле [31]

$$W = P_z L,$$

где P_z – главная составляющая силы резания, направление действия которой совпадает с вектором скорости резания, Н; L – путь, пройденный режущим инструментом, м.

В общем объеме работы, совершаемой при резании, на долю деформации, трения по передней и задней поверхностям приходится соответственно 55, 35 и 10% [31]. В том случае, если известен путь, пройденный режущим инструментом за одну минуту, то работу, выполненную этим инструментом за данный указанный отрезок времени, можно определить по формуле

$$W = P_z v = P_c v_c + F_n v_n + F_s v_s,$$

где v – скорость резания, м/мин; P_c – сила, действующая в условной плоскости сдвига, Н; v_c – скорость сдвига, м/мин; F_n – сила трения на передней поверхности режущего клина, Н; v_n – скорость перемещения стружки по передней поверхности, м/мин: $v_n = v/K_l$; F_s – сила трения по задней поверхности режущего клина, Н; v_s – скорость движения обработанной поверхности относительно задней поверхности лезвия инструмента, м/мин: $v_s = v$.

Зная составляющие силы резания, можно также определить эффективную мощность (кВт), необходимую для осуществления процесса резания. Эффективная мощность – это мощность, затрачиваемая непосредственно на процесс резания, без учета затрат на преодоление сил трения в механизмах станка (зубчатых, червячных, клиноременных и реечных передачах, подшипниках, муфтах, кулачках и т.д.).

При точении эффективная мощность резания определяется по формуле [31]

$$N_{эф} = N_{P_z} + N_{P_y} + N_{P_x},$$

или

$$N_{эф} = \frac{P_z v_z}{60 \cdot 10^3} + \frac{P_y v_y}{60 \cdot 10^3} + \frac{P_x v_x}{60 \cdot 10^3}, \quad (3.8)$$

где P_z , P_y , P_x – составляющие силы резания, Н; v_z – скорость резания, м/мин: $v_z = v$; v_y – скорость перемещения резца в радиальном направлении, м/мин ($v_y = 0$, если обработка ведется методом продольной подачи); v_x – скорость продольной подачи ($v_x = 0$, если обработка ведется методом поперечной подачи). Так как величины v_y и v_x много меньше по сравнению со скоростью резания v_z , двумя последними слагаемыми в формуле (3.8) можно пренебречь. Каждое из этих слагаемых составляет обычно 1...2% от значения первого члена. Тогда

$$N_{эф} = \frac{P_z v_z}{60 \cdot 10^3}.$$

Определив эффективную мощность $N_{эф}$, можно найти мощность электродвигателя станка, необходимую для осуществления процесса резания:

$$N_{эд} = \frac{P_z v_z}{60 \cdot 10^3 \eta_{см} K_n},$$

где $\eta_{см}$ – КПД станка; K_n – коэффициент допускаемой кратковременной перегрузки. В большинстве случаев $K_n = 1,3 \dots 1,5$, а иногда $K_n = 2$.

Процесс обработки материалов резанием характеризуется также удельной работой резания $W_{уд}$, которая равна отношению работы резания W к объему снятого материала.

3.5. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

Общее тепловыделение в процессе резания Q (Вт) является результатом трансформации в теплоту механической работы деформации в зоне резания, а также работы трения на контактных поверхностях инструмента. В теплофизических расчетах принимают обычно

$$Q = P_z \nu,$$

где P_z – главная составляющая силы резания, Н; ν – скорость резания, м/с.

В свою очередь,

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{тр.п}} + Q_{\text{тр.з}},$$

где $Q_{\text{деф}}$, $Q_{\text{тр.п}}$, $Q_{\text{тр.з}}$ – соответ-

ственно, мощности источников, возникающих как результат перехода в теплоту работы деформации и работы трения на передней и задней поверхностях инструмента, Вт (рис. 3.18).

В соответствии с законами механики мощность теплообразующих источников может быть рассчитана по формулам [21]:

$$Q_{\text{деф}} = (P_z - F_3) \nu - F_n \nu_{\text{стр}} = (P_z - F_3) \nu - F_n \frac{\nu}{K_l} = \left(P_z - F_3 - \frac{F_n}{K_l} \right) \nu;$$

$$Q_{\text{тр.п}} = F_n \nu_{\text{стр}} = F_n \frac{\nu}{K_l}; \quad Q_{\text{тр.з}} = F_3 \nu.$$

Теплота, распространяясь по технологической системе, расходуется на нагревание инструмента $q_{\text{ин}}$, стружки $q_{\text{стр}}$, заготовки $q_{\text{заг}}$ и рассеивается в окружающую среду $q_{\text{окр.ср}}$:

$$Q = Q_{\text{деф}} + Q_{\text{тр.п}} + Q_{\text{тр.з}} = q_{\text{ин}} + q_{\text{стр}} + q_{\text{заг}} + q_{\text{окр.ср}}.$$

Количественные значения тепловых потоков зависят от различных условий резания и обычно составляют:

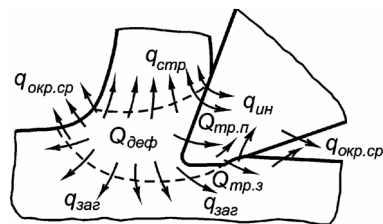


Рис. 3.18. Схема распределения тепловых потоков

$$\begin{aligned} q_{\text{ин}} &= (10...40\%)Q; & q_{\text{стр}} &= (45...85\%)Q; \\ q_{\text{заг}} &= (4...10\%)Q; & q_{\text{окр.ср}} &= (1...4\%)Q. \end{aligned}$$

Зная эти соотношения при различных видах обработки, можно сознательно управлять вышеуказанными тепловыми потоками и, соответственно, распределением теплоты.

Для определения основных характеристик теплонапряженности процесса резания применяются экспериментальные и расчетные методы. Общее количество теплоты, выделившееся при резании, количество теплоты, ушедшее в стружку, заготовку и инструмент, можно определить с помощью калориметра. Сущность метода калориметрирования заключается в том, что перед началом обработки инструмент и заготовку помещают в изолированный объем (калориметр). После этого измеряют их начальную температуру. Затем измеряют температуру инструмента и стружки после обработки. Зная их массу и удельную теплоемкость, можно определить количество тепла, выделившееся в единицу времени.

Для определения температур в зоне резания используют различные методы.

Метод по цветам побежалости. Этот метод используется для определения средней температуры стружки. В зависимости от количества теплоты, выделившейся в зоне резания, образовавшаяся стружка имеет различные цвета, которые называют цветами побежалости. По цвету побежалости при использовании соответствующих таблиц можно определить среднюю температуру стружки. Данный метод весьма прост, но дает значительные погрешности, связанные с тем, что определяется только температура окисленной поверхности стружки.

Метод термоласок. Этот метод применяется для определения поверхностной температуры нагретых частей инструмента. Он прост, нагляден, но не обеспечивает высокой точности измерения температуры.

Специальная термочувствительная краска наносится тонким слоем на контролируемые поверхности инструмента. Тепло, концентрирующееся в определенном месте инструмента, изменяет цвет краски. Каждая краска имеет определенную шкалу «цвет-температура», позволяющую определить зоны изменения температуры рабочей части инструмента. К недостаткам метода относится также то, что он не позволяет определить температуру контактных или близких к ним поверхностей.

Метод термопар. В настоящее время используют три вида термопар: «искусственные термопары», «полуискусственные термопары» и «естественные термопары».

В случае применения «искусственной термопары» (рис. 3.19) в необходимом месте режущей части инструмента просверливается отверстие, в которое вставляется термопара, состоящая из двух изолированных проводников диаметром 0,3...0,5 мм (хромель-копель, хромель-алюмель). Спай термопары 1 располагают как можно ближе к нагретым поверхностям инструмента, а холодные концы 2 выводятся к гальванометру 3 или другому регистрирующему прибору, например осциллографу. О температуре судят по показанию прибора, регистрирующего значение термоэлектродвижущей силы (термоЭДС). Преимуществом данной термопары является возможность измерения температуры по глубине инструмента, а недостатком – невозможность измерения температуры на поверхности.

При использовании «полуискусственной термопары» (рис. 3.20) один изолированный проводник 1 выводится на заднюю или переднюю поверхность инструмента и расклепывается или приваривается. Вторым проводником

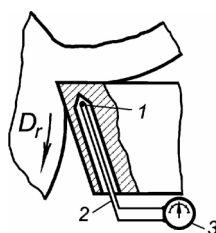


Рис. 3.19. Схема искусственной термопары

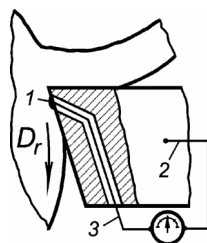


Рис. 3.20. Схема полуискусственной термопары

является тело инструмента. Преимуществом данной термопары является возможность измерения температуры на рабочих поверхностях инструмента, а недостатком – невозможность использования инструмента для дальнейшей работы.

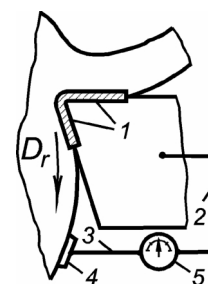


Рис. 3.21. Схема естественной термопары

Использование «естественной термопары» позволяет измерять температуру резания без применения специальных проводников и доработки инструмента. В этом случае проводниками являются заготовка и инструмент, которые тщательно изолируются, а горячим спаем – место контакта режущего клина с заготовкой 1 (рис. 3.21). Так как при механической обработке инструмент и деталь всегда перемещаются (вращательное движение, поступательное и т.д.), для передачи термотока от горячего спаю к неподвижному регистрирующему прибору 5 необходимо, помимо проводников 2 и 3, применять специальные конструкции токосъемников 4.

Радиационно-оптические и фотоэлектрические методы. Эти

методы дают возможность получить представление о распределении температур в зоне резания путем регистрации ее теплового излучения (рис. 3.22). Методы связаны с применением сложных оптических установок или фотоэлектрических датчиков и нашли применение при экспериментальных исследованиях процессов резания материалов.

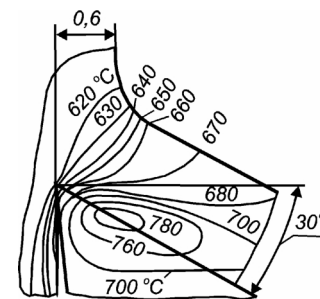


Рис. 3.22. Температурное поле в зоне резания стали 45, полученное радиационно-оптическим методом [15]: $v = 23$ м/мин, $a = 0,6$ мм, $\gamma = 30^\circ$

Метод структурного анализа. Под действием температуры в металлах происходят структурно-фазовые превращения и изменяется микротвердость. Эти явления используются в методе исследования температурного поля по анализу микроструктуры и измерениям микротвердости.

Для этого необходимо знать температуру и время структурных превращений в различных материалах. Метод позволяет построить изотермы на передней и задней поверхностях режущего инструмента.

На основании большого количества экспериментов созданы эмпирические зависимости для расчета температуры в зоне резания.

В этих формулах, как и в формулах для определения составляющих силы резания, температура является функцией многих переменных, характеризующих условия обработки, режимы резания, геометрические параметры инструмента и свойства инструментального и обрабатываемого материалов. Эмпирические зависимости имеют вид [5, 13]

$$\theta = C_{\theta} t^{x_{\theta}} S^{y_{\theta}} v^{z_{\theta}},$$

где C_{θ} – коэффициент, учитывающий конкретные условия резания; t – глубина резания; S – подача; v – скорость резания; $x_{\theta}, y_{\theta}, z_{\theta}$ – показатели степеней.

Очень важным для теории и практики механической обработки является разработка методов расчета температурного поля в зоне резания. Как правило, решение задач подобного рода осуществляется на основе решения линейного или нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности при определенных начальных и граничных условиях.

Линейное дифференциальное уравнение теплопроводности для движущегося по поверхности заготовки теплового источника имеет вид [21]

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \nabla^2 \theta + v_x \frac{\partial \theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \theta}{\partial y} + v_z \frac{\partial \theta}{\partial z},$$

где θ – температура; τ – время; a – коэффициент температуропроводности; v_x, v_y, v_z – проекции на оси координат вектора скорости движения теплового источника; x, y, z – координаты точек; $\nabla^2 \theta$ – оператор Лапласа.

Для решения дифференциальных уравнений в настоящее время наиболее широко используется метод источников (метод функций Грина), позволяющий путем сравнительно несложных преобразований представить температурное поле в виде определенного интеграла или сходящегося ряда и решить линейные, плоские, а также пространственные задачи распространения тепла в инструменте, стружке и заготовке.

Профессором А.Д. Макаровым сформулировано положение, согласно которому для каждой пары «инструмент – заготовка» существует оптимальная температура резания [17]. При этой температуре износ инструмента будет минимальным, а стойкость инструмента – наибольшей. На основании этого положения установлен порядок назначения режимов резания:

- назначается максимально возможная глубина резания;
- рассчитывается максимально возможная технологическая подача;
- рассчитывается скорость резания исходя из значения оптимальной температуры резания.

3.6. ВЛИЯНИЕ СМАЗЫВАЮЩЕ-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ НА ПРОЦЕСС РЕЗАНИЯ

Цель применения смазывающе-охлаждающих технологических средств (СОТС) – уменьшение изнашивания режущего инструмента, улучшение качества обрабатываемой поверхности и повышение производительности труда. Достичь этого можно направленным воздействием на элементарные физико-механические и механо – химические процессы, протекающие при резании металлов, путем надлежащего выбора СОТС и регулирования условий подачи СОТС в зону резания.

Существующие СОТС, применяемые при резании, делятся на смазывающе-охлаждающие жидкости (СОЖ), газообразные вещества, включающие газы, пары поверхностно-активных веществ, распыленные жидкости и пены, твердые смазывающие вещества.

На практике при механической обработке материалов наибольшее распространение получили СОЖ.

Смазочно-охлаждающие жидкости должны обладать: смазочным действием, обеспечивающим снижение трения в зоне контакта инструмента с заготовкой; охлаждающим действием, снижающим температуру составляющих технологической системы; расклинивающим действием, позволяющим уменьшить усилия и работу, необходимые для пластической деформации и разрушения срезаемого слоя; моющим действием, приводящим к удалению продуктов износа и стружки из зоны резания; защитным действием, обеспечивающим химическую защиту технологической системы от коррозии.

Смазочное действие. Физическая природа смазки при резании значительно отличается от механизма смазки деталей машин. При резании толщина смазывающей пленки соизмерима с размерами молекул, поэтому для активизации смазочного воздействия в СОЖ вводят химически активные вещества, такие как сера, фосфор, хлор, йод и т.д. Под действием высоких температур и давлений эти добавки образуют с материалами контактных поверхностей соединения, снижающие трение.

Охлаждающее действие. Охлаждающее действие СОЖ заключается в снижении температуры в зоне резания за счет интенсивного отвода тепла от нагретых участков инструмента и заготовки, и, как следствие, оно способствует повышению стойкости инструмента и улучшению состояния поверхностного слоя. Эффективность технологических сред в значительной мере определяется их физическими и теплофизическими свойствами. СОЖ должны обладать высокой теплопроводностью и объемной теплоемкостью, значительной скрытой теплотой парообразования и низкой вязкостью.

На эффективность охлаждения влияет также метод подвода СОЖ в зону резания.

Расклинивающее действие. В основе данного явления лежит эффект Ребиндера П.А., заключающийся в изменении механических свойств твердых тел под влиянием поверхностных физико-химических процессов. Активные молекулы технологических сред, проникая в микротрещины поверхностного слоя стружки или детали, адсорбируются на поверхностях трещины, оказывают расклинивающее действие и тем самым могут способствовать разрушению поверхности срезаемого слоя.

Моющее действие. Моющая способность СОЖ определяется степенью очистки обрабатываемой заготовки и режущего инструмента от шлама. Наилучшим моющим действием обладают маловязкие жидкости, к которым относятся сульфаты, керосин, содовые и мыльные растворы. Повышению моющего эффекта способствует увеличение количества СОЖ, подаваемого в зону резания, и увеличение скорости потока.

Защитное действие. Одним из главных способов защиты от коррозии при использовании СОЖ является добавление в них различных присадок, увеличивающих щелочность СОЖ и уменьшающих возможность образования ржавчины.

Все существующие в производстве СОЖ можно разделить на несколько групп:

- водные растворы мыл, масел и минеральных электролитов, эмульсии;
- минеральные и растительные масла, минеральные масла с добавками фосфора, серы и хлора, сульфозфрезолы, олеиновая кислота, четыреххлористый углерод и др.;
- керосин и растворы поверхностно-активных веществ в керосине, керосин с добавками растительных масел;
- масла и эмульсии с добавками твердых смазочных веществ.

Как уже отмечалось, эффективность действия СОЖ зависит от метода подвода их в зону резания. В производстве получили распространение такие методы, как метод охлаждения свободно падающей струей, метод высоконапорного охлаждения, метод внутреннего охлаждения инструмента и метод охлаждения распыленной жидкостью.

Метод охлаждения свободно падающей струей весьма прост. Однако при использовании данного метода имеет место большой расход СОЖ, который составляет порядка 8...12 л/мин, а в отдельных случаях, например, при черновом фрезеровании, он может достигать даже 20 л/мин. При этом характер подвода СОЖ, направление и форма струи должны быть отрегулированы в зависимости от применяемого вида обработки. Предельный срок использования эмульсии при обработке стали составляет 30 дней, а при обработке чугуна и латуни – 15 дней [31]. К недостатку данного метода, помимо большого расхода СОЖ, следует отнести её разбрызгивание, а также низкое смазочное действие.

При высоконапорном охлаждении жидкость в зону резания подается тонкой струей с большой скоростью со стороны задней поверхности инструмента и непосредственно под стружку. Данные условия обеспечиваются при давлении в магистрали, равном 1,5...2 МПа и диаметре отверстия в насадке – 0,4...0,6 мм. Вместе с тем применение данного метода требует использования специального оборудования, организации тщательной очистки СОЖ и применения специальных защитных устройств в связи с сильным разбрызгиванием СОЖ.

При таком виде охлаждения стойкость резцов из быстрорежущих сталей возрастает примерно в 3...7 раз по сравнению со стойкостью при методе охлаждения свободно падающей струей. Применение высоконапорного охлаждения при обработке резцами, оснащенными твердым сплавом, менее эффективно. Стойкость таких резцов возрастает лишь в 1,5 раза по сравнению со стойкостью при обычном охлаждении [25].

Внутреннее охлаждение режущих инструментов применяют при обработке малопластичных, жаропрочных сталей и сплавов. Использование данного метода позволяет увеличить скорость резания на 25...40 % и исключить вредное воздействие СОЖ на человека, но требует ее охлаждения.

При охлаждении инструмента и заготовки распыленной жидкостью СОЖ в зону резания подается в виде тумана со скоростью порядка 200...300 м/с. Туман образуется в результате распыления СОЖ сжатым воздухом. Расход жидкости при этом методе охлаждения весьма мал, в результате чего отпадает необходимость сбора, очистки и разложения отработавшей СОЖ. Распылённые СОЖ достаточно широко используются в автоматизированном производстве на агрегатных станках, автоматических линиях и на станках с ЧПУ. В этом случае период стойкости инструмента повышается в 2-4 раза по сравнению с обычным охлаждением свободно падающей струей и в 2 раза по сравнению с высоконапорным охлаждением [31]. Следует также отметить, что при данном методе охлаждения не требуется точного направления струи.

Во всех случаях при организации подвода СОЖ необходимо:

- подавать СОЖ как можно ближе к зоне резания;
- обеспечить максимальный распыл СОЖ;
- по возможности снизить температуру подводимой СОЖ;
- обеспечить одновременно охлаждение всех зон резания (при многоинструментальной обработке).

Правильное применение смазывающе-охлаждающих жидкостей позволяет повысить производительность обработки резанием в 2...3 раза, а стойкость инструментов – в 8...10 раз.

3.7. ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА

Износ и связанное с ним затупление режущего инструмента происходят в результате сложного взаимодействия механических, физических и химических явлений. Доминирование одного явления над дру-

гими приводит к различным видам изнашивания режущего инструмента. На основании многочисленных экспериментальных исследований процесса резания материалов установлены четыре основных вида изнашивания режущих инструментов: абразивное, адгезионное, диффузионное и химическое (окислительное).

Абразивное изнашивание инструмента происходит за счет царапания его рабочих поверхностей стружкой (элементами стружки), частицами нароста, а также твердыми включениями, имеющимися в материале обрабатываемой заготовки. Возможность царапания рабочих поверхностей режущего инструмента, более твердых по сравнению с обрабатываемой заготовкой, обусловлена тем, что инструментальный материал по своей основе неоднороден. В связи с этим на его рабочих поверхностях имеются участки как большей, так и меньшей твердости. Поэтому под воздействием вышеуказанных факторов происходит удаление частиц инструментального материала с менее твердых участков, разрыхление поверхностных слоев с последующим более интенсивным изнашиванием.

Адгезионное изнашивание заключается в молекулярном взаимодействии (схватывании) поверхностных слоев режущего инструмента и обрабатываемого материала и последующем вырывании частиц материала инструмента.

Природа данного явления обусловлена тем, что контактные поверхности режущего инструмента и обрабатываемого материала не являются идеально гладкими, то есть имеют вполне определенную шероховатость. Поэтому точками их соприкосновения в процессе резания являются выступающие участки микрорельефа (рис. 3.23), что вызывает в местах контакта большие удельные нагрузки, разрушающие окисные пленки.

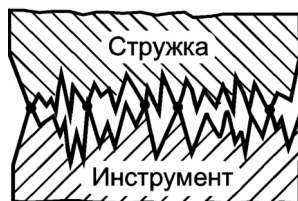


Рис. 3.23. Схема образования «мостиков холодной сварки»

В результате такого контакта происходит образование «мостиков холодной сварки», которые разрушаются и вновь образуются вследствие движения деформируемого материала относительно режущего клина. Причем процесс разрушения «мостиков» сопровождается вырыванием частиц инструментального материала и образованием адгезионных пятен. Данное явление активно проявляется, когда температура в зоне резания составляет более 600°C .

Диффузионное изнашивание инструмента происходит в результате взаимного растворения металла заготовки и материала инструмента. На активность процесса растворения оказывает влияние высокая температура ($900\ldots 1200^{\circ}\text{C}$) контактного слоя, возникающая при высокой скорости резания. Процесс диффузионного изнашивания приводит к изменению химического состава и физико-химических свойств поверхностных слоев инструмента, снижению его износостойкости. Поэтому диффузионное изнашивание можно рассматривать как разновидность химического изнашивания.

Химическое (окислительное) изнашивание имеет место при трении ювенильных контактных поверхностей стружки и режущего инструмента, происходящем при температурах, равных, примерно, $700\ldots 900^{\circ}\text{C}$, благодаря весьма высокой проникающей способности кислорода. Образующиеся в результате контакта кислорода с поверхностями стружки и инструмента окисные пленки являются достаточно хрупкими, быстро разрушаются и уносятся, оголяя нижележащие слои, после процесс повторяется вновь.

При агрессивном воздействии смазочно-охлаждающих веществ, происходит разрушение поверхностных слоев путем образования окислов, растравливания и растворения зерен в сочетании с царапанием, истиранием и схватыванием.

Износ инструмента происходит по определенным закономерностям. В самом общем виде, независимо от вида изнашивания и типа

режущего инструмента, зависимость его износа от времени работы может быть представлена в виде графика, показанного на рис. 3.24.

На данной графической зависимости можно выделить три характерные зоны:

I – зона начального износа или зона приработки инструмента ($h_i \sim 0,05 \dots 0,1$ мм). В этой зоне инструмент подвергается в основном абразивному износу;

II – зона нормального износа. Значение износа h_{II} , соответствующее точке 2 перегиба на кривой износа, называется величиной допустимого износа, которая может составлять 1...2 мм. В этой зоне доминирующим является, как правило, адгезионный износ.

III – зона катастрофического износа. Если не допускать работу инструмента в зоне III, то срок его службы значительно увеличится. В этой зоне превалирует диффузионный и химический износ.

В процессе работы режущего инструмента происходит сложное взаимодействие инструмента и обрабатываемого материала, в результате которого инструмент изнашивается. В зависимости от условий обработки характер изнашивания режущего инструмента может быть разным:

- преимущественно изнашивается передняя поверхность и незначительно задняя;
- преимущественно изнашивается задняя поверхность и незначительно передняя;
- затупление (скругление) режущего лезвия инструмента.

Изнашивание по передней поверхности инструмента происходит при резании пластичных материалов, когда задняя поверхность предохраняется от изнашивания образующимся наростом ($v = 20 \dots 40$

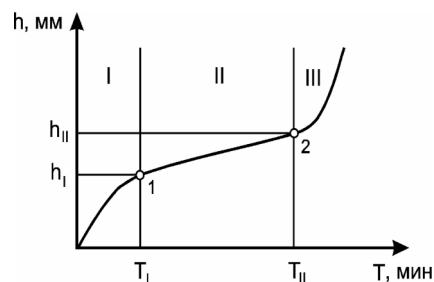


Рис. 3.24. Зависимость износа инструмента от времени работы

м/мин, а величина переднего угла γ имеет небольшое положительное или отрицательное значение), а также в том случае, когда температура на площадках контакта передней поверхности значительно больше, чем задней, например, при обработке титановых сплавов.

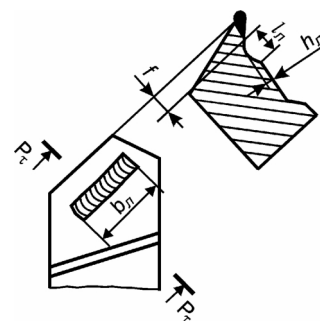


Рис. 3.25. Износ по передней поверхности резца

При этом на передней поверхности инструмента образуется лунка, которая характеризуется длиной l_l , шириной b_l и глубиной h_l (рис. 3.25). В начальный момент времени лунка образуется на некотором расстоянии f от режущей кромки, а затем постепенно развивается по направлению к этой кромке с увеличением своих геометрических параметров.

Изнашивание по задней поверхности инструмента происходит при резании малопластичных и хрупких материалов, обладающих значительным упругим восстановлением после обработки, а также при работе с малыми задними углами α и представляет собой площадку износа шириной h_z с задним углом $\alpha = 0^\circ$ (рис. 3.26).

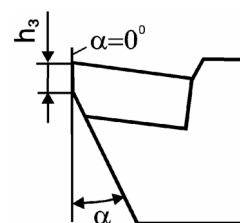


Рис. 3.26. Износ по задней поверхности резца

Износ по задней поверхности влияет на получение точных размеров обрабатываемой заготовки, что видно на рис. 3.27.

Для обеспечения заданной точности размера заготовки необходимо, чтобы выполнялось условие $h_p \leq \frac{\delta}{2}$ или

$\delta \geq 2h_p$, где h_p – радиальный износ резца

в процессе обработки; δ – допуск на заданный размер заготовки.

Как видно из рис. 3.27, $tg\alpha = \frac{h_p}{h_3}$, отсюда $h_3 = \frac{h_p}{tg\alpha}$. Учитывая выражение для h_p , получим:

$$h_3 = \frac{\delta}{2tg\alpha}.$$

Затупление (скругление) режущего лезвия инструмента происходит при чистовой обработке материалов, обладающих малой теплопроводностью, при глубине резания $t \leq 1$ мм.

В производстве большое значение имеет установление критерия изнашивания режущего инструмента, так как было бы неправильно доводить режущие кромки до полного разрушения. В связи с этим устанавливается определенный (условный) критерий изнашивания, по достижении которого инструмент снимается со станка и перетачивается.

Наиболее удобно с точки зрения контроля рассматривать износ по задней поверхности инструмента. Поэтому чаще всего за критерий изнашивания принимают величину допустимого износа (см. рис. 3.26) по задней поверхности h_3 .

При черновой обработке сталей величина допустимого износа по задней поверхности у резцов из быстрорежущих сталей составляет 1,5...2 мм, а у твердосплавных резцов – 1...1,4 мм.

Представленные в справочной литературе величины допустимого износа по задней поверхности для условий черновой обработки даны для инструментов, работающих с экономическим (нормативным) периодом стойкости. При выполнении чистовых операций на первый план выступают требования по обеспечению точности и шероховатости поверхности. Поэтому в качестве критерия изнашивания принимают величину, соответствующую 0,5 от значения допус-

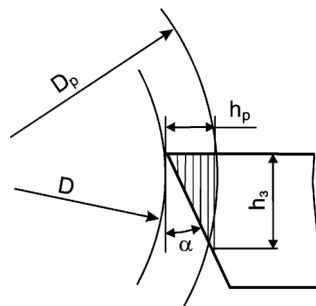


Рис. 3.27. Схема влияния износа на точность обработки заготовки

тимого износа. Этот критерий изнашивания получил название «технологический критерий изнашивания».

В производственных условиях для определения износа пользуются *критериями затупления*.

Визуальные критерии. При значительном износе резца по задней поверхности возрастают силы трения и на поверхности резания появляется блестящая полоска или темные пятна, слышен характерный скрип.

Критерии, связанные с измерением инструмента. Момент прекращения работы инструмента определяется путем измерения величины площадок и лунок износа, например при помощи лупы Бринелля.

Технологические критерии. Момент достижения инструментом соответствующего критерия затупления связан с проявлением косвенных признаков затупления инструмента: увеличение эффективной мощности резания, появление вибраций, изменение размеров обрабатываемой заготовки и т.д.

3.8. СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА

Стойкость – это свойство инструмента сохранять режущую способность при воздействии физико-механических и химических процессов, имеющих место при резании материалов. Это важный технологический фактор, влияющий на производительность и стоимость обработки резанием.

Количественной характеристикой стойкости является период стойкости – время работы режущего инструмента до допустимой величины износа, определяемой критерием затупления. Период стойкости инструмента не является величиной постоянной и зависит от различных условий обработки, таких как режим резания, свойства обрабатываемого материала, жесткость оборудования, а также от применяемых СОЖ и геометрии заточки. Для выявления влияния условий обработки на период стойкости проводят специальные стойкостные испытания.

Скорость резания оказывает наибольшее влияние на период стойкости режущего инструмента. Поэтому зависимость $T = f(v)$ представля-

ет наибольший практический интерес. Для получения этой зависимости проводят экспериментальные исследования, в ходе которых изменяется только скорость резания, а все остальные параметры процесса остаются неизменными. Методика эксперимента заключается в следующем:

1) выполняются исследования влияния скорости резания v на износ h инструмента, причем инструмент доводится до полного разрушения. По результатам исследования строятся графики зависимости величины износа от продолжительности обработки $h = f(\tau)$ при различных v (рис. 3.28);

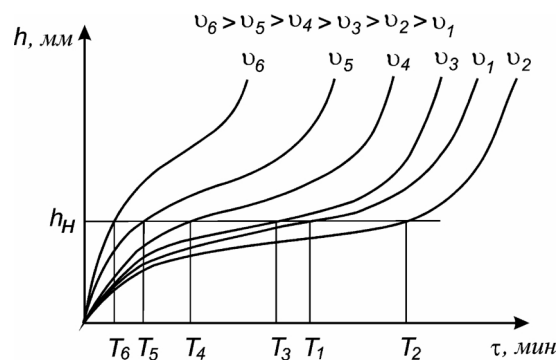


Рис. 3.28. Зависимости величины износа инструмента от времени работы при различных значениях скорости резания

2) на полученные графики $h = f(\tau)$ наносится линия, соответствующая допустимому износу инструмента, который берется из нормативов по режимам резания;

3) определяются периоды стойкости инструмента ($T_1 - T_6$) при различных скоростях резания ($v_1 - v_6$);

4) на основе графических зависимостей, представленных на рис. 3.28, строят графическую зависимость $T = f(v)$ (рис. 3.29);

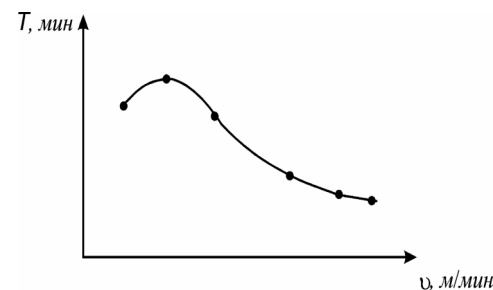


Рис. 3.29. Зависимость периода стойкости инструмента от скорости резания

5) проводится анализ полученной графической зависимости $T = f(v)$, на основе которого можно сделать вывод, что для практических целей представляет интерес ниспадающая ветвь графика, так как в зоне восходящей ветви очень небольшие

скорости резания, а следовательно, невысокая производительность обработки. Ниспадающая ветвь графика в определенном диапазоне изменения скоростей может быть описана зависимостью вида

$$T = \frac{A}{v^z},$$

получившей наименование зависимости Тейлора;

6) находятся численные значения коэффициента A , учитывающего конкретные условия обработки, и показателя степени z при скорости v . Для этого выражение Тейлора логарифмируют, после чего оно приобретает вид $\ln T = \ln A - z \ln v$. В двойных логарифмических координатах полученное выражение трансформируется в прямую зависимость (рис. 3.30) вида $y = a - bx$.

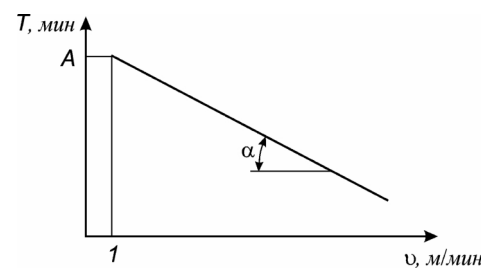


Рис. 3.30. Зависимость Тейлора в двойных логарифмических координатах

При $v = 1$ м/мин $\ln 1 = 0$, поэтому $A = T$.

Показатель степени z в зависимости Тейлора находится как тангенс угла наклона прямой линии к оси абсцисс $z = \operatorname{tg} \alpha$. Он характеризует интенсивность влияния v на T .

Обычно для практических целей пользуются обратной зависимостью Тейлора, а именно:

$$v_T = \frac{A^{\frac{1}{z}}}{T^{\frac{1}{m}}} = \frac{B}{T^m},$$

где v_T – допустимая скорость резания при заданной стойкости, м/мин; $B = A^{\frac{1}{z}}$ – постоянный коэффициент, учитывающий конкретные условия обработки; $m = \frac{1}{z}$ – показатель относительной стойкости ($m = 0,1 \dots 0,4$).

Аналогичные выражения могут быть получены для частных зависимостей «период стойкости – подача» ($T - S$) и «период стойкости – глубина» ($T - t$). Эти зависимости будут иметь вид

$$T = \frac{N}{S^y}; \quad T = \frac{K}{t^x},$$

где N и K – постоянные коэффициенты, учитывающие конкретные условия обработки; y, x – показатели степеней, учитывающие, соответственно, интенсивность влияния S и t на период стойкости инструмента.

Зная частные зависимости, можно получить общую зависимость, связывающую параметры режима резания со стойкостью:

$$T = \frac{C_T}{v_T^z S^y t^x} \quad \text{или} \quad v_T = \frac{C_T^{\frac{1}{z}}}{T^{\frac{1}{z}} S^{\frac{y}{z}} t^{\frac{x}{z}}} = \frac{C_v'}{T^m S^{y_v} t^{x_v}},$$

где $C_T = \frac{A + N + K}{3}; \quad C_v' = C_T^{\frac{1}{z}}.$

Представленная зависимость получена для конкретных условий обработки. Для распространения этой зависимости для других условий резания необходимо вместо C_v' ввести коэффициент C_v , определяемый по формуле

$$C_v = C_v' K_{Mv} K_{Cv} K_{\gamma v} K_{\alpha v} K_{\varphi v} K_{rv} K_{hv} K_{ov},$$

где K_{Mv} – коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала; K_{Cv} – коэффициент, учитывающий состояние обрабатываемого материала; $K_{\gamma v}, K_{\alpha v}, K_{\varphi v}$ – коэффициенты, учитывающие геометрию инструмента; K_{rv} – коэффициент, учитывающий радиус при вершине режущего лезвия; K_{hv} – коэффициент, учитывающий износ инструмента; K_{ov} – коэффициент, учитывающий смазывающе-охлаждающую жидкость.

Большое практическое значение имеет правильный выбор периода стойкости инструмента, оказывающего существенное влияние на себестоимость операции.

На себестоимость операции влияют два основных фактора, зависящие от режима резания: производительность обработки и затраты, связанные с эксплуатацией режущего инструмента. Чем интенсивнее режим резания, тем выше производительность обработки, но тем меньше стойкость инструмента, а следовательно, больше расходы на его эксплуатацию. Поэтому можно подобрать такие значения подачи, глубины и скорости, при которых себестоимость операции будет наименьшей.

С учетом того, что подача и глубина резания влияют на период стойкости инструмента в значительно меньшей степени, чем скорость, в практике принята вполне определенная последовательность при назначении режима резания.

В первую очередь назначается максимально возможная глубина резания, затем – максимально допустимая подача; на выбор глубины резания и подачи влияют точность и шероховатость обрабатываемой поверхности, жесткость технологической системы, припуск на обработку,

кинематические возможности станка и т.д. После этого определяют скорость резания в соответствии с принятым периодом стойкости.

Различают следующие периоды стойкости:

1) T_M – максимальный период стойкости инструмента, соответствующий точке максимума кривой $T = f(v)$ (см. рис. 3.29). Этой точке соответствует скорость резания v_M (рис. 3.31);

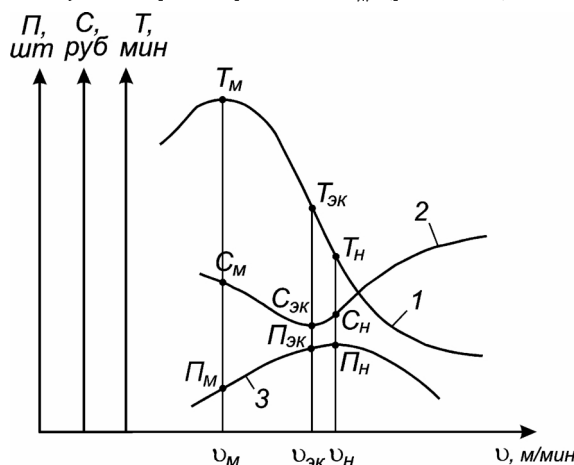


Рис. 3.31. Схема влияния скорости резания на стойкость (1), себестоимость (2) и производительность обработки (3)

2) $T_{ЭК}$ – экономический период стойкости инструмента, соответствующий наименьшей себестоимости обработки. Этому периоду стойкости соответствует скорость резания $v_{ЭК}$ (см. рис. 3.31);

3) T_H – период стойкости, соответствующий наибольшей (максимальной) производительности. Данному периоду стойкости соответствует скорость v_H (см. рис. 3.31).

Рассмотрим зависимости между скоростью резания и стойкостью, себестоимостью и производительностью. Как видно из рис. 3.31, экономическая скорость резания $v_{ЭК}$ значительно больше, чем

v_M , а период стойкости $T_{ЭК} < T_M$. Работа на скорости v_M является неэффективной из-за низкой производительности Π_M и высокой себестоимости C_M . С увеличением скорости до $v_{ЭК}$ период стойкости снижается до $T_{ЭК}$, себестоимость уменьшается до минимального значения, а производительность повышается до значения $\Pi_{ЭК}$, близкого к Π_H . При этом достигаются высокая размерная стойкость инструмента и минимальный его расход. Дальнейшее повышение скорости приводит к незначительному повышению производительности, но к более значительному росту себестоимости обработки и расходу инструмента. Поэтому при правильном построении производственного процесса определение наивыгоднейших условий обработки должно основываться на экономическом периоде стойкости. При использовании в расчетах экономических периодов стойкости режимы резания, обеспечивающие наименьшее время резания, будут одновременно и наиболее экономичными.

Режимы резания, соответствующие периоду стойкости наибольшей производительности, используют в исключительных случаях, когда, не считаясь с затратами в единицу времени, необходимо изготовить максимальное количество деталей.

3.9. ФОРМИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

3.9.1. ПОНЯТИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В современном производстве конкурентоспособность выпускаемой продукции во многом зависит от её качества, которое определяется качеством сборочных единиц, механизмов и отдельных деталей. То есть качество продукции машиностроения будет во многом определяться не только материалами, из которых изготовлены детали, но и технологией их изготовления.

Под качеством поверхности детали следует понимать точность изготовления её геометрических параметров и совокупность физико-механических характеристик поверхностного слоя.

К геометрическим параметрам, характеризующим качество поверхности, относятся: линейные и угловые размеры, отклонения формы, волнистость и шероховатость. Основными физико-механическими характеристиками поверхностного слоя являются: микротвердость, остаточные напряжения и структурно-фазовое состояние.

Отклонения формы. Отклонения формы устанавливает ГОСТ 24642-81. Отклонения формы плоских поверхностей характеризуются отклонением от прямолинейности в плоскости и отклонением от плоскостности. Отклонения формы цилиндрических поверхностей характеризуются отклонением от круглости, отклонением профиля продольного сечения и отклонением от цилиндричности.

Волнистость поверхности. Представляет собой совокупность периодически повторяющихся неровностей на поверхности детали. Государственного стандарта на волнистость не существует, а только рекомендации РС 3951-73. В соответствии с рекомендациями волнистость характеризуется: высотой волнистости W_z , максимальной высотой волнистости $W_{\max}$ и средним шагом волнистости S_W . Причиной появления волнистости может быть недостаточная жесткость технологической системы.

Шероховатость поверхности. Представляет собой совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих ее рельеф в пределах базовой длины. Микронеровности формируются в результате взаимодействия обрабатываемой поверхности с режущим инструментом. На величину шероховатости поверхности в наибольшей степени влияют: геометрические параметры режущего инструмента, элементы режима резания и свойства обрабатываемого материала.

В соответствии с ГОСТ 2789-73 количественная оценка шероховатости поверхности может производиться по следующим шести параметрам: Ra , Rz , $R_{\max}$, S_m , S и t_p .

Физико-механические свойства поверхностного слоя. Механические, физические и химические свойства поверхностного слоя деталей машин, а также его напряженное состояние отличаются от тех, которые имеют место в сердцевине детали. При этом глубина поверхностного слоя в зависимости от вида и метода обработки, как показывают экспериментальные исследования, может составлять от нескольких микрометров до десятых долей миллиметра. Отличие свойств поверхностного слоя от свойств сердцевины обусловлено суммой механических, тепловых и физико-химических воздействий на поверхность металла в процессе обработки, в результате чего формируются микронеровности, остаточные напряжения, изменяется структура и микротвердость [31].

3.9.2. МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

На формирование шероховатости поверхности в процессе обработки оказывают влияние геометрия режущего инструмента, упругая и пластическая деформация материала, а также вибрации, имеющие место в технологической системе. При этом уровень вибраций во многом будет определяться состоянием режущего инструмента и жесткостью технологической системы.

Механизм образования геометрической составляющей высоты микронеровностей Rz_p , в частности при точении, подробно рассмотрен в 1.2.5. В том случае, если $S_o > r$, для расчета шероховатости может быть использована эмпирическая зависимость $Rz_p = \frac{S_o^2}{8r}$ [31].

В условиях реального процесса обработки металлов резанием впереди режущего клина инструмента и под обработанной поверхностью образуется зона пластической деформации. Пластическая деформация вносит существенные изменения в регулярный профиль поверхности. В этом случае значение параметра Rz можно определить по формуле, представленной в работе [31]:

$$Rz = Rz_p + \Delta Rz,$$

где Rz_p – геометрическая составляющая высоты микронеровностей (расчетная величина гребешков); ΔRz – приращение высоты неровностей. Это приращение является суммой трех слагаемых

$$\Delta Rz = \Delta Rz_{пл} + \Delta Rz_{упр} + \Delta Rz_{тр.з.},$$

где $\Delta Rz_{пл}$ – приращение высоты микронеровностей в результате пластического течения металла в направлении вершины остаточного гребешка; $\Delta Rz_{упр}$ – приращение высоты микронеровностей, вызванное упругим восстановлением поверхностного слоя заготовки; $\Delta Rz_{тр.з.}$ – приращение, вызванное трением задней поверхности инструмента об обработанную поверхность.

При затуплении режущего инструмента шероховатость обработанной поверхности возрастает: при точении – на 50...60 %, фрезеровании цилиндрическими фрезами – на 100...115 %, фрезеровании торцовыми фрезами – на 35...45 %, сверлами – на 30...40 % и развертывании – на 20...30% [31].

Изменение параметров режима резания оказывает влияние на шероховатость поверхности.

С увеличением скорости резания при обработке материалов, не склонных к наростообразованию, высота микронеровностей уменьшается, а при обработке материалов, склонных к наростообразованию, зависимость $Rz = f(v)$ носит экстремальный характер (рис. 3.32, а). Зависимость $Rz = f(S)$, как видно из рис. 3.32 б, имеет четко

выраженный минимум. Это обусловлено тем, что с уменьшением величины подачи уменьшается толщина сечения среза и, следовательно, радиус округления режущей кромки становится соизмеримой с ней. А это, в свою очередь, приводит к неустойчивости процесса стружкообразования, росту сил трения на задней поверхности инструмента и, соответственно, увеличению высоты микронеровностей. С увеличением подачи, как видно из формулы (1.1), высота микронеровностей возрастает. Таким образом, для конкретных условий обработки имеет место оптимальная подача.

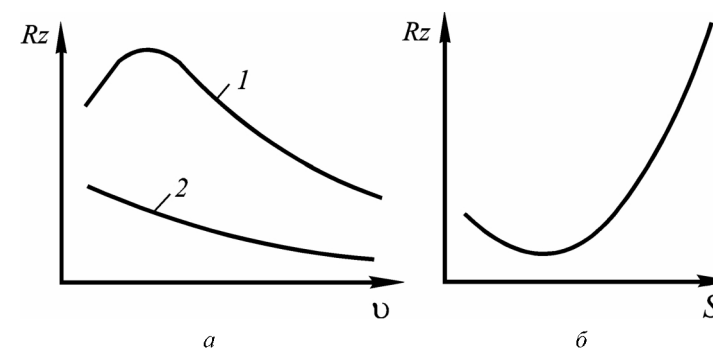


Рис. 3.32. Типовые зависимости $Rz = f(v)$ (а) и $Rz = f(S)$ (б) [31]:
1 – для материалов, образующих нарост; 2 – для материалов, не образующих нарост

При цилиндрическом фрезеровании, в отличие от операций точения, размеры инструмента оказывают значительное влияние на формирование шероховатости в продольном направлении, т.е. измеренной в направлении продольной подачи стола. Величина микронеровностей в этом направлении в большинстве случаев бывает больше величины микронеровностей в поперечном направлении, поэтому может использоваться для оценки шероховатости поверхности заготовки. С определенными допущениями величина параметра Rz может быть подсчитана по формуле

$$Rz = \frac{S_z^2}{8r},$$

где S_z – подача фрезы на зуб, мм; r – радиус фрезы, мм.

При наличии радиального биения фрезы шероховатость поверхности можно рассчитать по формуле

$$Rz = \frac{zS_z}{8(r+e)},$$

где z – число зубьев фрезы; e – эксцентриситет (смещение оси вращения фрезы относительно оси её вращения).

3.9.3. ОСТАТОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ

При осуществлении процесса резания поверхностный слой обрабатываемой заготовки деформируется и изменяются его физико-механические свойства: как правило, повышаются все прочностные характеристики (пределы прочности и текучести, микротвердость и твердость); понижается пластичность (относительное удлинение и относительное сужение); изменяется форма и ориентация зерен и образуется текстура; появляются трещины как внутри зерен, так и между ними и т.д.

Повышение прочностных свойств и твердости металла при его пластическом деформировании называют наклепом. Пластическая деформация поверхностного слоя заготовки может характеризоваться многими показателями, однако чаще всего физико-механические свойства материала поверхностного слоя оцениваются тремя основными параметрами [23]:

1) степенью наклепа поверхностного слоя, которая определяется по формуле

$$\Delta H_v = \frac{H_{vH} - H_{vc}}{H_{vc}} \cdot 100\%,$$

где H_{vH} – наибольшая микротвердость поверхностного слоя; H_{vc} – микротвердость ненаклепанного материала (сердцевины) (рис. 3.33);

2) глубиной наклепанного слоя h_H ;

3) характером распределения, величиной и знаком остаточных напряжений, действующих в поверхностном слое деталей.

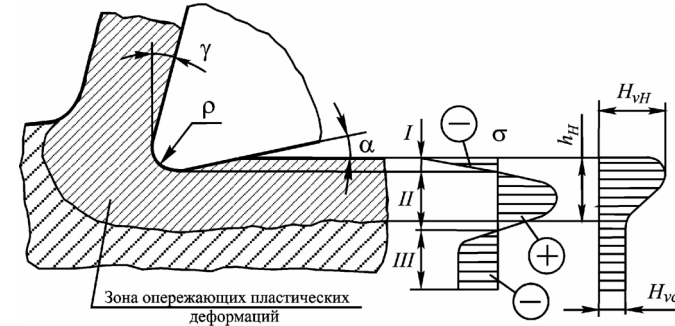


Рис. 3.33. Остаточные напряжения и микротвердость поверхностного слоя материала [5]

Между степенью наклепа и его глубиной, как показали многочисленные экспериментальные исследования поверхностного слоя после операций механической обработки, существует связь:

$$h_H = k\Delta H_v,$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материала детали и условий резания.

При механической обработке параметры наклепа могут изменяться в широких пределах. Так, глубина наклепа изменяется в пределах от 0,05 до 0,5 мм, а степень наклепа: $\Delta H_v = 10...20\%$ – для малопластичных и твердых материалов (титановые сплавы и закаленные стали); $\Delta H_v = 20...40\%$ – для конструкционных сталей и сплавов на никелевой основе; $\Delta H_v = 30...70\%$ – для жаропрочных и нержавеющей сталей.

Наклеп и формируемые в процессе обработки остаточные напряжения являются результатом действия на заготовку сил резания, температуры, а также структурных и фазовых превращений, если последние имели место в поверхностном слое на этапе обработки.

При обработке заготовок лезвийным инструментом на рациональных режимах остаточные напряжения, формируемые в поверхностном слое большинства конструкционных материалов, образуются главным образом под действием силового поля. Температура в этом случае, как правило, имеет второстепенное значение. При обработке хрупких материалов остаточные напряжения – сжимающие, а при обработке пластичных материалов – чаще всего растягивающие. При работе на интенсивных режимах резания, характеризующихся высокой температурой, в поверхностном слое происходят структурные и фазовые превращения, которые способствуют формированию в поверхностном слое заготовок растягивающих остаточных напряжений, снижающих предел выносливости материалов.

На рис. 3.33 представлена эпюра, отражающая характер распределения остаточных напряжений по нормали к обработанной поверхности. В поверхностном слое материала толщиной 1-4 мкм (зона I) действуют сжимающие напряжения. В зоне II, протяженность которой зависит от режима резания и переднего угла формообразующего инструмента, действуют растягивающие остаточные напряжения. Протяженность зоны II в 10 и более раз превосходит размеры зоны I, и поэтому состояние поверхностного слоя заготовки определяют характер и величина остаточных напряжений в зоне II; в зоне III действуют сжимающие напряжения, уравнивающие действие остаточных напряжений первых двух зон [5].

ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 3

1. Какие виды стружек образуются при резании металлов?
2. Изложите механизм образования стружки?
3. Что такое усадка стружки?
4. Что является количественной характеристикой величины деформации?

5. Какая зависимость связывает относительный сдвиг с коэффициентом усадки стружки?
6. Что такое граничный слой?
7. Изобразите характер распределения нормальных и касательных напряжений вдоль площадки контакта стружки с передней поверхностью инструмента?
8. По какой формуле определяется средний коэффициент трения на передней поверхности инструмента?
9. Что такое наростообразование?
10. Какие силы действуют на инструмент при свободном прямоугольном резании?
11. Какие силы действуют на инструмент при несвободном резании?
12. Как определяется мощность источника тепла в зоне резания?
13. Как записывается уравнение теплового баланса?
14. Какие методы определения температуры используются при резании металлов?
15. Каким образом влияют смазывающе-охлаждающие технологические средства на процесс резания?
16. Какие виды износа инструментов имеют место при обработке материалов?
17. Износ по какой поверхности инструмента наиболее удобно рассматривать с точки зрения контроля?
18. Какие существуют критерии изнашивания инструментов?
19. Что такое стойкость инструмента?
20. Как определяется зависимость стойкости инструмента от параметров режима обработки?
21. Назовите критерии, используемые при определении периода стойкости инструмента.
22. Что следует понимать под качеством поверхности детали?
23. Что относится к геометрическим параметрам, характеризующим качество поверхности?
24. Напишите расчетные зависимости для определения величины шероховатости поверхности на операциях точения и цилиндрического фрезерования.
25. Как влияет изменение параметров режима резания на величину шероховатости поверхности?
26. Как влияет износ режущего инструмента на изменение шероховатости поверхности?
27. Какие параметры характеризуют физико-механические свойства поверхностного слоя?

4. СВЕРЛЕНИЕ, ЗЕНКЕРОВАНИЕ И РАЗВЕРТЫВАНИЕ

4.1. СВЕРЛЕНИЕ

Сверление – это процесс получения резанием глухих и сквозных цилиндрических отверстий в сплошном материале, осуществляемый на сверлильных и токарных станках. Если диаметр отверстия, которое требуется получить в процессе обработки, $D \geq 30$ мм, то для его изготовления используют два сверла. Первое – для сверления ($d_1 = 0,2...0,4D$), а второе – для рассверливания ($d_2 = D$).

При обработке отверстий сверлами из быстрорежущих сталей обеспечивается точность в пределах 11...13 квалитетов и шероховатость поверхности $Rz = 80...32$ мкм. Сверла с пластинами из твердых сплавов, работающие на более высоких скоростях резания, обеспечивают обработку отверстий с точностью по 8...11 квалитетам и шероховатостью поверхности $Rz = 40...20$ мкм.

В нашей стране принята единая градация диаметров сверл, регламентируемая ГОСТ 885–77 и охватывающая практически все размеры отверстий до 80 мм. Выпускаются следующие разновидности сверл: спиральные, перовые, одностороннего резания (пушечные), кольцевые и комбинированные [15, 19].

Наибольшее распространение при обработке отверстий глубиной до $(5...10)d$ получили спиральные, или винтовые, сверла. Конструкция спирального сверла с коническим хвостовиком приведена на рис. 4.1.

Спиральное сверло состоит из рабочей части l и хвостовика l_x . На рабочей части, в свою очередь, можно выделить режущую часть l_p и направляющую часть l_n . Для выбивания сверл с коническим хвостовиком из отверстия шпинделя предусмотрена лапка l_d . Между

рабочей частью и коническим хвостовиком сверла довольно часто имеется переходная часть сверла в виде шейки $l_{ш}$.

Спиральные сверла могут иметь цилиндрический хвостовик (при диаметре $d = 0,1...20$ мм) или конический хвостовик (при $d = 6...80$ мм).

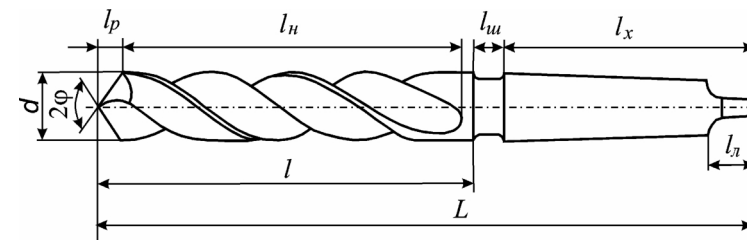


Рис. 4.1. Конструкция спирального сверла с коническим хвостовиком

4.1.1. ГЕОМЕТРИЯ СПИРАЛЬНОГО СВЕРЛА

Рабочая часть сверла осуществляет процесс резания и отвод стружки из отверстия, формирует поверхность обрабатываемого отверстия и направляет сверло при обработке. Она выполняется в виде двух зубьев, образованных спиральными канавками и связанных между собой сердцевинной диаметром d_c (рис. 4.2), величина которого составляет 0,12...0,3 от диаметра сверла.

Режущая часть сверла выполнена в виде усеченного конуса и имеет два режущих лезвия. На режущем лезвии следует различать (см. рис. 4.2): 1 – переднюю поверхность A_f , 2 – главную заднюю поверхность A_α . На направляющей части располагаются две вспомогательные задние поверхности A'_α (направляющие ленточки 3), выступающие над спинкой сверла 7.

Передние поверхности представляют собой линейчатые винтовые поверхности, плавно сопрягающиеся с поверхностями стружкоотводящих канавок. Главные задние поверхности обращены к по-

Геометрия режущей части сверла рассматривается в главной секущей ($P_\tau - P_\tau$) и осевой (рабочей ($P_s - P_s$)) плоскостях.

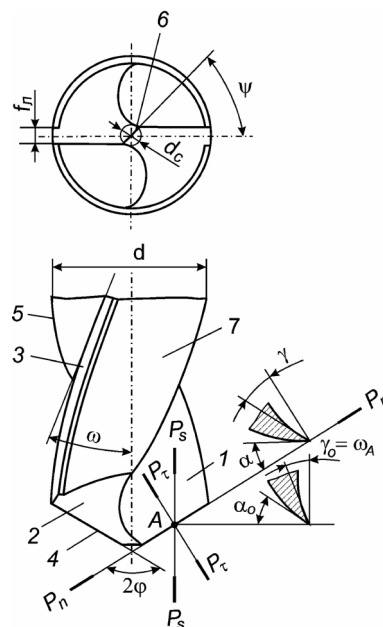


Рис. 4.2. Рабочая часть
спирального сверла

Во избежание этого сверла затачивают таким образом, чтобы задний угол в статическом состоянии увеличивался по мере прибли-

жения к оси сверла: на периферии угол α_o делают равным $8...12^\circ$ с постепенным его увеличением к центру до $20...25^\circ$.

4.1.2. ЭЛЕМЕНТЫ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Процесс сверления совершается при двух совместных движениях: вращательном движении сверла или заготовки (главное движение D_r) и поступательном движении сверла вдоль его оси (движение подачи D_s). На рис. 4.3 показана схема резания при сверлении.

Скорость главного движения определяет скорость резания v (м/мин), максимальная величина которой рассчитывается по формуле

$$v = \frac{\pi d n}{1000},$$

где d – диаметр сверла или обрабатываемого отверстия D , мм; n – частота вращения сверла или заготовки, об/мин.

Скорость поступательного движения сверла (движения подачи) характеризуют величиной подачи S . Различают три вида подачи: S_m – минутную подачу, мм/мин; $S_o = \frac{S_m}{n}$ – подачу на один оборот, мм/об; $S_z = \frac{S_m}{nz}$ – подачу на один зуб, мм/зуб, где z – число режущих зубьев (у сверл, как правило, два).

Глубина резания при сверлении $t \approx 0,5D$, мм. Толщина срезаемого слоя a_z (мм) – это минимальное расстояние между двумя последовательными положениями режущей кромки за один оборот сверла, измеренное перпендикулярно режущей кромке:

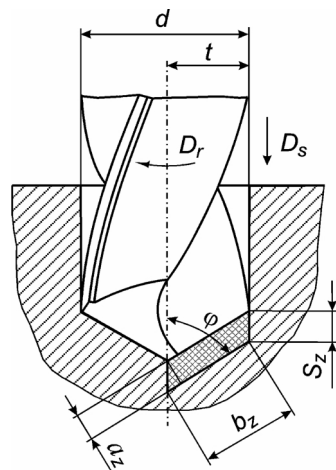


Рис. 4.3. Элементы режима резания при сверлении

$$a_z = S_z \sin \varphi = \frac{S_o}{2} \sin \varphi.$$

Ширина срезаемого слоя b_z (мм) измеряется вдоль режущей кромки сверла и равна ее длине: $b_z = \frac{t}{\sin \varphi}$.

Площадь поперечного сечения f (мм²), приходящаяся на обе режущие кромки, определяется по формуле

$$f = t S_o = \frac{D}{2} S_o = 2 a_z b_z.$$

4.1.3. СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Природа сил резания, действующих на сверло, аналогична природе сил, действующих на режущий клин токарного резца. Вместе с тем резание при сверлении имеет ряд отличительных особенностей от процесса резания при точении. Спиральное сверло является многолезвийным инструментом и совершает работу пятью режущими кромками (двумя главными, двумя вспомогательными и поперечной). На каждую режущую кромку сверла действует равнодействующая сила сопротивления P (рис. 4.4), приложенная к некоторой точке A ; на поперечную кромку действует сила $P_{пк}$, направленная вдоль

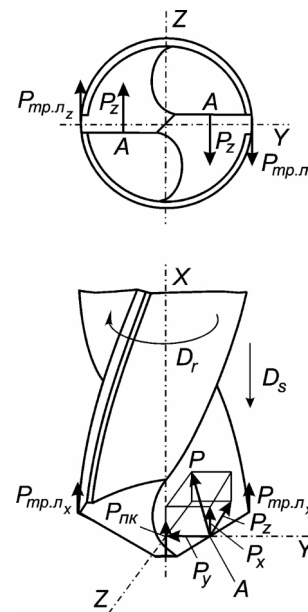


Рис. 4.4. Силы, действующие на сверло

оси X – против движения подачи D_s , и пара сил, лежащих в плоскости, перпендикулярных к оси сверла (на рис. 4.4 данные силы не показаны); на каждую направляющую ленточку действует сила трения ленточки $P_{тр.л}$ об обработанную поверхность.

Сила P может быть разложена на составляющие силы P_x , P_y , P_z по осям X , Y , Z .

Силы P_y на режущих кромках направлены навстречу друг другу и при симметричной заточке равны по величине, причем действие их уравнивается и равно нулю. Осевая сила P_o (Н), действующая вдоль оси сверла, равна

$$P_o = 2P_x + P_{нк} + 2P_{тр.л.х}.$$

Суммарный крутящий момент сопротивления $M_{кр}$ (Н·м), действующий на сверло, складывается из момента M от сил P_z , момента $M_{нк}$, создаваемого силами, действующими на поперечной кромке, и момента $M_{л}$ от сил трения на цилиндрических ленточках сверла, т.е.

$$M_{кр} = M + M_{нк} + M_{л}.$$

Действующие на сверло в процессе работы осевая сила и крутящий момент являются исходными для расчета сверла и частей станка на прочность, жесткость и виброустойчивость. Осевая сила нагружает коробку подач станка, и при больших ее значениях возможна потеря продольной устойчивости сверла и его изгиб. Крутящий момент нагружает коробку скоростей станка, и по нему проверяется условие резания ($M_{кр} \leq M_{ин.ст}$).

Для определения значений P_o и $M_{кр}$ при сверлении и рассверливании применяют два метода: 1) экспериментальный при помощи динамометров, которые по принципу действия подразделяются на гидравлические, механические и электрические, при этом наиболее чувствительными являются электрические динамометры; 2) расчет по эмпирическим формулам [19]:

$$P_o = C_p^I d^{z_p} S^{y_p} t^{x_p} K_p,$$

где d – диаметр сверла, мм; S – подача, мм/об; t – глубина резания, мм; C_p^I – коэффициент для условий обработки, принятых при

разработке нормативных документов; K_p – коэффициент, учитывающий изменение реальных условий обработки по сравнению со «стандартными», для которых найдены C_p^I ; x_p, y_p, z_p – показатели степени, характеризующие интенсивность влияния соответственно d, S, t на величину P_o ,

$$M_{кр} = C_m^I d^{z_m} S^{y_m} t^{x_m} K_m,$$

где C_m^I – коэффициент, характеризующий условия обработки, при которых разрабатывались нормативные документы; K_m – коэффициент, учитывающий реальные условия обработки; x_m, y_m, z_m – показатели степени, характеризующие интенсивность влияния, соответственно, d, S, t на величину $M_{кр}$.

4.1.4. ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА СВЕРЛ

В результате высоких, нормальных и касательных напряжений, воздействия температуры и относительного перемещения контактные поверхности инструмента в процессе его эксплуатации изнашиваются. Лимитирующими являются абразивный и адгезионный износы.

Износ сверл происходит в результате трения задних поверхностей о поверхность резания, стружки о переднюю поверхность, направляющих ленточек об обработанную поверхность и смятия поперечной кромки. Сверла изнашиваются (рис. 4.5): одновременно по задней 2 и передней 1 поверхностям при обработке сталей; по уголкам 3 – при сверлении хрупких материалов; по ленточке 4 – при сверлении вязких материалов; по лезвию перемычки 5 – при неправильной заточке и её чрезмерной длине.

Наиболее опасный износ – по уголкам и ленточке, так как при большом износе для восстановления сверла требуется стачивать значительную его часть. Наибольшее влияние на износ оказывает ско-

рость резания и в меньшей степени подача. Поэтому при сверлении рекомендуется работать с большими подачами и малыми скоростями. Как и при точении, за допустимую величину износа при сверлении принимают износ по задней поверхности инструмента, который характеризуется высотой площадки износа h_z . При обработке конструкционных сталей быстрорежущими сверлами $h_z = 1 \dots 1,5$ мм, а при обработке твердосплавными – $h_z = 0,4 \dots 0,8$ мм.

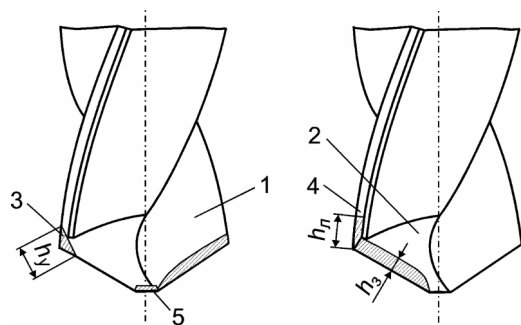


Рис. 4.5. Износ сверл

4.1.5. МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ СВЕРЛ

Двойная заточка режущей части. Для повышения прочности вершин лезвий (уголков сверла) и снижения износа на периферийных участках режущих кромок часто производят двойную заточку режущей части (рис. 4.6) с уменьшенным углом в плане в местах перехода к направляющей части сверла. Двойная заточка позволяет повысить стойкость инструмента в 2...3 раза. Положительный эффект от двойной заточки обеспечивается за счет увеличения длины режущих кромок ($b_z < b_z' + b_z''$) и, следовательно, площади контакта, а это, в свою очередь, способствует увеличению теплоотвода и снижению температуры в зоне резания [9, 26].

Подточка поперечной кромки. Размеры поперечной кромки оказывают существенное влияние на величину осевой силы. Установлено, что на поперечную кромку приходится 50...60% от величины осевой силы.

В связи с этим для уменьшения осевой силы в ряде случаев производят подточку поперечной кромки с величины k до величины k' с целью уменьшения ее длины (рис. 4.7).

Уменьшение длины поперечной кромки позволяет повысить стойкость сверл в 2...3 раза [9, 15].

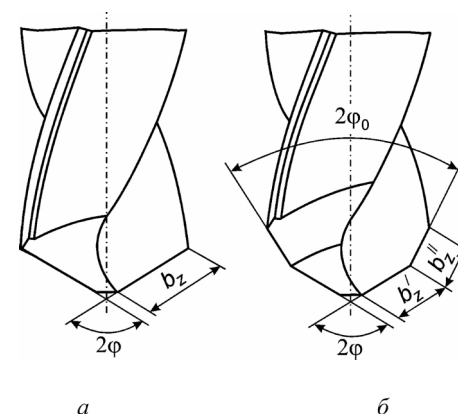
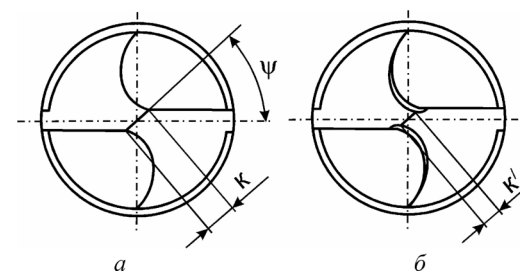


Рис. 4.6. Спиральные сверла с нормальной (а) и двойной заточкой (б)



Подточка цилиндрической ленточки. У серийных сверл ширина цилиндрической ленточки $f_{\text{л}}$ составляет $(0,06...0,07)d$ (рис. 4.8, а). Подточка ленточки вблизи режущей части сверла (рис. 4.8, б) уменьшает трение, а следовательно, и износ при контакте этой ленточки с обработанной поверхностью заготовки. У сверл с подточенной ленточкой ширина ленточки на подточенном участке составляет $0,1...0,3$ мм. При этом длина подточки $l_{\text{под}} = 1,5...4$ мм.

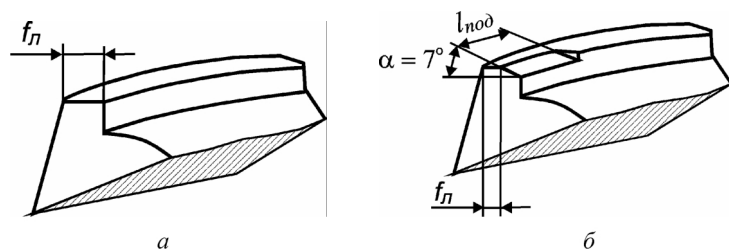


Рис. 4.8. Цилиндрические ленточки у спиральных сверл: а – серийных; б – с подточенной ленточкой

Утолщение диаметра сердцевинки сверла. Утолщение диаметра сердцевинки сверла d_c повышает его прочность, жесткость и снижает уровень вибраций, а также способствует уменьшению увода инструмента при сверлении глубоких отверстий. У сверл с нормальной сердцевиной $d_c = (0,12...0,3)d$ (рис. 4.9, а), у сверл с увеличенной сердцевиной $d_{c,\text{max}} = (0,3...0,45)d$ (рис. 4.9, б). При этом величина β не должна превышать $10...15'$, в противном случае будет затруднен вывод стружки из зоны резания.

Заточка обратной конусности по наружному диаметру сверла. Такой вид заточки (рис. 4.10) позволяет исключить заклинивание инструмента в отверстии при сверлении глубоких отверстий в малопластичных материалах. Угол обратной конусности η составляет обычно $10...30'$, что соответствует $0,06...0,15$ мм на 100 мм длины инструмента.

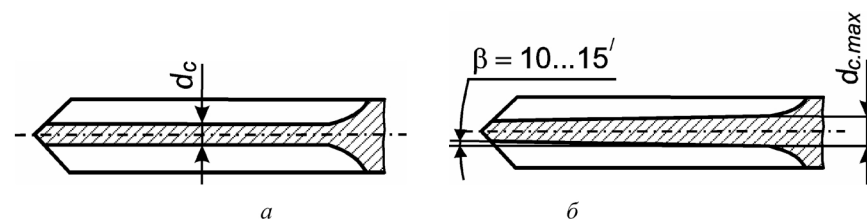


Рис. 4.9. Спиральные сверла с нормальной (а) и увеличенной сердцевинами (б)



Рис. 4.10. Обратная конусность у сверл

Оснащение сверл пластинами из твердых сплавов. Основное назначение твердосплавных сверл – обработка отверстий в заготовках из чугуна, закаленных углеродистых, нержавеющей, жаропрочных, жаростой-

ких и кислотостойких сталей, титановых сплавов, а также обработка отверстий в заготовках из неметаллических материалов. При правильной эксплуатации твердосплавных сверл их стойкость в $10...40$ раз выше стойкости быстрорежущих сверл при одновременном увеличении производительности труда в $2...4$ раза.

4.2. ЗЕНКЕРОВАНИЕ. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЗЕНКЕРОВ

Зенкерование – это процесс увеличения зенкером предварительно подготовленного отверстия (литого, штампованного, просверленного) для придания его стенкам более правильной геометрической формы и меньшей шероховатости поверхности. Эта операция может быть окончательной (при получении отверстий 10-11 квалитетов, с шероховатостью $R_z = 50...10$ мкм) или предварительной (получисто-вой) – перед развертыванием. Повышение точности и снижение шероховатости поверхностей после операций зенкерования объясняет-

ся большим числом одновременно работающих зубьев ($z = 3...4$), меньшими углами в плане ($\phi = 45...60^\circ$), меньшими припусками на обработку ($\Delta = 0,5...3$ мм на сторону) и большей жесткостью инструмента.

Схема работы зенкера и элементы режима резания при обработке отверстия (рис. 4.11) аналогичны схеме и элементам режима, которые имеют место при сверлении. По аналогичным формулам также рассчитываются осевая сила P_o и крутящий момент $M_{кр}$.

По назначению зенкеры в основном делятся на цилиндрические, предназначенные для получистовой обработки отверстий, зенковки – для обработки конических отверстий, цековки – для обработки плоских поверхностей. По способу крепления различают хвостовые и насадные зенкеры. По конструкции зенкеры делятся на цельные, насадные, сборные – со вставными зубьями. Рабочую часть зенкеров изготавливают из быстрорежущих сталей и твердых сплавов.

Наибольшее распространение в промышленности получили цилиндрические зенкеры диаметром 10...40 мм (рис. 4.12). Основные конструктивные элементы у этих зенкеров те же, что и у сверл (см. рис. 4.1). Отличие заключается в том, что у цилиндрических зенкеров режущая часть l_p короче, не имеет поперечной кромки, а количество режущих зубьев $z = 3...4$, в то время как у сверл их чаще всего два, реже одно (например, у пушечных сверл).

Насадные зенкеры, цельные (рис. 4.13) и сборные, применяются в основном для получистовой обработки отверстий больших диаметров ($D = 32...100$ мм).

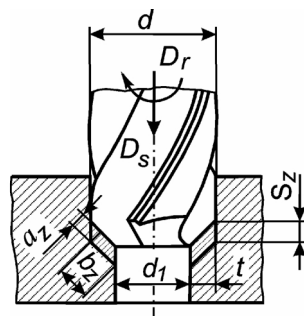


Рис. 4.11. Элементы режима резания при зенкеровании

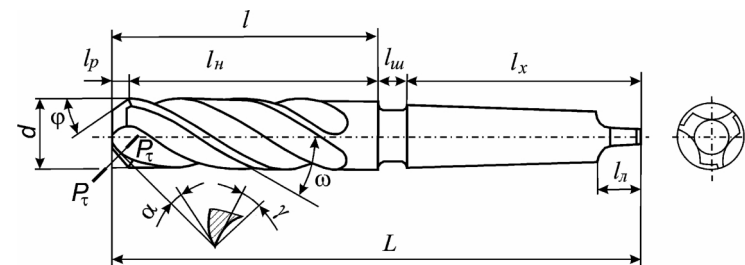


Рис. 4.12. Зенкер цельный трехзубый с коническим хвостовиком

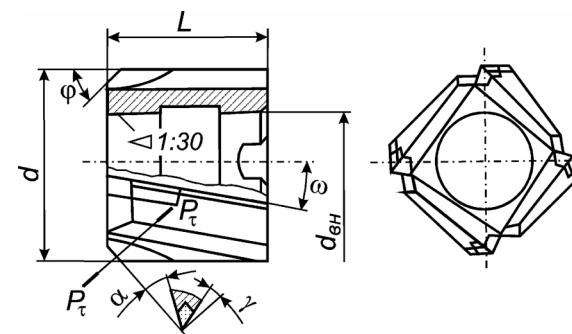


Рис. 4.13. Зенкер насадной, оснащенный пластинами из твердого сплава

4.3. РАЗВЕРТЫВАНИЕ. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ РАЗВЕРТОК

Развертывание – это процесс окончательной обработки отверстий режущими инструментами, называемыми развертками, для получения отверстий 6...9 квалитетов точности с шероховатостью $Ra = 1,25...0,63$ мкм, а при особо тщательном выполнении операций развертывания – по 5-му квалитету при шероховатости поверхности $Ra = 0,32...0,16$ мкм. Припуск под развертывание принимается небольшой – в среднем 0,15...0,5 мм на сторону для черновых разверток и 0,05...0,25 мм – для чистовых.

Схема работы развертки и элементы режима резания при обработке отверстия аналогичны схеме и элементам режима, которые имеют место при зенкеровании, а формулы для расчета осевой силы и крутящего момента практически не отличаются от формул для расчета этих параметров при сверлении и зенкеровании.

По способу применения развертки подразделяются на ручные и машинные, по конструкции – на цельные и сборные (со вставными ножами), по принципу регулирования размера – на постоянные и регулируемые, по способу крепления – на хвостовые и насадные, по форме обрабатываемого отверстия – на цилиндрические и конические.

На рис. 4.14 представлена цельная машинная развертка с коническим хвостовиком и наиболее распространенной и универсальной формой ($\varphi = 45^\circ$). Такую форму заточки применяют при обработке сквозных и глухих отверстий 8...9 квалитетов в заготовках из вязких и хрупких материалов. Хвостовая часть ручной развертки имеет цилиндрическую форму с выполненным на конце квадратом для крепления ее в воротке.

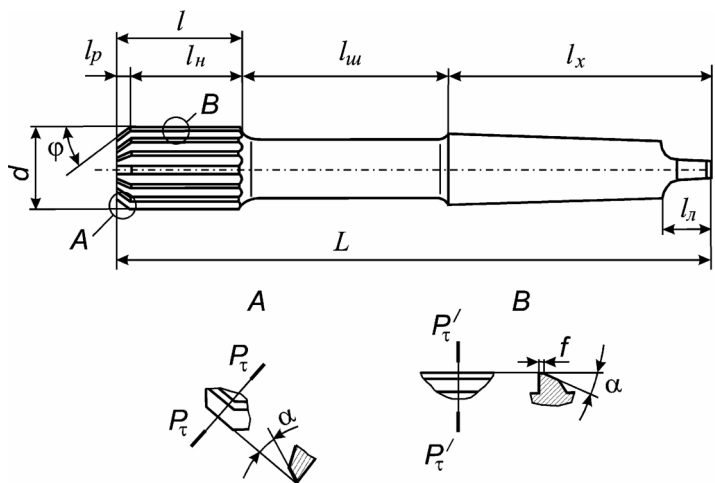


Рис. 4.14. Машинная развертка с коническим хвостовиком

Отличие разверток от ранее рассмотренных осевых инструментов заключается в том, что количество зубьев у разверток составляет от 6 до 24. Число зубьев развертки определяют по формуле

$$z = 1,5\sqrt{D} + K,$$

где D – диаметр отверстия, мм; $K = 2$ для вязких материалов и $K = 4$ для хрупких материалов, при этом рекомендуется применять развертки с четным числом зубьев, что существенно упрощает процесс измерения, т.к. зубья развертки располагаются друг напротив друга, но с неравномерным шагом.

Неравномерный шаг разверток позволяет повысить их виброустойчивость, уйти от резонансных частот и тем самым уменьшить огранку отверстий [9, 19, 28]. При этом переменный шаг делается у первой половины зубьев развертки, а вторая половина является зеркальным отображением первой (рис. 4.15).

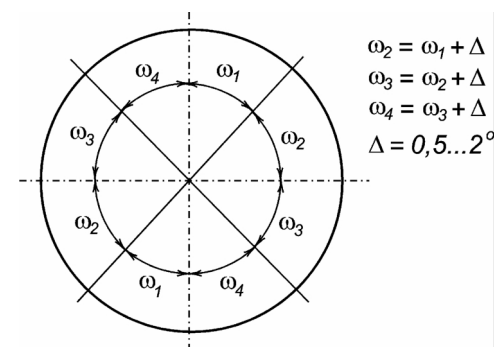


Рис. 4.15. Схема расположения зубьев у восьмизубой развертки

У разверток, как и у зенкеров, отсутствует поперечная кромка, что исключает возможность обработки отверстия в сплошном материале.

При обработке цилиндрических отверстий достаточно широко используются комбинированные режущие инструменты, сочетающие в се-

бе инструменты разных типов, например: сверло-зенкер, сверло-развертка, зенкер-развертка и т.д.

Число зубьев у комбинированных инструментов для удобства контроля по диаметру при изготовлении и заточке принимается четным и зависит от условий обработки.

ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 4

1. Что такое сверление?
2. Назовите технико-экономические показатели процесса сверления.
3. Какие разновидности сверл выпускаются промышленностью?
4. Назовите конструктивные элементы спирального сверла.
5. Для чего нужна лапка?
6. Какими углами определяется геометрия спирального сверла?
7. Как изменяются передний и задний углы по длине главной режущей кромки сверла?
7. Сколько режущих кромок имеет спиральное сверло?
8. Какие движения необходимы для осуществления процесса сверления?
9. Назовите элементы режима резания при сверлении.
10. Какие силы действуют на спиральное сверло в процессе резания?
11. Какая из режущих кромок спирального сверла в наибольшей степени влияет на величину осевой составляющей силы резания?
12. Из каких составляющих складывается крутящий момент на сверле?
13. Назовите наиболее опасные виды износа спиральных сверл.
14. При обработке каких материалов сверло изнашивается по уголкам?
15. При обработке каких материалов сверло изнашивается по ленточке?
16. В каком случае сверло изнашивается по лезвию перемычки?
17. Какой из параметров режима резания оказывает наибольшее влияние на износ сверл?
18. Перечислите известные методы улучшения геометрии спиральных сверл.
19. В чем заключаются особенности конструкции зенкера и процесса зенкерования?
20. Назовите технико-экономические показатели процесса зенкерования.
21. В чем заключаются особенности конструкции развертки и процесса развертывания?
22. Назовите технико-экономические показатели процесса развертывания.
23. Что представляет собой комбинированный режущий инструмент?

5. ФРЕЗЕРОВАНИЕ

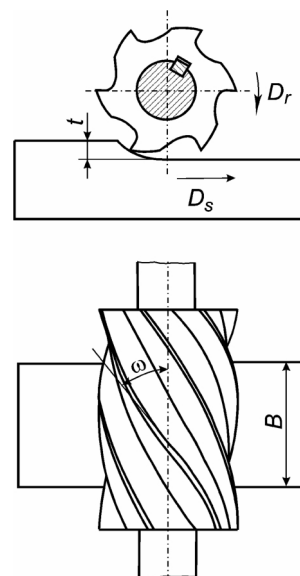


Рис. 5.1. Схема цилиндрического фрезерования

Фрезерование — это широко распространенный процесс механической обработки плоских и фасонных поверхностей режущими инструментами, называемыми фрезами, на станках фрезерной группы. Фрезы представляют собой многозубые режущие инструменты в виде тел вращения, режущие кромки зубьев у которых располагаются на образующей и (или) на торце(ах). При вращении фрезы зубья последовательно вступают в работу и срезают припуск обрабатываемого материала. Главное движение резания D_r при фрезеровании — вращение инструмента, а движение подачи D_s — обычно поступательное перемещение заготовки (рис. 5.1). При этом способе обработки может быть обеспечена точность размеров по 8...10 квалитетам и шероховатость поверхности $Ra = 6,4...1,6$ мкм.

Одной из особенностей процесса фрезерования является прерывистый характер резания. Каждый зуб участвует в резании лишь на определенной части оборота фрезы, а остальную часть проходит вхолостую, что обеспечивает дробление стружки и способствует охлаждению режущего лезвия. Другая особенность состоит в том, что толщина слоя, срезаемого каждым зубом фрезы, переменна и изменяется от некоторого минимального до максимального значения или наоборот.

В зависимости от типа фрезы, применяемого станка и характера выполняемых работ различают цилиндрическое, дисковое, торцовое, концевое и фасонное фрезерование.

5.1. ЦИЛИНДРИЧЕСКОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ

5.1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.

ГЕОМЕТРИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФРЕЗЫ

Схема цилиндрического фрезерования представлена на рис. 5.1.

Цилиндрическое фрезерование предназначено для обработки плоских поверхностей заготовок и осуществляется на горизонтально-фрезерных или универсальных консольно-фрезерных станках. В качестве инструмента используются цилиндрические фрезы диаметром 40...200 мм, которые могут выполняться цельными и сборными, как с прямыми ($\omega = 0^\circ$), так и со спиральными (рис. 5.2, $\omega = 15...50^\circ$) зубьями. Форма зуба у этих фрез – остроконечная. Основными параметрами, характеризующими цилиндрические фрезы, являются: наружный диаметр D ; диаметр под оправку d ; длина фрезы L ; число зубьев z ; угол наклона винтовой спирали ω ; нормальный $t_n = t_{oc} \sin \omega$, осевой $t_{oc} = t_s \operatorname{ctg} \omega$ и окружной $t_s = \frac{\pi D}{z}$ шаги.

Число зубьев у цилиндрических фрез зависит от их наружного диаметра, вида технологической операции, конструкции фрез и может быть определено по формулам:

- для сборных фрез с крупным зубом $z = 0,8\sqrt{D}$;
- для цельных фрез с крупным зубом $z = 1,2\sqrt{D}$;
- для фрез с мелким зубом $z = 1,8\sqrt{D}$.

На черновых операциях применяют фрезы с крупным зубом, а на получистовых и чистовых – с мелким зубом. Использование на получистовых и чистовых операциях фрез с мелким зубом становится возможным за счет уменьшения необходимого объема стружеч-

ной канавки в связи со снижением припуска на обработку и уменьшением допустимой нагрузки на зуб.

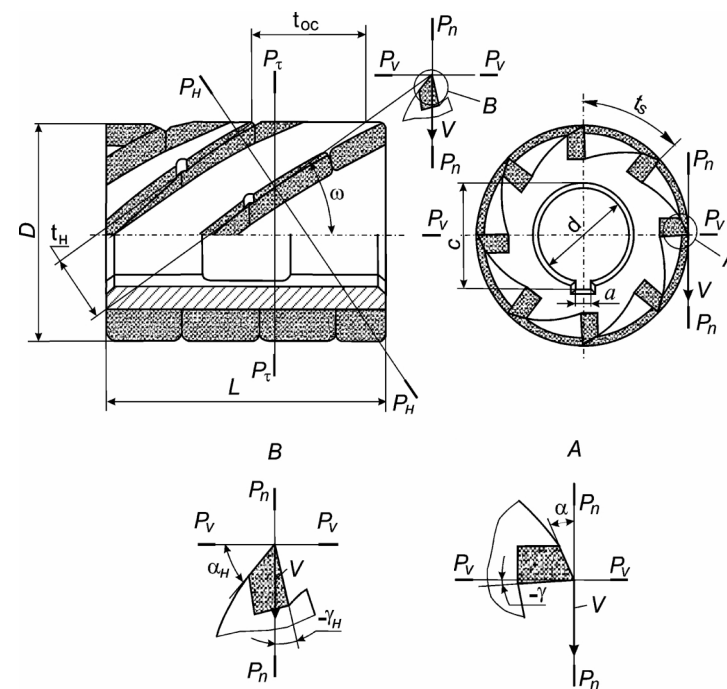


Рис. 5.2. Сборная цилиндрическая фреза с напаянными спиральными зубьями

Ранее сказанное справедливо также для фрез, используемых при других видах фрезерования.

В статической системе координат геометрию цилиндрической фрезы рассматривают в двух плоскостях: главной секущей плоскости $P_\tau - P_\tau$ и плоскости, нормальной к режущей кромке инструмента, $P_n - P_n$ (см. рис. 5.2).

В главной секущей плоскости геометрия фрезы характеризуется передним γ и задним α углами, а в плоскости, нормальной к режу-

щей кромке, соответственно углами γ_n и α_n . При этом наибольшее значение при резании имеет угол α_n , так как он определяет величину зазора между задней поверхностью инструмента и поверхностью резания заготовки. В зависимости от условий фрезерования величины вышеуказанных углов целесообразно назначать в следующих пределах: $\gamma(\gamma_n) = -10^\circ \dots +30^\circ$; $\alpha(\alpha_n) = 10^\circ \dots 20^\circ$.

5.1.2. ЭЛЕМЕНТЫ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Процесс фрезерования заготовок характеризуется следующими параметрами: скоростью резания, подачей, глубиной резания, шириной фрезерования, углом контакта фрезы с заготовкой, толщиной и шириной среза (рис. 5.3).

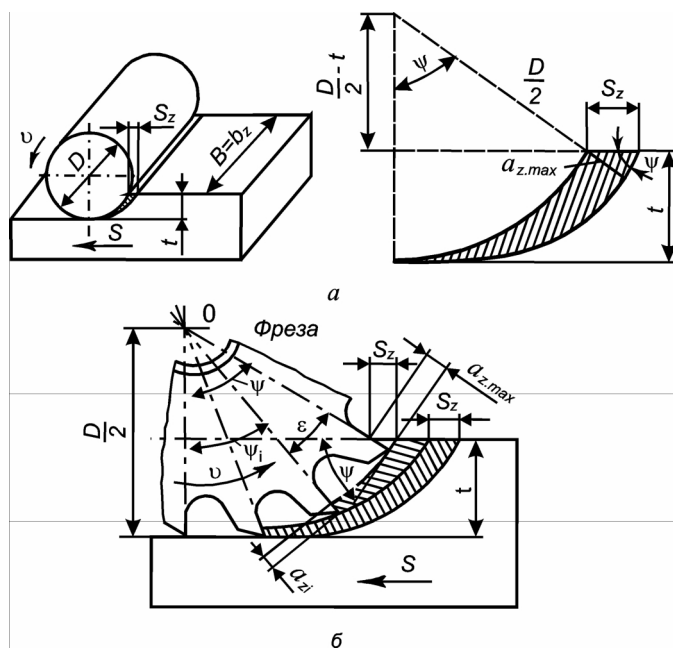


Рис. 5.3. Элементы режима резания при работе цилиндрической фрезой с прямыми зубьями

Скорость резания при фрезеровании v (м/мин) определяется по формуле

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

где D – наружный диаметр фрезы, мм; n – частота вращения фрезы, об/мин.

При фрезеровании различают три вида подач: минутную S_m (мм/мин); подачу на один оборот фрезы S_o (мм/об); подачу на один зуб фрезы S_z (мм/зуб). Минутная подача определяет величину относительного перемещения фрезы и заготовки за одну минуту. Подача на один оборот фрезы – величина относительного перемещения фрезы и заготовки за один оборот: $S_o = \frac{S_m}{n}$. Подача на один зуб

фрезы определяет величину относительного перемещения фрезы и заготовки при повороте фрезы на один угловой шаг: $S_z = \frac{S_o}{z} = \frac{S_m}{nz}$.

На практике обычно пользуются всеми видами подач, причем подача на зуб характеризует интенсивность нагрузки зуба, а следовательно, и стойкость фрезы.

Глубина резания t (мм) при фрезеровании определяется не так, как при точении, сверлении и других видах обработки. Здесь глубина резания – это величина слоя материала, срезаемого зубом фрезы на длине дуги резания, измеренная в направлении, перпендикулярном к оси вращения фрезы [8].

Ширина фрезерования B (мм) – ширина обрабатываемой поверхности в направлении, параллельном оси вращения фрезы [8].

Угол контакта ψ – центральный угол, соответствующий дуге соприкосновения фрезы с заготовкой. Для цилиндрических фрез (см. рис. 5.3)

$$\cos \psi = \frac{D/2 - t}{D/2} = 1 - \frac{2t}{D}, \quad \psi = \arccos \left(1 - \frac{2t}{D} \right).$$

Это выражение справедливо также для дисковых и концевых фрез.

Толщина срезаемого слоя a_z – величина переменная. В момент входа зуба фрезы в контакт с обрабатываемой заготовкой $a_{z\min} = 0$, а при выходе зуба из контакта

$$a_{z\max} = S_z \sin \psi = S_z \sqrt{1 - \cos^2 \psi} = 2S_z \sqrt{\frac{t}{D} - \frac{t^2}{D^2}}.$$

Толщина среза для фрезы с винтовыми зубьями подсчитывается по той же формуле, что и для прямозубой фрезы, и не зависит от угла наклона зуба ω .

Ширина среза b_z – длина соприкосновения режущей кромки зуба с обрабатываемой заготовкой. Для прямозубой фрезы ширина среза равна ширине фрезерования, т.е. $b_z = B$ (см. рис. 5.3); при работе цилиндрической фрезой с винтовыми зубьями ширина срезаемого слоя, снимаемого каждым зубом, изменяется от $b_{z\min} = 0$ до $b_{z\max} = \frac{B}{\cos \omega}$.

Максимальная площадь поперечного сечения среза для одного зуба прямозубой фрезы равно $f_{z\max} = Ba_{z\max} = BS_z \sin \psi$, а для этого же зуба в данный момент времени $f_{zi} = Ba_{zi} = BS_z \sin \psi_i$.

При участии в работе нескольких зубьев суммарная площадь среза определится по формуле

$$F_{\text{сум}} = BS_z (\sin \psi_1 + \sin \psi_2 + \dots + \sin \psi_m) = BS_z \sum_{i=1}^m \sin \psi_i,$$

где m – число зубьев фрезы, находящихся в контакте.

При работе прямозубой цилиндрической фрезой число зубьев, находящихся в контакте с заготовкой, можно определить по формуле

$$k = \frac{\psi}{\varepsilon} = \frac{\psi z}{360^\circ},$$

где $\varepsilon = \frac{360^\circ}{z}$ – угловой шаг фрезы, град; z – число зубьев фрезы.

При работе фрезой с винтовыми зубьями число зубьев, одновременно участвующих в работе, составит

$$k = \frac{\psi z}{360^\circ} + \frac{B}{t_{oc}}, \text{ где } t_{oc} = \frac{\pi D}{z} \operatorname{ctg} \omega,$$

тогда

$$k = \frac{\psi z}{360^\circ} + \frac{Bz}{\pi D \operatorname{ctg} \omega}.$$

Площадь поперечного сечения среза для фрезы с винтовым зубом можно определить, воспользовавшись схемой, представленной на рис. 5.4.

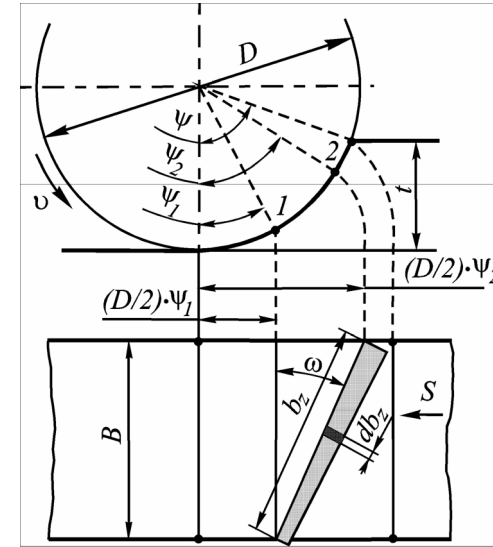


Рис. 5.4. Схема для определения поперечного сечения среза при резании цилиндрической фрезой с винтовыми зубьями

Как видно из этой схемы, ширина среза $b_z = \frac{D(\psi_2 - \psi_1)}{2 \sin \omega}$. Тогда выра-

жение для элементарной площади сечения среза на участке

$$db_z = \frac{D}{2 \sin \omega} d\psi \text{ будет иметь вид}$$

$$df_z = a_z db_z = \frac{S_z D}{2 \sin \omega} \sin \psi d\psi.$$

Проинтегрировав полученное выражение, получим площадь поперечного сечения среза для одного зуба

$$f_z = \int_{\psi_1}^{\psi_2} df_z = \frac{S_z D}{2 \sin \omega} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sin \psi d\psi = \frac{S_z D}{2 \sin \omega} (\cos \psi_1 - \cos \psi_2).$$

Для всех зубьев, находящихся в зоне контакта ψ , формула для суммарной площади сечения среза будет иметь вид

$$F_{\text{сум}} = \frac{S_z D}{2 \sin \omega} \sum_{i=1}^m (\cos \psi_1 - \cos \psi_2).$$

5.1.3. РАВНОМЕРНОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ФРЕЗАМИ И УСЛОВИЕ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ВСТРЕЧНОГО И ПОПУТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

В процессе работы цилиндрической фрезой с винтовыми зубьями могут быть созданы условия, при которых суммарная площадь сечения среза всегда будет оставаться постоянной, а следовательно, будет оставаться постоянной и силовая нагрузка, действующая на фрезу в процессе резания, что уменьшит уровень вибраций и повысит стойкость инструмента.

Условие равномерного фрезерования обеспечивается в том случае, если выполняется соотношение

$$C = \frac{B}{t_{\text{oc}}} = \frac{Bz}{\pi D \operatorname{ctg} \omega},$$

где C – целое число.

Обеспечение условия равномерного фрезерования наиболее важно для технологических процессов, используемых в крупносерийном и массовом производствах. Это условие можно получить, используя ранее приведенную формулу. Для этого, задавшись значениями C и двумя любыми параметрами фрезы при известном значении B , находят третий параметр [13].

При обработке заготовок цилиндрическими, дисковыми, угловыми и фасонными фрезами применяются две схемы резания, а именно: встречное (рис. 5.5, а) и попутное (рис. 5.5, б) фрезерование.

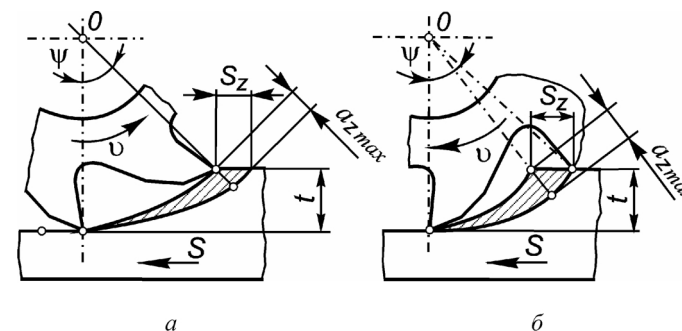


Рис. 5.5. Схемы фрезерования:
а – встречного, б – попутного

При встречном фрезеровании инструмент вращается в направлении, противоположном направлению движения подачи, вследствие чего толщина среза увеличивается от 0 до $a_{z\max}$. К преимуществам данной схемы можно отнести то, что нагрузка, действующая на зуб фрезы, возрастает постепенно по мере увеличения площади поперечного сечения среза, а это благоприятно сказывается на стойкости режущего инструмента. Однако данный метод фрезерования имеет ряд недостатков:

- так как вертикальная составляющая P_v результирующей силы резания направлена вверх от стола станка, она стремится оторвать от него заготовку (см. 5.1.4), что приводит к возникновению вибраций в процессе резания и заметному повышению шероховатости обработанной поверхности;

- каждый последующий зуб фрезы движется по упрочненной (наклепанной) поверхности заготовки вследствие некоторого скольжения предыдущего зуба по ней из-за наличия радиуса ρ на режущей кромке, полученного при заточке. До тех пор пока толщина сре-

за a_z не станет соизмерима с радиусом $\rho \approx 6...30$ мкм, будет иметь место процесс не резания, а упрочнения материала, сопровождающийся значительным трением по задней поверхности зуба и существенным ростом температуры. А это, в свою очередь, приведет к более быстрому износу зубьев фрезы по задней поверхности и, следовательно, к снижению стойкости инструмента, так как чем выше интенсивность износа, тем меньше стойкость инструмента.

На основе анализа данной схемы обработки можно сделать вывод о том, что эффективной областью метода встречного фрезерования является обработка малопластичных и хрупких материалов, не склонных к наклепу.

При попутном фрезеровании инструмент вращается в направлении, совпадающем с направлением движения подачи, вследствие чего толщина среза уменьшается от $a_{z\max}$ до 0. Данный метод фрезерования, как и предыдущий, обладает рядом достоинств и недостатков.

Достоинствами данного метода являются:

- вертикальная составляющая P_v результирующей силы резания прижимает заготовку к столу фрезерного станка, что способствует снижению уровня вибраций;
- примерно в 2...3 раза повышается стойкость режущего инструмента за счет уменьшения трения по задней поверхности зубьев фрезы, так как каждый зуб фрезы начинает работу с максимального сечения среза, что значительно снижает уровень наклепа (упрочнения) поверхностного слоя.

К недостаткам данного метода следует отнести следующие:

- режущие зубья фрезы подвергаются воздействию ударной нагрузки, что может привести к их выкрашиванию и разрушению. Это обусловлено тем, что зубья фрезы начинают работать с максимального сечения среза;
- при работе по данной схеме возможно самопроизвольное подхватывание инструментом заготовки в направлении движения пода-

чи, и, если в механизме движения подачи фрезерного станка между ходовым винтом и гайкой имеется осевой зазор, превышающий допустимый, это приводит к разрушению режущих зубьев фрезы.

На основании вышеизложенного данная схема фрезерования применяется при обработке пластичных и вязких материалов. Следует отметить, что схема попутного фрезерования не может быть использована при обработке заготовок, имеющих твердую корку, т.е. заготовок, полученных методами литья иликовки. Наличие такой корки приводит к интенсивному затуплению зубьев фрезы. В таких условиях обработка ведется только методом встречного фрезерования, позволяющего выламывать корку изнутри [25].

5.1.4. СИЛЫ РЕЗАНИЯ И МОЩНОСТЬ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Рассмотрим системы сил, действующих на режущие зубья цилиндрических фрез с винтовыми и прямыми зубьями.

На рис 5.6 представлена система сил, действующих на винтовом зубе цилиндрической фрезы при встречном фрезеровании.

Как видно из этой схемы, результирующая сила резания R является геометрической суммой главной (окружной) P_z и радиальной P_y составляющих сил резания. Сила P_z создает крутящий момент, по ней рассчитывают эффективную мощность резания. Сила $P_y = (0,6...0,8)P_z$ действует на опоры шпинделя станка, создает дополнительный момент трения и изгибает оправку, на которой крепится фреза. Результирующая сила резания R может быть разложена также на горизонтальную P_h и вертикальную P_v составляющие. Горизонтальная составляющая сил резания нагружает механизм подачи станка и при встречном фрезеровании направлена в сторону, противоположную направлению движения подачи. При попутном фрезеровании направление действия силы P_h и направление движе-

ния подачи совпадают. При встречном фрезеровании $P_h = (1,0...1,2)P_z$, а при попутном фрезеровании $P_h = (0,8...0,9)P_z$. Вертикальная составляющая P_v силы резания при встречном фрезеровании отрывает заготовку от стола станка, а при попутном фрезеровании – прижимает её к столу станка. Величина этой силы также зависит от схемы фрезерования. При встречном фрезеровании $P_v = (0,2...0,3)P_z$, а при попутном фрезеровании $P_v = (0,75...0,8)P_z$.

В горизонтальной плоскости на винтовой зуб цилиндрической фрезы, помимо силы P_h , действует также осевая составляющая P_o силы резания, результирующей которых является сила R_1 . Величина осевой силы составляет обычно $P_o = (0,35...0,55)P_z$. Данная сила действует на упорные подшипники шпинделя станка, на крепление заготовки и элементы механизма подачи станка. Действие осевых сил желательно устранять. Достигается это применением сдвоенных фрез с разнонаправленными винтовыми зубьями.

В случае работы фрезы с прямыми зубьями сила $P_o = 0$, а $R_1 = P_h$.

Получим аналитическую зависимость для расчета главной составляющей силы резания при фрезеровании цилиндрической фрезой с прямыми зубьями.

Силу P_z' , действующую на один зуб цилиндрической фрезы, можно определить по формуле

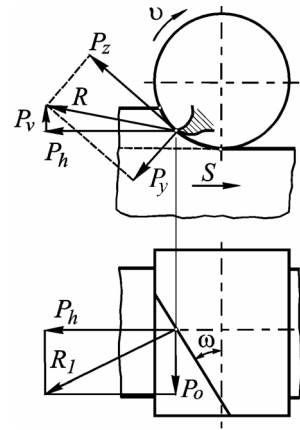


Рис. 5.6. Составляющие силы резания на винтовом зубе цилиндрической фрезы

$$P_z' = pf_{zi},$$

где p – удельная сила резания, f_{zi} – поперечное сечение среза в данный момент времени.

Удельную силу p можно определить по формуле, приведенной в работе [5]

$$p = \frac{C_p' C_\omega}{a_{zi}^K},$$

где C_p' – коэффициент, характеризующий условия обработки; C_ω – коэффициент, учитывающий влияние угла ω (при $\omega \leq 45^\circ$ $C_\omega = 1$); a_{zi} – текущая величина толщины среза; K – показатель степени, зависящий от свойств обрабатываемого материала.

Тогда
$$P_z' = \frac{C_p' C_\omega}{a_{zi}^K} a_{zi} B = C_p' C_\omega a_{zi}^{1-K} B.$$

При средней толщине среза $a_{z \text{ сред}} = S_z \sqrt{\frac{t}{D}}$ формула для опреде-

ления P_z' будет иметь вид $P_z' = C_p' C_\omega B S_z^{1-K} \left(\frac{t}{D} \right)^{\frac{1-K}{2}}$. Если на длине

дуги контакта фрезы с заготовкой находится k зубьев, то $P_z = P_z' k$. Но, как известно, число зубьев, участвующих в работе, можно определить по формуле

$$k = \frac{\psi}{\varepsilon} = \frac{\psi z}{360^\circ} = \frac{\psi z}{2\pi},$$

при этом
$$\cos \psi = \frac{D/2 - t}{D/2} = 1 - \frac{2t}{D}; \quad \psi = \arccos \left(1 - \frac{2t}{D} \right).$$

Разложим $\cos \psi$ в ряд

$$\cos \psi \approx 1 - \frac{\psi^2}{2} + \frac{\psi^4}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} + \dots$$

Если ограничиться только первыми двумя членами ряда, то

$$1 - \frac{\psi^2}{2} \approx 1 - \frac{2t}{D}; \quad \frac{\psi^2}{2} = \frac{2t}{D}; \quad \psi = 2\sqrt{\frac{t}{D}}, \quad \text{тогда}$$

$$k = \frac{z}{\pi} \sqrt{\frac{t}{D}}; \quad P_z = P'_z k = C'_p C'_\omega B S_z^{1-K} \left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{1-K}{2}} \frac{z}{\pi} \left(\frac{t}{D}\right)^{\frac{1}{2}},$$

или
$$P_z = \frac{C'_p C'_\omega}{\pi} S_z^{1-K} B z t^{\frac{2-K}{2}} D^{\frac{K-2}{2}}.$$

Обозначим $C_p = \frac{C'_p C'_\omega}{\pi}; \quad y_p = 1 - K; \quad x_p = \frac{2-K}{2}; \quad q_p = \frac{K-2}{2},$

тогда
$$P_z = C_p S_z^{y_p} B z t^{x_p} D^{q_p}.$$

Зная величину силы P_z и скорость резания, можно определить эффективную мощность, затрачиваемую на фрезерование

$$N_{\text{эф}} = \frac{P_z v}{60 \cdot 10^3} = C_p S_z^{y_p} B z t^{x_p} D^{q_p} \frac{\pi D n}{60 \cdot 10^6} =$$

$$= \frac{\pi C_p}{60 \cdot 10^6} S_z^{y_p} B z n t^{x_p} D^{q_p+1}.$$

Обозначим $C_N = \frac{\pi C_p}{60 \cdot 10^6}; \quad q_N = q_p + 1,$

тогда
$$N_{\text{эф}} = C_N t^{x_p} S_z^{y_p} B z n D^{q_N}.$$

Мощность, затрачиваемая на подачу, как отмечено в работе [25], не составляет более 15% от эффективной мощности резания. Поэтому полную расчетную мощность определяют по формуле

$$N_{\text{расч}} = \frac{1,15 N_{\text{эф}}}{\eta_{\text{ст}} K_n},$$

где $\eta_{\text{ст}}$ – КПД станка; $K_n = 1,3 \dots 1,5$ – коэффициент допускаемой кратковременной перегрузки.

Существенное влияние на величину сил резания оказывает передний угол γ зубьев фрезы. Чем больше величина переднего угла, тем меньше значение силы P_z . Экспериментально установлено, что увеличение переднего угла γ на 1° уменьшает силу P_z на 1,5% [25].

Увеличение износа фрезы по задней поверхности зубьев приводит к увеличению силы P_z , так как в этом случае увеличивается работа, затрачиваемая на деформацию и трение.

5.2. ДИСКОВОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ

На операциях дискового фрезерования у обрабатываемых заготовок выполняют пазы, уступы, канавки. Этот вид фрезерования используется также для разрезки металла.

Схема дискового фрезерования представлена на рис. 5.7.

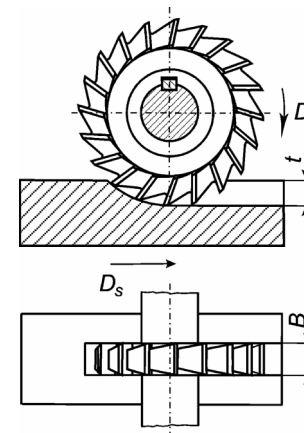


Рис. 5.7. Схема дискового фрезерования трехсторонней фрезой

Обработка заготовок на данных операциях осуществляется на горизонтально-фрезерных станках дисковыми фрезами.

Различают следующие типы дисковых фрез: 1) односторонние – с режущими кромками только на цилиндрической части; 2) двухсторонние – с режущими кромками на одном из торцов и на цилиндрической части; 3) трехсторонние – с режущими кромками на обоих торцах и на цилиндрической части.

Односторонние дисковые фрезы являются прямозубыми (рис. 5.8) и по

назначению подразделяются на пазовые (шпоночные), прорезные и отрезные. Основные параметры у этих фрез имеют следующие значения:

- пазовые фрезы: $D = 50 \dots 100$ мм; $b = 3 \dots 6$ мм; $\gamma = 10^\circ \dots 15^\circ$; $\alpha = 15^\circ \dots 20^\circ$,
- прорезные фрезы: $D = 40 \dots 75$ мм; $b = 2 \dots 5$ мм; $\gamma = 5^\circ \dots 10^\circ$; $\alpha = 25^\circ \dots 40^\circ$,
- отрезные фрезы: $D = 60 \dots 200$ мм; $b = 1 \dots 5$ мм; $\gamma = 10^\circ \dots 15^\circ$; $\alpha = 5^\circ \dots 20^\circ$.

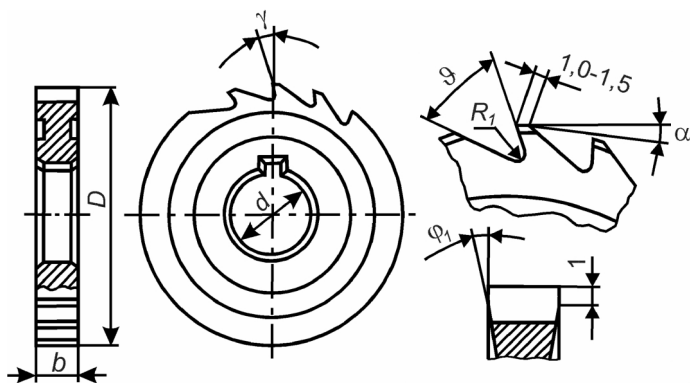


Рис. 5.8. Односторонняя дисковая прямозубая фреза

Во избежание трения фрезы о стенки прорезаемой канавки боковые ее стороны (торцы) шлифуют с углом $\phi_1 = 0,5^\circ \dots 1,5^\circ$.

Двухсторонние дисковые фрезы (рис. 5.9) имеют на цилиндрической части винтовые зубья. Основные диаметральные, линейные и угловые размеры у этих фрез лежат в следующих диапазонах: $D = 90 \dots 350$ мм; $b = 16 \dots 30$ мм; $\gamma = -5^\circ \dots +5^\circ$; $\alpha = 10 \dots 15^\circ$.

Трехсторонние дисковые фрезы могут выполняются как прямозубыми, то есть с зубьями, расположенными параллельно оси (см. рис. 5.7), так и с зубьями, расположенными наклонно к оси и направ-

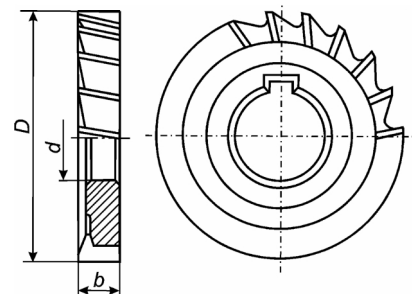


Рис. 5.9. Двухсторонняя дисковая фреза

ленными в разные стороны – разнонаправленными зубьями.

Изготавливаются вышеуказанные фрезы как из быстрорежущих сталей, так и с использованием твердых сплавов. В последнем случае корпус фрезы выполняется из конструкционной стали, а режущие зубья – из твердого сплава.

5.3. ФАСОННОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ

Фасонное фрезерование получило распространение на операциях, связанных с изготовлением поверхностей со сложным фасонным профилем. Инструментом при данном виде фрезерования являются фасонные фрезы с различным профилем, обработка которыми ведется на горизонтально-фрезерных станках. Схема фасонного фрезерования приведена на рис. 5.10.

Типовые фасонные фрезы – это полукруглая выпуклая (рис. 5.11, а) и полукруглая вогнутая (рис. 5.11, б). Основные конструктивные

элементы фасонных фрез аналогичны конструктивным элементам дисковых фрез. Фасонные фрезы изготавливают всегда с крупным зубом. При этом число зубьев зависит от диаметра фрезы. Число зубьев у цельных и сборных фрез определяется соответственно по формулам $z = 1,8\sqrt{D}$ и $z = 1,2\sqrt{D}$.

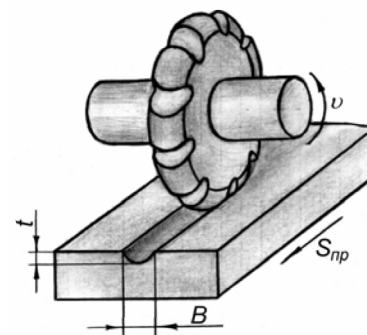


Рис. 5.10. Схема фасонного фрезерования

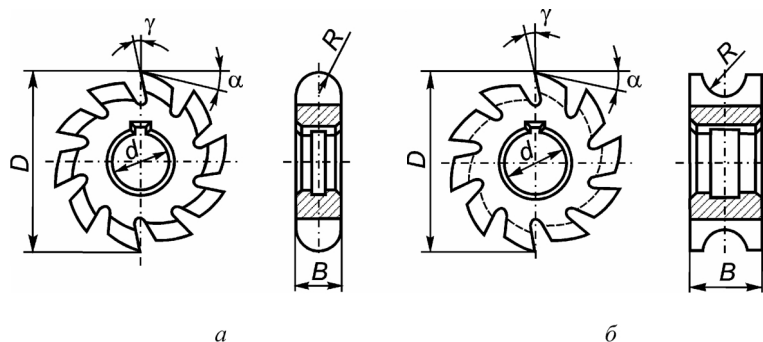


Рис. 5.11. Фасонные фрезы:

a – с выпуклым профилем, *б* – с вогнутым профилем

Для того чтобы не исказить профиль режущей кромки фасонной фрезы, ее зубья затачивают с передним углом $\gamma = 0^\circ$. В ряде случаев при обработке труднообрабатываемых материалов передний угол делают положительным, равным $5^\circ \dots 10^\circ$, однако в этом случае происходит искажение профиля инструмента. Для того чтобы получить заданный профиль на заготовке, используют комплект фасонных фрез (черновую – с углом $\gamma = 5^\circ \dots 10^\circ$ и чистовую с $\gamma = 0^\circ$) либо производят коррекцию профиля инструмента.

Все фасонные фрезы имеют затылованную форму режущих зубьев.

Форма режущих зубьев фрез может быть как остроконечной, так и затылованной. Остроконечную форму зуба имеют практически все фрезы, за исключением фасонных фрез. У фрез с остроконечной формой рабочие поверхности зуба затачиваются по плоскости. У фрез с затылованной формой зуба передняя поверхность затачивается по плоскости, а задняя поверхность имеет криволинейную форму и затачивается по спирали Архимеда или логарифмической спирали. На практике как в России, так и за рубежом наибольшее распространение получила спираль Архимеда, обеспечивающая более высокую технологичность инструмента по сравнению с кривыми других типов.

Затылование задней поверхности инструмента по спирали Архимеда позволяет при его переточке, осуществляемой по передней поверхности, сохранить неизменным профиль инструмента и задний угол α . Задний угол α на периферийной части режущей кромки выполняется равным $10 \dots 15^\circ$.

Важной характеристикой у затылованных фрез является величина затылования K , определяемая на передней поверхности последующего зуба фасонной фрезы по отношению к рассматриваемому зубу (рис. 5.12, *a*).

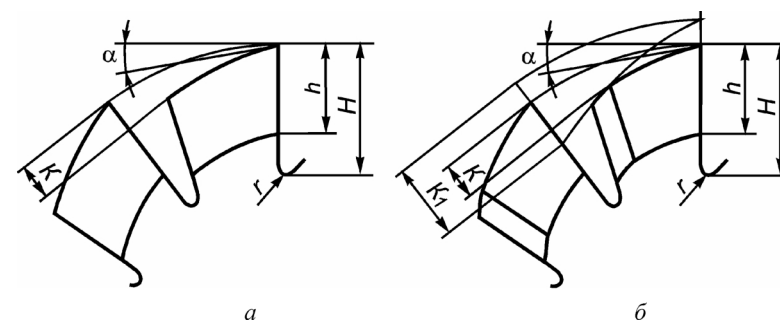


Рис. 5.12. Зубья фасонных фрез:

a – с одинарным затылованием, *б* – с двойным затылованием

Величина затылования представляет собой расстояние между окружностью, проведенной через вершину зуба, и точкой пересечения архимедовой спирали с передней поверхностью последующего зуба и рассчитывается по формуле

$$K = \frac{\pi D}{z} \operatorname{tg} \alpha,$$

где α – задний угол на вершине зуба; z – число зубьев фрезы.

У фрез со шлифованным профилем, используемых на чистовых операциях, для обеспечения выхода шлифовального круга делается двойное затылование, величина которого составляет $K_1 = (1,2 \dots 1,7)K$ (рис. 5.12, *б*).

5.4. ТОРЦОВОЕ И КОНЦЕВОЕ ФРЕЗЕРОВАНИЕ

5.4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Областью торцового фрезерования является обработка плоских поверхностей, в том числе ступенчатых, а областью концевое фрезерования – обработка узких плоскостей, пазов, уступов и контурная обработка заготовок. В обоих случаях при обработке используются в основном вертикально-фрезерные станки. Схемы торцового и концевое фрезерования приведены соответственно на рис. 5.13 и 5.14.

Торцовые фрезы при обработке обеспечивают более высокую производительность и меньшую шероховатость поверхности по сравнению с цилиндрическими фрезами, поэтому они нашли широкое применение в производстве. Каждый зуб торцовой фрезы можно рассматривать как проходной токарный резец с главным углом в плане φ и вспомогательным углом φ_1 . Угол φ в зависимости от жесткости системы выбирается в пределах $30...90^\circ$. Вспомогательный угол в плане φ_1 у торцовых фрез обычно равен $5...10^\circ$. Чем меньше величина этого угла, тем, соответственно, меньше величина шероховатости поверхности. Цельные торцовые фрезы изготавливаются диаметром $D = 40...100$ мм, а сборные с зубьями из

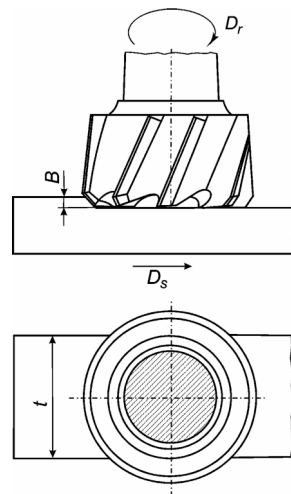


Рис. 5.13. Схема торцового фрезерования

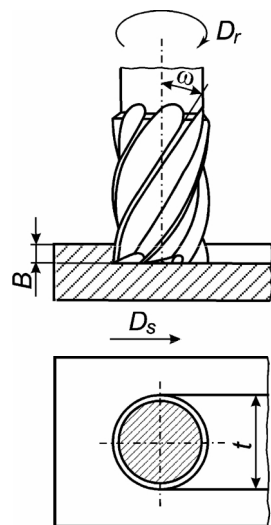


Рис. 5.14. Схема концевое фрезерования

быстрорежущей стали и твердого сплава – $D = 80...630$ мм. Широко применяются торцовые фрезы с многогранными твердосплавными неперетачиваемыми пластинами, а также с зубьями из сверхтвердых материалов (СТМ).

Концевые фрезы состоят из рабочей части, шейки и хвостовика. Зуб фрезы имеет три режущие кромки: главную на цилиндрической части, вспомогательную на торцовой части и переходную между главной и вспомогательной режущими кромками. Переходная режущая кромка делается для упрочнения зуба фрезы. Зубья на цилиндрической части фрезы имеют винтовую форму с углом подъема $\omega = 30...45^\circ$. Выпускают два типа концевых фрез: 1) с нормальным зубом, у которых число зубьев определяется из выражения $z = \sqrt{D}$, а угол $\omega = 30^\circ$; 2) с крупным зубом, у которых $z = 0,6\sqrt{D}$ и $\omega = 45^\circ$. Концевые фрезы бывают с цилиндрическим ($D = 3...20$ мм и длина режущей части $l = 20...45$ мм) и с коническим ($D = 14...63$ мм и $l = 32...70$ мм) хвостовиками. Для устранения вибраций в процессе резания зубья у фрез расположены по окружности с неравномерным шагом. Например, для трехзубой фрезы: $\theta_1 = 110^\circ$; $\theta_2 = 123^\circ$ и $\theta_3 = 127^\circ$. Фрезы изготавливаются из высококачественных быстрорежущих сталей. Наряду с быстрорежущими фрезами, получили распространение и твердосплавные концевые фрезы.

Крепление концевых фрез в шпинделе станка при цилиндрическом хвостовике осуществляется с помощью цангового патрона, а при коническом хвостовике – штрелелем, представляющим собой натяжной болт и проходящим через полый шпиндель станка.

5.4.2. ЭЛЕМЕНТЫ РЕЖИМА РЕЗАНИЯ ПРИ ТОРЦОВОМ И КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

Процесс торцового и концевое фрезерования заготовок характеризуется теми же самыми параметрами, что и другие виды фрезеро-

вания, а именно: скоростью резания, подачей, глубиной резания, шириной фрезерования, углом контакта фрезы с заготовкой, толщиной и шириной среза (рис. 5.15 и 5.16).

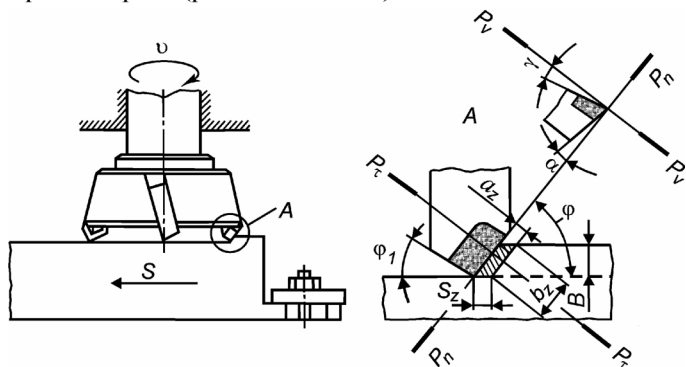


Рис. 5.15. Элементы режима резания при работе торцевой фрезой

Скорость резания v и значения подачи S_m , S_o и S_z определяются по тем же формулам, что и для процесса цилиндрического фрезерования.

Глубина и ширина резания при торцевом и концевом фрезеровании показаны на рис. 5.13 и 5.14. При данных видах фрезерования различают полное $t = D$ и неполное $t < D$ фрезерование.

Толщина среза при торцевом и концевом фрезеровании определяется соответственно по формулам $a_z = S_z \sin \xi \sin \varphi$ и $a_z = S_z \sin \xi$ (где ξ – угол, определяющий положение зуба фрезы). Ширина среза при торцо-

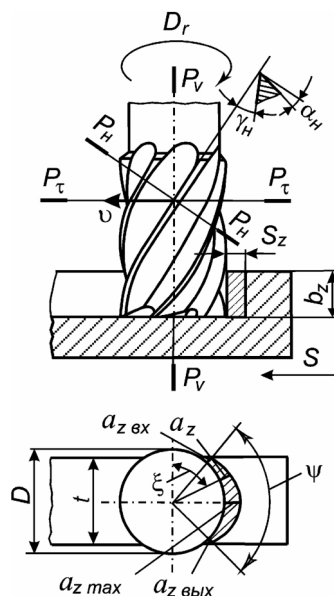


Рис. 5.16. Элементы режима резания при работе концевой фрезой

вом фрезеровании может быть определена из зависимости $b_z = \frac{B}{\sin \varphi}$, а

при концевом фрезеровании она равна ширине фрезерования $b_z = B$.

Угол контакта фрезы с заготовкой при данных видах фрезерования определяется по формулам:

$$\sin \frac{\psi}{2} = \frac{t/2}{D/2} = \frac{t}{D}; \quad \psi = 2 \arcsin \frac{t}{D}.$$

В зависимости от установки фрезы относительно заготовки различают симметричное и несимметричное фрезерование. В случае симметричного фрезерования начальная и конечная толщины среза одинаковые ($a_{z \text{ вх}} = a_{z \text{ вых}} = a_{z \text{ min}}$, $a_{z \text{ max}} = S_z$), а их величина зависит от соотношения $\frac{t}{D}$. Такая схема фрезерования применяется при об-

работке материалов средней пластичности, к которым относятся конструкционные стали. При несимметричном фрезеровании обработка заготовок может осуществляться методом как встречного (рис. 5.17), так и попутного (рис. 5.18) фрезерования.

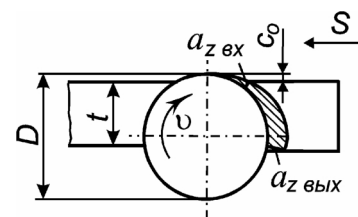


Рис. 5.17. Схема несимметричного встречного торцевого (концевого) фрезерования

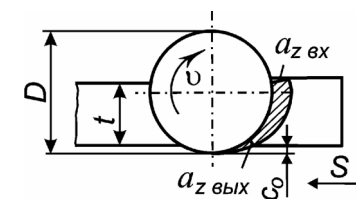


Рис. 5.18. Схема несимметричного попутного торцевого (концевого) фрезерования

Метод встречного фрезерования применяется при обработке малопластичных и хрупких материалов. С целью уменьшения наклепа обработанной поверхности процесс фрезерования ведут таким

образом, чтобы $a_{z\min}$ было отлично от нуля. Это достигается за счет смещения заготовки относительно края фрезы на величину $c_0 = 0,03...0,05D$ (см. рис. 5.17).

При попутном фрезеровании ($a_{z\max} = \max$; $a_{z\min} = \min$) во избежание «прихватывания» зуба фрезы с заготовкой последнюю смещают относительно края фрезы также на величину c_0 (см. рис. 5.18). Данная схема применяется при обработке вязких и пластичных материалов.

ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 5

1. Что такое фрезерование?
2. Назовите технико-экономические показатели процесса фрезерования.
3. Какие особенности характерны для процесса фрезерования материалов?
4. Назовите наиболее распространенные виды фрезерования.
5. Перечислите основные конструктивные элементы цилиндрической фрезы.
6. Какими углами определяется геометрия цилиндрической фрезы?
7. Перечислите элементы режима резания при фрезеровании.
8. Какими параметрами характеризуется сечение среза?
9. Каким образом уменьшить уровень вибраций и повысить стойкость инструмента при работе цилиндрической фрезой с винтовым зубом?
10. Каковы особенности попутного и встречного фрезерования?
11. Какие силы действуют на зубья цилиндрических фрез с винтовыми и прямыми зубьями?
12. Каким образом устранить действие осевой силы в процессе резания цилиндрическими фрезами с винтовым зубом?
13. Каковы особенности дискового фрезерования и дисковых фрез?
14. Каковы особенности геометрии фасонных фрез?
15. С какой целью выполняется затылование фасонных фрез?
16. По какой зависимости определяется падение затылка?
17. С какой целью выполняется двойное затылование фасонных фрез?
18. Каковы особенности торцового и концевое фрезерования?
19. Какие фрезы используются для контурной обработки заготовок?
20. Как определяются элементы режима резания при торцовом и концевом фрезеровании?
21. Какой вид обработки более производителен – цилиндрическое или торцовое фрезерование – и почему?

6. МЕТОДЫ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ

6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В современной технике широко используются разнообразные резьбовые соединения, которые можно классифицировать: по типу резьбы – на цилиндрические и конические; по форме профиля – на треугольные, прямоугольные, трапецеидальные и круглые. Резьбы могут быть одно- и многозаходные, правые и левые, наружные и внутренние. По назначению они делятся на крепежные и ходовые. По параметрам измерения шага резьбы подразделяются на метрические, дюймовые, модульные и питчевые. Профиль резьбы обеспечивается соответствующим профилем режущего инструмента, а ее точность определяется степенью точности (ГОСТ 16093-2004 и 4608-81).

Резьбы можно нарезать лезвийными режущими инструментами: резцами, гребенками, метчиками, плашками, фрезами, резьбонарезными головками. Резьбы можно шлифовать после нарезания лезвийными инструментами или без предварительного нарезания при шаге P не более 2 мм. Резьбы можно получать также пластическим деформированием поверхности заготовок – накатыванием плашками, роликами, накатными головками и раскатниками.

Процесс нарезания резьбы представляет собой сложный и трудоемкий процесс деформирования и разрушения материалов в условиях стесненного резания, он характеризуется малыми сечениями срезаемого слоя, низкими скоростями резания, малыми задними углами профиля, а следовательно, повышенным трением. В этих условиях возникают большие пластические деформации, значительное упругое последствие, адгезионные и диффузионные процессы, что приводит к интенсивному износу режущего инструмента, его полом-

ке, срыву витков резьбы, ухудшению качества поверхности резьбы и потере точности ее профиля. Тем не менее, процессы формообразования резьб лезвийным инструментом очень широко используются в производстве благодаря их относительной простоте и дешевизне.

6.2. НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ РЕЗЦАМИ И ГРЕБЕНКАМИ

Резьбовые резцы и гребенки применяются для нарезания наружных и внутренних резьб точением, являющимся универсальным способом изготовления резьб различных видов в широком диапазоне диаметров, шагов и обрабатываемых материалов. Схемы нарезания наружной и внутренней резьбы однониточными резцами и схемы движения резцов приведены на рис. 6.1.

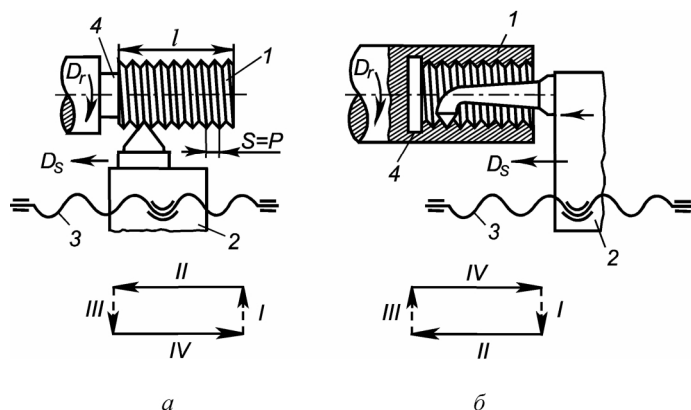


Рис. 6.1. Схемы нарезания резьбы резцами:
а – наружной; б – внутренней

Заготовка 1 закрепляется в патроне, в патроне с поджатием центром задней бабки или в центрах и получает вращение со скоростью v , а резец закрепляется на суппорте 2 и получает продольную подачу (II), равную шагу P нарезаемой резьбы, посредством ходового винта 3 через маточную гайку, закрепленную в фартуке станка.

Предварительно резец перемещается в поперечном (радиальном) направлении (I) на $0,2 \dots 0,5$ мм.

Когда резец пройдет длину нарезаемой резьбы l (см. рис. 6.1, а), он отводится (III) от заготовки и возвращается в исходное положение (IV). Затем резец снова врезается в заготовку на несколько десятых долей миллиметра, и цикл повторяется до образования полного профиля резьбы.

Для обеспечения возможности вывода резца из зоны резания на заготовке предварительно прорезается канавка 4.

Схемы образования профиля резьбы резцами приведены на рис. 6.2. Сплошными стрелками показано движение продольной подачи, пунктирными – движение врезания.

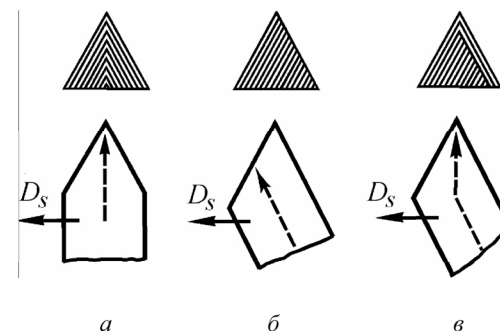


Рис. 6.2. Схемы образования профиля резьбы резцами:
а – радиальное врезание; б – врезание под углом;
в – комбинированное врезание

Радиальное врезание (см. рис. 6.2, а) применяется при чистовой обработке, а врезание под углом (см. рис. 6.2, б) – при черновой. При комбинированном врезании подача на предварительных проходах осуществляется под углом, а на окончательных проходах – методом радиальной подачи (см. рис. 6.2, в).

Нарезание резьбы однониточным резцом обеспечивает получение $5 \dots 6$ степеней точности, что выше по сравнению с другими способами нарезания, за исключением резьбошлифования.

Резьбовые резцы изготавливаются как из быстрорежущих сталей, так и из твердых сплавов.

Однониточные резьбовые резцы бывают стержневые (рис. 6.3), призматические (рис. 6.4) и круглые (рис. 6.5). Стержневые резцы просты по конструкции, однако не обеспечивают более 3...5 переточек. Призматические резцы конструктивно более сложные, но позволяют выполнить большее число переточек. Более широкое распространение в промышленности получили круглые резьбовые резцы из-за простоты их изготовления и большого количества переточек. Передний угол γ на круглых резцах обеспечивается заточкой (см. рис. 6.5), а задний угол обеспечивается за счет установки оси резца выше оси обрабатываемой детали на величину h :

$$h = \frac{D}{2} \sin \alpha; \quad \alpha = \arcsin \frac{2h}{D}.$$

На рис. 6.6 представлена рабочая часть стержневого резьбового резца со стандартной геометрией. Заточка передней поверхности с положительным передним углом весьма затруднена. Обычно передний угол γ в резьбовых резцах равен 0° .

Задние углы по вершине и боковым режущим кромкам $\alpha_{пр}$ и $\alpha_{лев}$ для об-

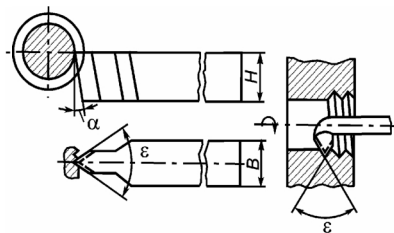


Рис. 6.3. Стержневой резьбовой резец

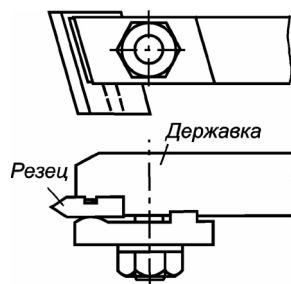


Рис. 6.4. Призматический резьбовой резец

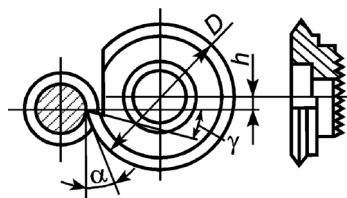


Рис. 6.5. Круглый резьбовой резец

работки чугуна и стали рекомендуется принимать равными 8° . Для расточных резцов задний угол по вершине увеличивается до 12° [8].

В ряде случаев при обработке труднообрабатываемых материалов $\gamma \neq 0^\circ$. В этих случаях для получения точного профиля резьбы либо проводят коррекцию инструмента, либо используют черновой и чистовой резцы. У чистового резца $\gamma = 0^\circ$.

При нарезании резьбы резцом происходит ее разваливание. Поэтому на резце делают угол профиля ε на $0,5 \dots 1^\circ$ меньше, чем угол профиля резьбы. При нарезании метрической резьбы чистовой резец

имеет угол $\varepsilon = 59^\circ 30'$.

Наряду с однониточными резьбовыми резцами широкое применение находят многониточные резьбовые резцы, которые называют резьбовыми гребенками.

На рис. 6.7 представлена стержневая резьбовая гребенка.

Особенность гребенок – совмещение нескольких однониточных резцов, профиль которых соответствует профилю нарезаемой резьбы. Первые две-три нитки срезаются на угол $\varphi = 25 \dots 30^\circ$, образуя режущую (заборную) часть. Остальные образуют калибрующую часть гребенки. Наличие заборной части ведет к перераспределению нагрузки в процессе резания между несколькими зубьями, что позволяет увеличить

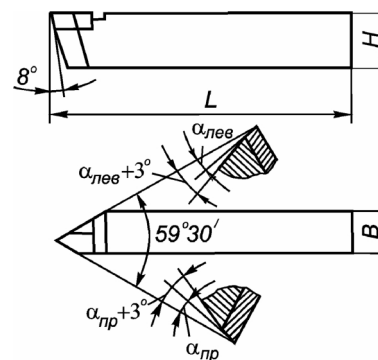


Рис. 6.6. Рабочая часть стандартного стержневого резьбового резца

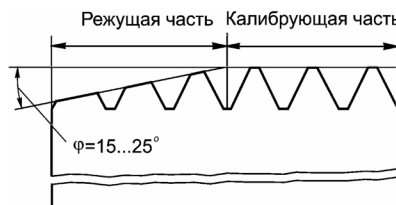


Рис. 6.7. Стержневая резьбовая гребенка

глубину резания, уменьшить число проходов и, следовательно, повысить производительность обработки.

6.3. НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ РЕЗЬБОНАРЕЗНЫМИ ГОЛОВКАМИ И ФРЕЗАМИ

Наряду с резцами и гребенками для нарезания резьбы, широко применяют резьбонарезные головки, которые бывают нераскрывающимися и раскрывающимися. Головки применяются на токарных, револьверных, сверлильных станках, токарных автоматах и полуавтоматах, на агрегатных станках и автоматических линиях.

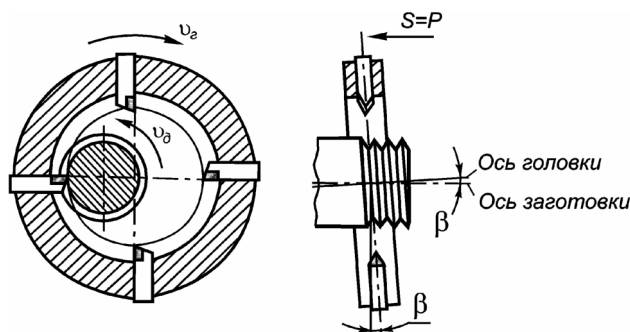


Рис. 6.8. Четырехрезцовая головка для нарезания наружной резьбы с внутренним касанием

На рис. 6.8 представлена четырехрезцовая головка для нарезания наружной резьбы с внутренним касанием. Резьбовая головка монтируется на плите вместе с электродвигателем и устанавливается на суппорте токарного станка под углом β к оси обрабатываемой заготовки, равным углу подъема витков резьбы. Заготовка закрепляется в патроне станка и получает медленное вращение с частотой 6...40 об/мин. Головка получает вращение и продольную подачу, равную шагу P нарезаемой резьбы. Частота вращения резьбовой головки составляет 2000...3000 об/мин. При вращении головки (см. рис. 6.8) резец описывает окружность, диаметр которой больше диаметра заготовки. Один

раз за оборот головки каждый из резцов соприкасается по дуге с обрабатываемой заготовкой и за каждый оборот головки прорекает на заготовке серпообразную канавку, имеющую профиль резьбы. За каждый оборот заготовки образуется один виток резьбы. При этом срезаются короткие тонкие стружки, которые «вихрем» отлетают от резца. Поэтому данный метод получил еще название «вихревой».

Для фрезерования резьбы применяют дисковые и гребенчатые (групповые) фрезы. Дисковые резьбовые фрезы применяют в основном для нарезания длинных резьб трапецидального или прямоугольного профилей с большими шагами ($P=10...12$ мм). Данные фрезы относятся к группе фасонных фрез. У этих фрез профиль режущих кромок соответствует профилю нарезаемой резьбы, а задняя

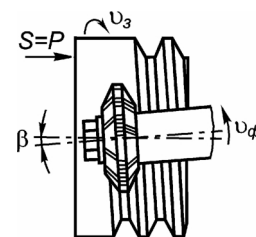


Рис. 6.9. Схема работы дисковой резьбовой фрезой

поверхность выполняется затылованной по архимедовой спирали. Схема резьбофрезерования приведена на рис. 6.9.

Как видно из рис. 6.9, принцип работы фрезы аналогичен принципу, применяемому в резьбонарезных головках.

Гребенчатая фреза представляет собой как бы группу дисковых фрез, собранных на одной оправке. Поэтому такие фрезы иногда называют групповыми.

6.4. НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ МЕТЧИКАМИ И ПЛАШКАМИ

Метчики – это режущие инструменты, предназначенные для нарезания резьбы в отверстиях и представляющие собой винт, на котором прорезаны режущие канавки радиусом R для образования режущих кромок и вывода стружки из зоны резания (рис. 6.10, а). При использовании метчиков может быть обеспечена 6-ая степень точности резьбы и шероховатость поверхности $Ra=6,3...3,2$ мкм.

Метчик состоит из рабочей части l и хвостовой l_x . Рабочая часть, в свою очередь, состоит из режущей (заборной) l_p и калибрующей l_k частей. Хвостовая часть l_x служит для закрепления метчика в патроне или воротке.

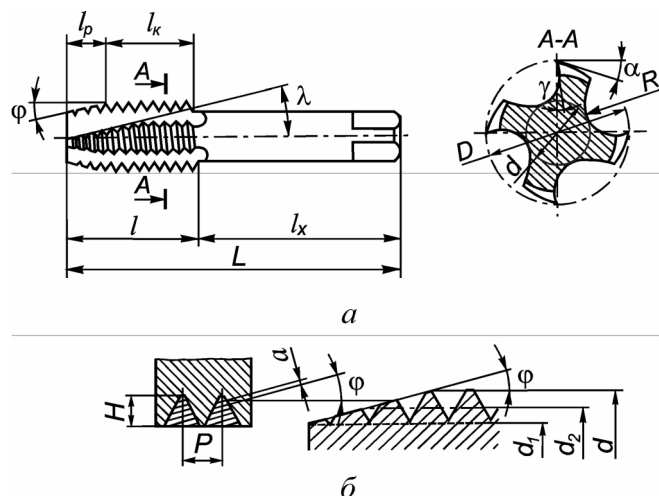


Рис. 6.10. Конструкция метчика:

a – конструктивные элементы; b – схема работы режущей (заборной) части

Переднюю поверхность зубьев режущей и калибрующей частей затачивают под углом γ , называемым передним. Значение γ зависит от вида обрабатываемого материала и составляет $0...25^\circ$ [28]. Задняя поверхность режущей части метчиков имеет затылование по вершинам под углом α , называемым задним. Величина заднего угла составляет $6...12^\circ$. На калибрующей части и боковых сторонах пера задний угол чаще равен нулю, и лишь у метчиков со шлифованной резьбой величина затылования составляет $0,2...0,3$ мм по ширине пера.

Калибрующая часть служит для окончательного формирования профиля резьбы, ее зачистки и направления метчика. С целью умень-

шения трения и снижения разбивания резьбы калибрующая часть метчика выполняется с обратной конусностью.

Параметрами, определяющими резьбу метчиков, являются: наружный диаметр d ; средний диаметр d_2 ; внутренний диаметр d_1 ; шаг резьбы P ; угол профиля $\alpha_{проф}$. У метчиков, предназначенных для нарезания метрической резьбы, шаг задается в миллиметрах, а угол профиля составляет 60° . У метчиков, предназначенных для нарезания трубной резьбы, шаг задается в нитках на один дюйм, а угол профиля равен 55° .

Заборная часть характеризуется длиной l_p и углом ϕ . В процессе работы метчика каждый зуб заборной части срезает слой толщиной a (рис. 6.10, b), который определяется по формуле

$$a = P \sin \phi / z,$$

где P – шаг нарезаемой резьбы; z – число пазов метчика.

Из приведенной формулы видно, что толщина среза стружки a зависит от ϕ , P и z . С уменьшением толщины срезаемого слоя уменьшается нагрузка на зуб и повышается стойкость метчиков. Однако чрезмерно малая толщина срезаемого слоя может привести к снижению стойкости метчика.

Метчики делятся на ручные (выпускаются комплектами из 2-3 метчиков), машинно-ручные (изготавливают одинарные и комплектные из двух метчиков) и машинные. В зависимости от вида метчика и его назначения геометрические параметры l_p и ϕ могут принимать следующие значения: $l_p = 2...8P$, $\phi = 15...25^\circ$.

Для эффективного удаления стружки из канавок метчика его режущие кромки при заточке передней поверхности выполняются с наклоном к оси под углом λ , который обеспечивает надежное транспортирование стружки в направлении движения подачи при обработке сквозных отверстий. При обработке глухих отверстий приме-

няют метчики с винтовыми канавками (рис. 6.11), имеющими угол наклона ω к оси метчика [30].

В основном метчики изготавливают из быстрорежущих сталей. Получают распространение также твердосплавные метчики малых размеров делаются цельными. В метчиках больших размеров к рабочей части твердосплавные пластины припаиваются или крепятся механическим способом.

Наружные резьбы невысокой точности (7...8 степеней точности) нарезают обычными круглыми плашками. Плашками с доведенными режущими кромками можно калибровать резьбы 5-й степени точности.

Основной недостаток всех типов плашек – это необходимость свинчивания их по окончании резания, что снижает производительность и несколько ухудшает качество резьбы.

Плашки, как и метчики, являются многолезвийными инструментами. Они бывают круглыми, квадратными и шестигранными. На практике наибольшее распространение получили круглые плашки благодаря их простоте, дешевизне и надежности в эксплуатации. Плашки изготавливаются из инструментальных легированных сталей, таких как ХВСГ и 9ХС, или быстрорежущих сталей.

Плашка представляет собой гайку, у которой режущие зубья образуются в процессе изготовления стружечных канавок. Основные конструктивные элементы и геометрические параметры круглой плашки представлены на рис. 6.12.

На зубьях плашки имеются режущие и калибрующие нитки. Режущая часть получена путем срезания ниток под углом φ к оси плашки и затылованием этих ниток с образованием заднего угла $\alpha = 6...8^\circ$. Угол заборной части принимается равным $\varphi = 15...25^\circ$. Режущая часть у плашек выполняется с двух сторон, что увеличивает срок службы инст-

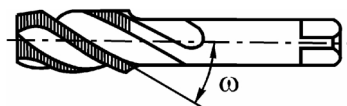


Рис. 6.11. Метчик с винтовыми канавками

румента. Калибрующая часть имеет полный профиль резьбы. Зубья на ней не затылуются. Длина калибрующей части равна 3...6 ниткам (виткам). Передний угол γ в зависимости от обрабатываемого материала принимается равным $15...30^\circ$. Вместе с тем следует отметить, что передний угол у круглой плашки не является постоянным вдоль режущей кромки, а уменьшается от вершины зуба к его периферии.

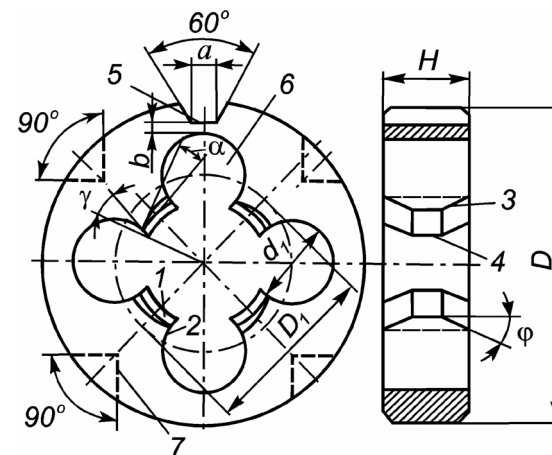


Рис. 6.12. Плашка круглая:
1 – режущий зуб; 2 – передняя поверхность; 3 – заборная часть;
4 – калибрующая часть; 5 – паз под регулировочный винт;
6 – стружечные канавки; 7 – крепежное углубление

Число стружечных канавок у плашек составляет 3...8 и определяется наружным диаметром плашки D . Высота плашки $H = (0,18...0,4)D$.

Наружная поверхность и торцы плашки являются базисными элементами при установке плашки в плашкодержателе или в специальном патроне для нарезания резьбы.

На плашке делается призматический паз с углом 60° и шириной $a = 3...16$ мм. Этот паз ориентирует плашку при ее установке в плашкодержателе. Кроме того, он облегчает разрезание плашки по-

сле ее затупления. Перемычка между дном паза и стружечным отверстием $b = 0,5 \dots 1,5$ мм.

Конические крепежные углубления 7 (см. рис. 6.12) служат для закрепления плашки соответствующими винтами плашкодержателя. Оси двух верхних углублений смещены на некоторую величину от линий, проходящих под углом 45° к вертикальной оси, что позволяет выбирать зазоры при закреплении и регулировать параметры разрезанных плашек после переточек.

Плашками нарезают резьбу как вручную, так и на различных станках токарной, сверлильной, резбонарезной групп. Круглые плашки устанавливают на станках в специальных патронах и закрепляют тремя-четырьмя винтами. Нарезание плашками – малопроизводительный процесс.

ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 6

1. Перечислите классификационные признаки резьб.
2. Опишите последовательность нарезания резьбы резцом.
3. Какие известны схемы нарезания резьбы резцами?
4. Какие резцы могут использоваться для нарезания резьб?
5. В чем преимущество призматических и круглых резьбовых резцов перед стержневыми?
6. В чем преимущества и недостатки нарезания резьбы гребенкой?
7. В каких случаях применяют для нарезания резьбы дисковые и гребенчатые фрезы?
8. В чем особенности конструкции и нарезания резьбы метчиками?
9. С какой целью режущие кромки метчика при его заточке по передней поверхности выполняются с наклоном к оси под углом λ ?
10. Какая точность обеспечивается при нарезании резьбы метчиками?
11. В чем особенности конструкции и нарезания резьбы плашками?
12. Из каких инструментальных материалов изготавливаются плашки?
13. Какая точность обеспечивается при нарезании резьбы плашками?
14. С какой целью оси двух верхних конических крепежных углублений 7 (см. рис. 80) смещены на некоторую величину от линий, проходящих под углом 45° к вертикальной оси?
15. С какой целью у плашек выполняется призматический паз?

7. АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ

Абразивная обработка – это обработка резанием, осуществляемая множеством абразивных зерен. Абразивная обработка может осуществляться свободными и связанными абразивными зёрнами. Связанные абразивные зёрна образуют абразивный инструмент, который может изготавливаться в виде шлифовальных кругов, брусков, головок, сегментов, лент и шкур. Свободный абразив может использоваться в виде паст, суспензий, порошков.

В настоящее время абразивные методы обработки очень широко используются в промышленности, они позволяют обеспечить точность размеров до 1 квалитета и шероховатость поверхности до $Ra = 0,08$ мкм.

7.1. АБРАЗИВНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Каждый вид инструмента, используемый при абразивной обработке, имеет свои особенности, обусловленные его назначением, конструкцией станка, выполняемой операцией, материалом заготовки и требованиями к обработанной детали. На рис. 7.1 приведены наиболее распространенные формы абразивных инструментов: шлифовальных и заточных кругов (ГОСТ Р 52781-2007), шлифовальных головок (ГОСТ 2447-82) и шлифовальных брусков (ГОСТ 2464-82).

Подробно области применения вышеуказанных инструментов приведены в работе [10, 24].

При выборе размеров круга следует брать возможно большие диаметр и высоту, так как это улучшает условия шлифования и снижает стоимость обработки. Верхний предел размеров круга ограничивается конструкцией и размерами станка, иногда – размерами и формой обрабатываемых заготовок.

Вещества природного или искусственного происхождения, содержащие минералы высокой твердости и прочности, зерна и порошки которых способны обрабатывать поверхности других твердых тел путем царапания, скобления или истирания, называют абразивными материалами. Из природных абразивных материалов применяют алмаз, кварц, корунд, кремнь и др. К искусственным абразивным материалам относятся электрокорунд и его разновидности; карбиды кремния и бора; синтетические алмазы, кубический нитрид бора и др.

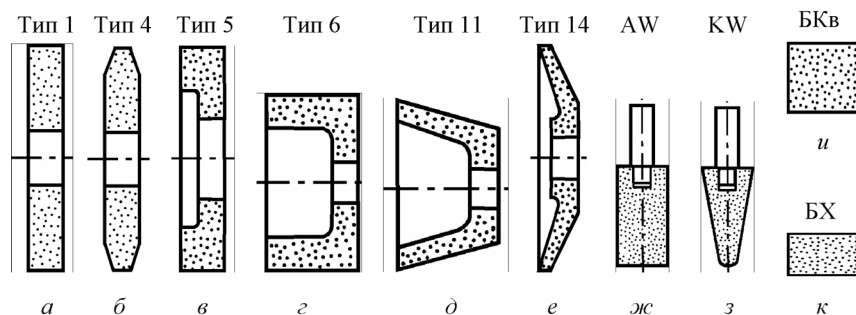


Рис. 7.1. Наиболее распространенные формы абразивных инструментов:
 круги: а – прямого профиля, б – с двусторонним коническим профилем, в – с выточкой, г – чашечные цилиндрические, д – чашечные конические, е – тарельчатые;
 головки: ж – цилиндрические, з – конические с закругленной вершиной;
 бруски: и – квадратные, к – хонинговальные

В настоящее время наиболее распространены искусственные электрокорундовые абразивные материалы, так как они обладают более высокими и стабильными качествами.

Электрокорунд, получающийся при плавке шихты, составленной из естественных бокситов (или глинозема) и других веществ, представляет собой корунд (кристаллический оксид алюминия Al_2O_3) с незначительными примесями других минералов и выпускается следующих разновидностей [20]:

- *нормальный* (12А-16А, 18А), содержащий 91...97% Al_2O_3 . Основную массу зерна выпускают марки 15А [20]. Цвет зерен – от розового и светло-коричневого до темно-коричневого;

- *белый* (22А-25А), содержащий 97...99 % Al_2O_3 и выше. Цвет зерен – бело-розовый или белый;

- *хромистый* (технический рубин, 32А-34А), получаемый путем плавки в электродуговых печах глинозема с добавкой оксида хрома. Он содержит не менее 97% Al_2O_3 и 0,4...1,2% Cr_2O_3 . Зерна хромистого электрокорунда по цвету сходны с рубином, имеют розовую или темно-вишневую окраску, обладают более высокой по сравнению с белым электрокорундом стабильностью физико-механических свойств и содержат больший процент монокристаллов;

- *титанистый* (технический сапфир, 37А), также получаемый путем плавки глинозема, но с присадками диоксида титана. Форма зерен титанистого электрокорунда более изометричная, что позволяет повысить абразивную способность инструментов;

- *циркониевый*, выпускаемый марки 38А и получаемый путем плавки в электродуговых печах из сырья, в состав которого входит глинозем, циркониевая руда или чистый диоксид циркония, оксиды титана и восстановитель;

- *хромотитанистый* (91А-94А), содержащий 95...98% корунда с добавлением хрома и титана, что улучшает абразивные свойства материала. Зерна хромотитанистого электрокорунда имеют сиреневый цвет.

Монокорунд выплавляют из бокситов с сернистым железом и восстановителем с последующим выделением монокристалла корунда. Выпускают монокорунд марок 43А-45А.

Абразивные материалы из белого и легированного электрокорундов применяют при обработке закаленных заготовок из углеродистых, быстрорежущих и коррозионностойких сталей. Для шлифования заготовок из цементированных, закаленных азотированных и

высоколегированных сталей с низкой теплопроводностью рекомендуется применять круги и головки из монокорунда.

Карбид кремния (карборунд), содержащий около 97...99% SiC и незначительное количество других минералов, получают в электропечах сопротивления. Промышленность выпускает две разновидности карбида кремния – зеленый и черный. Зеленый карбид кремния имеет повышенную по сравнению с черным хрупкость, цвет – от светло-зеленого до зеленого. Черный карбид кремния имеет черный или темно-синий цвет. Марки карбида кремния черного – 52С-54С, карбида кремния зеленого – 63С-64С [20].

Абразивный инструмент из карбида кремния применяют для обработки твердых материалов с низким сопротивлением разрыву (чугуна, бронзового и латунного литья, твердых сплавов и т.п.), титановых сплавов, а также мягких и вязких материалов (латуни, меди и т.д.).

Карбид бора, получаемый в дуговых электропечах, представляет собой твердый раствор бора в B_4C и содержит до 93% B_4C и 1,5% свободного углерода. Карбид бора в виде свободного абразива или в виде паст применяется для доводки поверхностей деталей.

Кубический нитрид бора состоит из 44% бора и 56% азота. Этот материал обладает твердостью, близкой к твердости алмаза, и теплоустойчивостью до $1600^\circ C$. Эльбор бывает обычной (ЛЮ) и повышенной (ЛП) прочности и высокопрочный ЛКВ. Его получают синтезом гексагонального нитрида бора при высоких давлениях и температурах. Эльбор применяется для чистовой обработки различных материалов, а также для доводки инструментов из быстрорежущих сталей повышенной и высокой теплостойкости.

Синтетические алмазы (АС) получают, как правило, в виде мелких кристаллов, не превышающих 3 мм. Синтез этих алмазов происходит в результате воздействия на графит высоких давлений (4,9 ГПа) и высоких температур ($2500^\circ C$). Для абразивной обработки

используют кристаллические синтетические алмазы марок АС2, АС4, АС6; АС15, АС20, АС32, АС50 или поликристаллические марок АРК4, АРС3 с покрытием зерен карбидом вольфрама (К) и кремния (С), повышающих их производительность и прочность [24].

Искусственные и природные абразивные материалы в зависимости от размера зерен делят на три группы: шлифпорошки (ГОСТ Р 52381-2005); микропорошки и тонкие микрошлифпорошки (ГОСТ 3647-80).

Для изготовления абразивного инструмента, исключая инструмент на гибкой основе, а также для использования шлифовальных порошков в виде свободного абразива на операциях доводки, виброабразивной обработки и т.д. производят шлифовальные порошки с размерами зерен от 4750 до 63 мкм. Обозначение зернистости и размеры сторон ячеек сита в свету, при которых зерна основной фракции проходят через сито или задерживаются на сите, приведено в табл. 7.1.

Для создания абразивного инструмента на гибкой основе изготавливают шлифовальные порошки зернистостей: Р12, Р16, Р20, Р24, Р30, Р36, Р40, Р50, Р60, Р80, Р100, Р120, Р150, Р180, Р220. Зерновой состав этих шлифовальных порошков приведен в ГОСТ Р 52381-2005.

Микропорошки изготавливают с размерами от 63 до 14 мкм и обозначают М63, М50, М40, М28, М20, М14, а тонкие микрошлифпорошки производят с размерами от 10 до 5 мкм и обозначают, соответственно, М10, М7, М5.

Материал или совокупность материалов, применяемых для закрепления абразивных зерен в абразивном инструменте, называют связкой. Связка определяет прочность и твердость инструмента, оказывает большое влияние на режимы, производительность и качество обработки.

Для изготовления абразивного инструмента, используемого при шлифовании, применяют в основном керамическую (V), бакелито-

вую (В) и вулканитовую (R) связки. Бакелитовая и вулканитовая связки могут иметь усиление. В этом случае они будут соответственно обозначаться как BF и RF.

Таблица 7.1.

Обозначение зернистости и размеры сторон ячеек сита в свету, при которых зерна основной фракции проходят через сито или задерживаются на сите

Обозначение зернистости	Размер стороны ячейки сита в свету (мкм), при которой зерна основной фракции		Обозначение зернистости	Размер стороны ячейки сита в свету (мкм), при которой зерна основной фракции	
	проходят через сито	задерживаются на сите		проходят через сито	задерживаются на сите
F4	5600	4750	F36	600	500
F5	4750	4000	F40	500	425
F6	4000	3350	F46	425	355
F7	3350	2800	F54	355	300
F8	2800	2360	F60	300	250
F10	2360	2000	F70	250	212
F12	2000	1700	F80	212	180
F14	1700	1400	F90	180	150
F16	1400	1180	F100	150	125
F20	1180	1000	F120	125	106
F22	1000	850	F150	106	75
F24	850	710	F180	90	75
F30	710	600	F220	75	63

Керамическая связка является многокомпонентной смесью огнеупорной глины, полевого шпата, борного стекла, талька и других минеральных материалов, составленной по определенному рецепту с добавками клеящих веществ – растворимого стекла, декстрина и др.

Она обладает высокой термостойкостью, водостойкостью, химической стойкостью, хорошо сохраняет профиль рабочей кромки круга, но чувствительна к ударным и изгибающим нагрузкам. На керамической связке изготавливается около 60 % всего абразивного инструмента [19].

Для бакелитовой связки в качестве связующего компонента используют порошкообразный или жидкий бакелит (фенолформальдегидную смолу) с соответствующими наполнителями и увлажнителями. Инструмент на бакелитовой связке обладает более высокой прочностью на сжатие и упругостью по сравнению с керамикой. При достаточно длительном воздействии температуры 250...300 °C бакелитовая связка выгорает, при 200 °C и выше – становится хрупкой и круги быстро срабатываются.

В основе вулканитовой связки лежит термически обработанная смесь каучука с серой. Вулканитовая связка по сравнению с другими видами связки более плотная и упругая, что вызывает повышенный нагрев обрабатываемой заготовки. Теплостойкость каучука низкая (150...180 °C). Создать большие давления при шлифовании кругами на вулканитовой связке нельзя, так как зерна утапливаются в связку. Упругость связки позволяет создавать очень тонкие отрезные круги при значительном диаметре (0,6...1,0 мм по высоте при диаметре 150...200 мм).

Величину, характеризующую свойство абразивного инструмента сопротивляться нарушению сцепления между зернами и связкой при сохранении характеристик инструмента в пределах установленных норм, называют твердостью абразивного инструмента. Это свойство абразивного инструмента оценивают определенными показателями, которые выбирают в зависимости от метода оценки твердости. В настоящее время для оценки твердости в зависимости от зернистости инструмента могут использоваться пескоструйный метод, методы вдавливания шарика, конуса или цилиндра (ГОСТ Р 52587-2006) или

акустический метод по скорости распространения акустических волн (ГОСТ Р 52710-2006). В табл. 7.2 приведены диапазоны и обозначения твердости абразивного инструмента в соответствии с ГОСТ Р 52587-2006.

Таблица 7.2

Диапазоны и обозначения твердости абразивного инструмента

Диапазоны твердости	Обозначения твердости	Твердость инструмента	Степень твердости
Весьма мягкий	F, G	Твердый	R, S
Мягкий	H, I, J	Весьма твердый	T, U
Среднемягкий	K, L	Чрезвычайно	V, W, X, Y, Z
Средний	M, N	твердый	
Среднетвердый	O, P, Q		
Примечание. Буквы характеризуют возрастание твердости внутри диапазона.			

На выбор твердости абразивного инструмента влияют следующие факторы: физико-механические свойства шлифуемого материала; размер площади контакта между инструментом и заготовкой; режим работы; мощность электродвигателя и состояние станка. Для обработки твердых материалов следует применять абразивные инструменты низкой степени твердости, а для обработки материалов невысокой твердости – более твердые. Исключение составляют медь, алюминий, свинец, коррозионно-стойкие и жаропрочные стали, которые шлифуют мягкими по твердости кругами.

Соотношение объемов шлифовального материала, связки и пор в абразивном инструменте называется его структурой. Объемное содержание абразивной фазы в инструменте принято характеризовать для инструментов из обычных абразивных материалов номером структуры. Структура обозначается номерами от 0 до 20. Чем меньше зерен в единице объема, тем выше порядковый номер структуры для традиционных абразивных инструментов. С увеличением структуры на один номер объем зерна в круге уменьшается на 2 %, а объем связки, соответственно, увеличивается на 2 %. Содержание зерна

в инструменте структуры №0 равно 62 %. Различают четыре группы структур: структуры №0-4 называются плотными, №5-8 – среднеплотными, №9-12 – открытыми и №13-20 – высокопористыми.

Мягкие материалы с небольшим сопротивлением разрыву обрабатываются кругами открытых структур, твердые с мелкозернистым строением и хрупкие материалы – кругами закрытых структур. Для окончательной обработки следует использовать круги более закрытых структур, чем для предварительной обработки; для обдирки рекомендуется использовать круги открытых структур и высокопористые круги.

Различают три класса точности кругов: АА, А и Б.

У шлифовальных кругов диаметром 250 мм и более перед установкой их на станок контролируют неуравновешенность масс. Установлено четыре класса неуравновешенности масс. Класс точности круга должен соответствовать классу его неуравновешенности:

класс точности.....	АА	А	Б
класс неуравновешенности.....	1	1,2	1-3

Маркировку кругов наносят: на этикетку при диаметрах кругов от 50 до 250 мм, на торцовую поверхность при диаметрах более 250 мм и на групповую потребительскую тару при диаметрах менее 50 мм. Маркировка круга должна содержать: товарный знак и наименование предприятия-изготовителя; название страны-изготовителя; юридический адрес; условное обозначение; номер партии; дату выпуска (месяц, год); штамп ОТК; знаки безопасности по ГОСТ Р 12.4.026: М 01, М 04 – при обработке на стационарных шлифовальных станках; М 01, М 03, М 04, М 06 – при обработке на ручных шлифовальных машинах; цветные полосы безопасности; предельную частоту вращения; ограничение по применению; обозначение стандарта ГОСТ Р 52588-2006; штриховой код (при наличии).

Пример условного обозначения круга типа 1, наружным диаметром $D = 300$ мм, высотой $T = 20$ мм, диаметром посадочного отвер-

ствия $H = 76,2$ мм, из белого электрокорунда марки 25А, зернистостью 60, твердостью K , номером структуры 6, на керамической связке V , с предельной рабочей скоростью 40 м/с, 2-го класса неуравновешенности: круг 1 300×20×76,2 25А F60 K 6 V 40 м/с 2 кл. ГОСТ Р 52781-2007.

Шлифовальные круги (кроме кругов диаметром до 250 мм), предназначенные для скоростного шлифования, имеют цветную диаметральною полосу (табл. 7.3, ГОСТ Р 52588-2006).

Таблица 7.3

Цветные полосы безопасности у абразивных кругов

Предельная рабочая скорость, м/с	Цвет полос
50	Синяя
63	Желтая
80	Красная
100	Зеленая
125	Синяя и желтая
140	Синяя и красная
160	Синяя и зеленая

7.2. ШЛИФОВАНИЕ

Шлифование является одним из производительных методов окончательной обработки деталей простой и сложной формы и обеспечивает точность размеров по 5...8 квалитетам, высокие требования к точности формы и расположения поверхностей, например, отклонение от цилиндричности 2...3 мкм, отклонение от круглости 0,4...0,5 мкм и шероховатость поверхности $Ra = 1,25...0,2$ мкм.

Абразивный инструмент, в том числе и шлифовальные круги, не имеет сплошной режущей кромки, присущей лезвийному инструменту. Пространственное расположение режущих граней и поверхностей абразивных зерен разнообразной формы и размеров определяет существенное отличие процесса образования поверхности при

абразивной обработке от процесса резания лезвийным инструментом.

Основные виды шлифования приведены на рис. 7.2. Подробное описание представленных на рис. 7.2 основных видов шлифования, а также их особенностей изложено в работе [24].

Главное движение при шлифовании совершает шлифовальный круг, вращаясь со скоростью

$$v_k = \frac{\pi D_k n_k}{60 \cdot 1000},$$

где v_k – скорость вращения шлифовального круга, м/с; D_k – наружный диаметр круга, мм.

Различают обычное шлифование при $v_k < 50$ м/с и скоростное шлифование при $v_k \geq 50$ м/с. Подача может быть различной: продольной $S_{пр}$, поперечной $S_{поп}$, поперечной на ход (или двойной ход) $S_x(S_{2x})$, вертикальной S_v .

Для снятия материала в процессе шлифования приходится затрачивать определенное количество энергии, т.е. совершать работу по преодолению трения, сопротивления обрабатываемого материала пластическому и упругому деформированию его инструментом. Основная часть энергии шлифования идет на преодоление сил трения, возникающих между обрабатываемой поверхностью и зернами, а также связкой. Работа деформации срезаемого слоя составляет не более 25% всей работы шлифования. Очень большая деформация при шлифовании обусловлена малыми толщинами среза и большими отрицательными передними углами ($\gamma_{cp} = -45^\circ$) на режущих зернах. Для съема единицы объема материала при шлифовании затрачивается в 20 раз больше энергии, чем при точении и фрезеровании.

При взаимодействии инструмента с заготовкой возникают силы резания (рис. 7.3), определяющие совершаемую при шлифовании работу. Это силы аналогичные силам резания при точении. Наличие

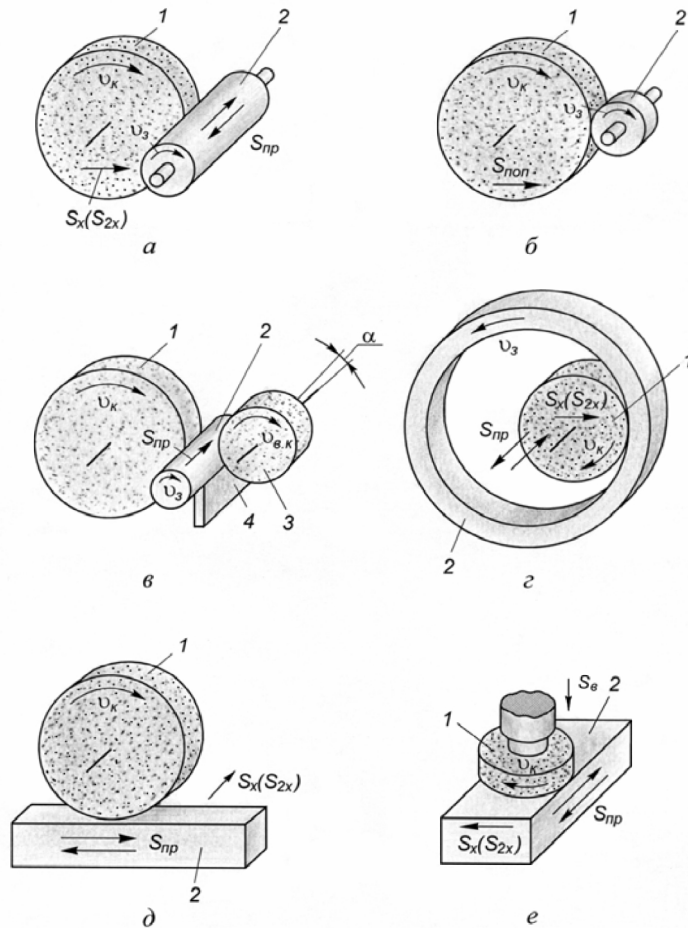


Рис. 7.2. Основные виды шлифования:

a – круглое наружное с продольной подачей; *б* – круглое наружное врезанием; *в* – бесцентровое наружное с продольной подачей; *г* – круглое внутреннее с продольной подачей; *д* – плоское периферией круга; *е* – плоское торцом круга; 1 – круг шлифовальный; 2 – заготовка; 3 – круг ведущий; 4 – нож опорный; v_k – скорость вращения круга; v_z – скорость вращения заготовки; v_{ek} – скорость ведущего круга; $S_{пр}$ – продольная подача; $S_x(S_{2x})$ – поперечная подача; S_g – вертикальная подача

на зернах значительных радиусов округления ρ , большие отрицательные передние углы и малые толщины среза являются причиной того, что радиальная составляющая силы резания P_y в 1,5...3 раза больше главной составляющей силы резания P_z .

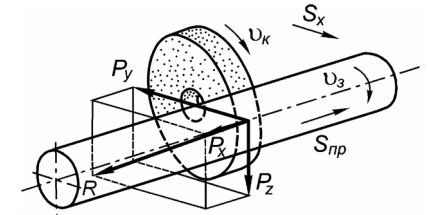


Рис. 7.3. Силы резания при шлифовании

Отношение P_y/P_z ориентировочно характеризует долю энергетических затрат на полезную работу. При уменьшении P_y/P_z повышается доля полезных затрат и снижается работа трения и стружкообразования.

Рабочий цикл шлифования, т.е. съем материала в пределах припуска, осуществляется в три этапа. С момента контакта круга с заготовкой на первом этапе происходит процесс постепенного врезания, сопровождающийся увеличением силы резания. После создания определенного натяга в системе, т.е. выбора имеющихся зазоров, люфтов и деформации некоторых деталей, устанавливается примерно постоянная интенсивность съема материала. В этот период величина силы резания стабилизируется. В третий период шлифование производится с уменьшенной или выключенной (нулевой) поперечной подачей. Интенсивность съема материала и сила резания постепенно уменьшаются, так как уменьшаются глубина врезания абразивных зерен и натяг в системе. Этот период называется выхаживанием. При выхаживании уменьшается шероховатость шлифуемой поверхности и повышается точность обработки.

Составляющие силы резания при шлифовании из-за небольших сечений среза обычно невелики. Однако мощность N (кВт), затрачиваемая приводом станка на процесс шлифования, значительна ввиду большой скорости круга:

$$N = \frac{P_z v_k}{1000},$$

где v_k – скорость круга, м/с; P_z – главная составляющая силы резания, Н.

Силу резания P_z , также как и при точении, определяют по экспериментальным формулам степенного вида [13, 19, 24]:

$$P_z = C_{P_z} v_k^{x_{P_z}} v_3^{y_{P_z}} S_{np}^{z_{P_z}} S_{2x}^{m_{P_z}},$$

где $C_{P_z}, x_{P_z}, y_{P_z}, z_{P_z}, m_{P_z}$ – опытные коэффициенты, учитывающие условия обработки и свойства материала.

Силы, возникающие при шлифовании, производят работу по срезанию стружек, преодолению трения абразивных зерен и связки обрабатываемую поверхность и т.п. Около 80% внешней работы, затрачиваемой на шлифование, обычно переходит в теплоту. Часть образующейся теплоты уносится со стружкой, большая часть остается в обрабатываемой заготовке, а некоторая часть уходит в абразивный инструмент и излучается в окружающую среду [20].

С увеличением скорости съема металла почти пропорционально увеличивается количество выделяющейся теплоты.

При шлифовании различают следующие основные температуры:

- среднюю установившуюся температуру поверхности заготовки θ_z , изменяющуюся в пределах от 20 до 400 °C в зависимости от режима шлифования, размеров и материала заготовки и условий охлаждения;
- среднюю контактную температуру в зоне резания θ_{cp} , изменяющуюся в пределах от 150 до 1200 °C ;
- мгновенную температуру резания $\theta_{мгн}$ отдельными абразивными зернами в пределах от 1000 °C до температуры плавления шлифуемого металла.

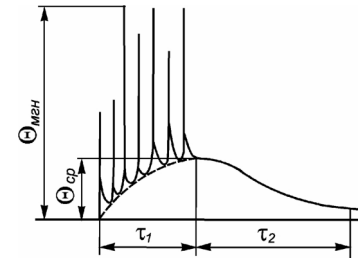


Рис. 7.4. Импульсы температуры при шлифовании

Для характеристики процесса шлифования наибольший интерес представляет средняя температура в зоне контакта круга с деталью, т.е. θ_{cp} (рис. 7.4), где τ_1 – время нагрева, т.е. время нахождения рассматриваемой точки обрабатываемой поверхности в зоне контакта круга с заготовкой, τ_2 – время

охлаждения. Воздействию мгновенных температур подвергаются лишь отдельные участки зоны контакта. Вся контактная зона имеет более низкую температуру; она является огибающей оснований мгновенных температур от резания отдельными зернами, а максимальное значение этой огибающей будет равно θ_{cp} . Таким образом, $\theta_{мгн} > \theta_{cp} > \theta_z$.

Наличие высоких температур в зоне резания, большая скорость нагрева (до 10⁶ °C/c) и охлаждения (до 10⁵ °C/c) могут привести к изменению структурно-фазового состояния поверхностного слоя шлифуемой заготовки (возникновению прижогов), появлению тепловых и остаточных деформаций и шлифовочных трещин.

Появление прижогов и трещин сопровождается ростом растягивающих остаточных напряжений, снижающих сопротивление усталости деталей, уменьшением твердости и износостойкости поверхностного слоя.

При появлении прижогов и трещин иногда приходится уменьшать интенсивность съема металла снижением поперечной подачи. Полезно также увеличить скорость заготовки. В этом случае, сохраняя скорость съема металла неизменной, можно снизить температуру на поверхности заготовки.

Однако если материалы склонны к возникновению прижогов и трещин, то для обработки целесообразно использовать прогрессивные конструкции шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью. Эти круги при твердости на 1...2 степени выше, чем у обычных серийных, обеспечивают требуемое состояние поверхностного слоя деталей при повышении производительности обработки в 1,3...10 раз.

Надежность, долговечность и другие эксплуатационные свойства деталей машин в значительной степени зависят от качества обработанной поверхности. Под качеством поверхности подразумевается весь комплекс параметров, определяющих точность обработки, геометрическую форму и физико-механические свойства, получаемые в результате обработки тем или иным технологическим способом.

Точность обработки, представляющая собой степень приближения действительных размеров детали к ее номинальному размеру, по-разному зависит от первичных источников погрешностей. Согласно данным работы [16], наибольшее влияние на точность абразивной обработки оказывают силовые и температурные деформации, а также погрешности установки шлифовального инструмента.

Шероховатость и волнистость поверхности при шлифовании определяется главным образом рельефом рабочей поверхности круга, вибрациями, зернистостью абразива и режимом шлифования. При недостаточной жесткости технологической системы могут возникать вибрации, увеличивающие шероховатость и отклонение от круглости (огранку) обработанной поверхности. При наличии вынужденных колебаний от дисбаланса круга шероховатость поверхности увеличивается в несколько раз.

Степень наклепа при шлифовании закаленных сталей может составлять до 60%, а при шлифовании вязких материалов – до 80%. Глубина наклепанного слоя обычно в пределах 0,03...0,06 мм [19].

При механической обработке, как уже отмечалось, возникают остаточные пластические деформации (деформационное упрочнение).

Эти деформации вызывают изменения линейных размеров обработанного поверхностного слоя детали, однако нижележащие упруго-напряженные слои, с которыми верхний упрочненный слой неразрывно связан, противодействуют отмеченным изменениям. В результате возникают остаточные напряжения того или иного знака с уровнем, который может достигать предела прочности обрабатываемого материала.

Формирование остаточных напряжений, по данным проф. Б.А. Кравченко [14], осуществляется под влиянием силового и температурного факторов при доминирующем влиянии первого, если условия в зоне контакта круга с заготовкой (температура, скорость нагрева и охлаждения) не способствуют протеканию структурно-фазовых превращений. В этом случае остаточные температурные деформации значительно меньше деформаций, вызываемых силами резания. Более того, нагрев обрабатываемой поверхности даже способствует увеличению деформаций, вызываемых силами резания. Подробно механизм формирования остаточных напряжений при механической обработке (в том числе и шлифовании) малопластичных и пластичных материалов изложен в работе [14].

В процессе работы происходит изменение рельефа и геометрии рабочей поверхности абразивных инструментов. При этом общий расход инструмента будет складываться из его износа в процессе обработки и объема, удаленного в процессе периодических правок, которые проводят с целью восстановления режущих свойств инструмента и восстановления его геометрии. Практика показывает, что для разных случаев и условий шлифования износ рабочей части круга при правке составляет 50...95 % [11]. Частота правки зависит от периода стойкости круга T , т.е. времени работы абразивного инструмента между двумя последовательными правками, в течение которого абразивный инструмент соответствует заданным требованиям. Ориентировочно, по данным работы [29], период стойкости составляет для круглого наружного шлифования – 3...10 мин, для круглого внутреннего шлифования – 1...5 мин и для плоского шлифования – 5...10 мин.

В зависимости от условий шлифования абразивный инструмент может работать как в режиме затупления, так и в режиме самозатачивания. Под самозатачиванием понимают способность инструмента обновлять свою режущую поверхность под воздействием сил резания. Если поры инструмента в процессе шлифования забиваются стружкой и частицами износа, то абразивный инструмент теряет свою режущую способность еще до того, как его зерна затупятся, то есть происходит «засаливание» круга.

7.3. АБРАЗИВНО-ЛЕНТОЧНОЕ ШЛИФОВАНИЕ

Абразивно-ленточное шлифование является прогрессивным и перспективным процессом абразивной обработки, осуществляемым абразивной лентой, движущейся со скоростью $v_d = 10...50$ м/с (рис. 7.5). Ленточное шлифование обеспечивает шероховатость поверхности $Ra = 0,63...0,08$ мкм. Этот вид шлифования применяется при чистовой обработке деталей сложной формы, например лопаток турбин и компрессоров, обработке поковок, отливок, листового материала, проката, труб, прутков, зачистке сварных швов [15].

Режущим инструментом при абразивно-ленточном шлифовании является абразивная лента, состоящая из основы, слоя абразивных зерен и клея-связки. Основой ленты являются прочные сорта бумаги и ткани – хлопчатобумажные и штапельные (бязь, полотно, саржа и др.). Абразивные ленты изготавливаются шириной от 6 до 2200 мм и длиной от 280 до 15200 мм. Обычно цикл обработки не превышает 10...30 с, а снимаемый припуск – 0,01...0,05 мм.

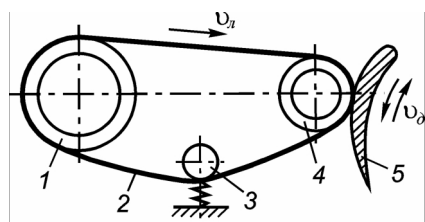


Рис. 7.5. Схема абразивно-ленточного шлифования пера лопатки:
1 – ведущий ролик; 2 – абразивная лента;
3 – натяжное устройство; 4 – ведомый ролик;
5 – обрабатываемая деталь

Рабочая поверхность ленты в несколько раз превышает рабочую поверхность шлифовального круга, что обеспечивает более высокую производительность процесса по сравнению с обычным шлифованием. Ленточное шлифование имеет иной баланс теплоты, чем при шлифовании кругами. Температура поверхности заготовки при ленточном шлифовании ниже, чем при шлифовании кругами, но выше, чем при шлифовании свободным абразивом. Меньшие, чем при обработке кругами, силы и температура приводят при ленточном шлифовании к меньшему изменению исходных свойств материала в поверхностном слое. Обработка абразивными лентами сопровождается формированием в поверхностном слое деталей сжимающих остаточных напряжений до глубины 30...40 мкм и более.

7.4. ХОНИНГОВАНИЕ

Хонингование – это процесс чистовой абразивной обработки заготовок специальной головкой (хоном), которая предназначена для обработки цилиндрических поверхностей (внутренних и реже наружных) и позволяет обеспечить 2...4 квалитет точности, отклонение от цилиндричности до 5 мкм и шероховатость поверхности $Ra = 0,63...0,04$ мкм.

Инструмент – хон – оснащен раздвижными мелкозернистыми брусками. Количество брусков зависит от обрабатываемого диаметра и составляет у различных хонов от 1 до 12. Головки с одним бруском имеют две опоры на корпусе. Диапазон диаметров хонингуемых отверстий – от 3 до 1000 мм, а длина – до нескольких метров. При хонинговании инструмент совершает вращательное движение со скоростью $v = 40...80$ м/мин и возвратно-поступательное движение, соответственно, со скоростью $v_{en} = (0,2...0,5)v$ (рис. 7.6). При черновом (предварительном) хонинговании припуск на диаметр составляет 0,1...0,3 мм, а при получистовом и чистовом (окончательном) – 0,005...0,1 мм [18].

При хонинговании в отличие от шлифования в работе участвует в 100...1000 раз больше абразивных зерен, а скорость резания и давление инструмента на обрабатываемую поверхность, соответственно, в 50...120 и 6...10 раз меньше, что благоприятно сказывается на формировании состояния поверхностного слоя деталей.

7.5. СУПЕРФИНИШ

Суперфиниш – процесс сверхтонкой абразивной обработки наружных и внутренних цилиндрических и конических поверхностей, а также плоскостей колеблющимися брусками, обеспечивающий шероховатость поверхности $Ra = 0,08...0,02$ мкм. При суперфинише удаляются обычно гребешки, оставшиеся от предыдущей обработки, поэтому для этого процесса оставляют очень малые припуски – около 0,005...0,01 мм. Применение алмазных и эльборовых брусков позволяет увеличить съем материала на 30...40 % [19].

На рис. 7.7 представлена схема обработки наружной цилиндрической поверхности заготовки суперфинишной головкой, оснащенной, как правило, двумя мелкозернистыми брусками. При суперфинишировании бруски совершают колебательные движения с частотой 300...2500 дв.ход/мин и амплитудой 1...5 мм. При этом суперфинишная головка перемещается с продольной подачей

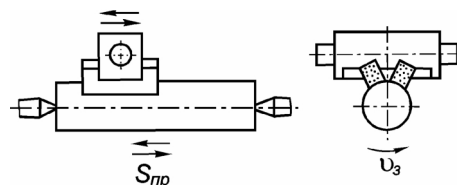


Рис. 7.7. Схема суперфиниширования цилиндрической поверхности заготовки

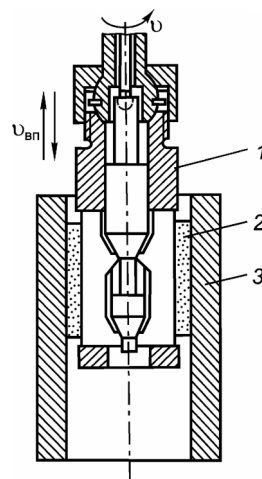


Рис. 7.6. Схема хонингования:
1 – инструмент (хон);
2 – абразивный брусок;
3 – заготовка

$S_{np} = 0,1...1$ м/мин, а заготовка вращается со скоростью $v_3 = 10...30$ м/мин. В процессе обработки давление брусков на заготовку $\leq 0,2$ МПа, а температура в зоне резания не превышает 100 °С.

При суперфинишировании и хонинговании в поверхностном слое деталей из закаленных сталей образуются остаточные напряжения сжатия с глубиной залегания до 15 мкм, что способствует повышению предела усталости деталей.

7.6. ДОВОДКА

Абразивная доводка является методом окончательной обработки деталей, обеспечивающим высокую точность и высокое качество поверхностного слоя: шероховатость поверхности – до $Ra = 0,02...0,01$ мкм, отклонения

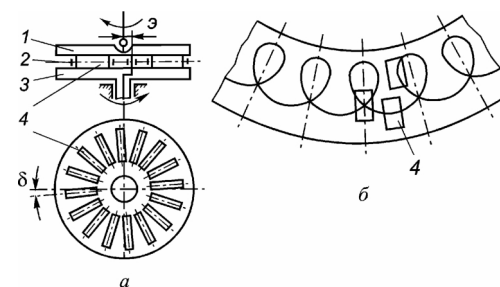


Рис. 7.8. Схема абразивной доводки:
а – схема: 1, 3 – диски, 2 – сепаратор, 4 – деталь;
б – траектория движения деталей

размеров и формы обработанных поверхностей – до 0,05...0,3 мкм. Параметры качества обработки после доводки выше, чем после тонкого шлифования, суперфиниширования и хонингования.

Процесс доводки обычно состоит из предварительного, промежуточного и окончательного переходов. Доводочные смеси, наносимые на притир, применяют в виде паст и суспензий с концентрацией абразива от 3 до 30%. При доводке снимаются малые припуски, составляющие 0,01...0,05 мм.

Наибольшее распространение получила схема доводки с двумя дисками-притирами, между которыми помещается сепаратор с деталями (рис. 7.8). За счет эксцентричного вращения сепаратора отно-

сительно дисков, обеспечивающего сложную траекторию движения деталей, производится сьем припуска.

7.7. ВИБРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Виброабразивная обработка деталей приводит к сглаживанию их поверхностей в результате колебательных движений деталей в специальных вибрационных барабанах или камерах – контейнерах, куда также загружается наполнитель из абразивных материалов. В качестве наполнителя используются зерна из электрокорунда и карбида кремния зернистостью F46...F60, дробленые отходы шлифовальных кругов зернистостью F60...F180 и др. Контейнер совершает колебательные движения с частотой 900...3000 колебаний в минуту с амплитудой 0,5...9 мм в течение 0,5...5 часов (рис. 7.9).

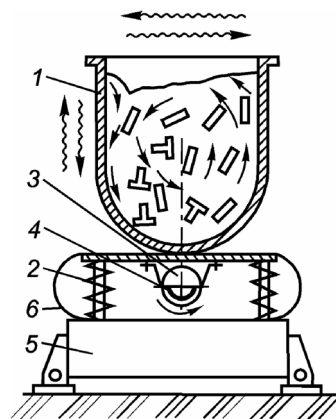


Рис. 7.9. Схема вибрационной установки:
1 – рабочая камера; 2 – пружина;
3 – инерционный вибратор;
4 – груз; 5 – основание;
6 – ленточная пружина

7.8. СТРУЙНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Струйно-абразивная обработка производится зернами абразива, выбрасываемыми струей воздуха под давлением (рис. 7.10). При ударе абразивных зерен происходит сьем металла и постепенное уменьшение высоты микронеровностей, а также упрочнение поверхностного слоя, что значительно повышает со-

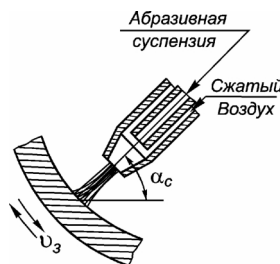


Рис. 7.10. Схема струйно-абразивной обработки

противление усталости деталей. Интенсивность съема обрабатываемого материала зависит от зернистости абразива, давления струи и угла атаки α_c .

Данный способ наиболее эффективен при обработке наружных и внутренних поверхностей крупных деталей фасонной формы.

Для операций очистки и снятия заусенцев обычно применяют абразивный материал зернистостью F46...F120, а для полирования поверхностей – зернистостью M5...M20.

7.9. ТУРБОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Турбоабразивную обработку производят в рабочей камере 1 (рис. 7.11), дном которой является пористая решетка 3. К камере снизу подводят сжатый воздух. Насыпанный на дно камеры слой абразивных зерен при высокой скорости воздушного потока образует так называемый «кипящий» слой 2 [27].

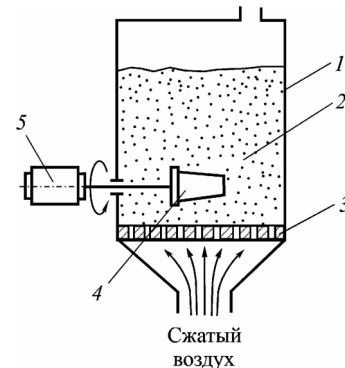


Рис. 7.11. Схема турбоабразивной обработки:
1 – рабочая камера; 2 – «кипящий» слой; 3 – пористая решетка;
4 – заготовка; 5 – электродвигатель

В рабочую камеру вводят обрабатываемую заготовку 4, которой сообщается либо вращательное движение от электродвигателя 5 (см. рис. 7.11), либо более сложное движение. В результате хаотического микроударного воздействия абразивными зернами на обрабатываемую поверхность происходит её зачистка. В качестве абразива обычно используют зерна электрокорунда зернистостью F24... F100 в зависимости от требуемой шероховатости $Ra = 0,2...10$ мкм. При данном виде обра-

ботки скорость вращения (движения) заготовки составляет обычно 15...30 м/с, а интенсивность снятия припуска – до 2...5 мкм/мин. При

турбоабразивной обработке удаляются заусенцы и закругляются кромки на деталях, оставшиеся после точения, сверления, протягивания, зубонарезания и т.д. Изменяя режимы и время обработки, можно получить различные радиусы закругления кромок.

Метод может быть рекомендован в качестве альтернативного трудоемким и небезопасным слесарным операциям. Для его реализации создан ряд конструкций специальных установок, позволяющих обрабатывать заготовки размером от 20 до 1200 мм.

7.10. МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Сущность магнитно-абразивной обработки (МАО) заключается в том, что обрабатываемой заготовке или специальному магнитно-абразивному порошку, помещенным в постоянное магнитное поле, сообщают принудительное движение относительно друг друга.

Схема МАО наружных поверхностей вращения представлена на рис. 7.12 [2].

Для осуществления процесса МАО обрабатываемая заготовка 3 помещается между полюсными наконечниками 1 электромагнита. При включении тока между этими полюсными наконечниками создается магнитное поле. В зазоры между полюсами и деталью засыпаются зерна специального материала (типа кермета, ферробора и др.), полученные методом спекания железа с абразивом. Размер частиц составляет порядка 100...200 мкм. В созданном магнитном поле образуется своеобразная «щетка» в виде ориентированных вдоль магнитных силовых линий наибольшей осью зерен порошка, в результате чего осуществляется обработка. При этом давление в уплотненном слое составляет около 0,5...1,0 МПа.

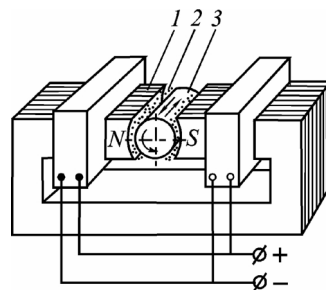


Рис. 7.12. Схема магнитно-абразивного полирования наружных поверхностей тел вращения

Неоспоримым преимуществом магнитно-абразивной обработки является то, что она применима к обработке заготовок любой геометрической формы (плоских, цилиндрических наружных и внутренних, фасонных) как из магнитных, так и немагнитных материалов. Эластичный слой порошка под действием магнитного поля обладает способностью формироваться у обрабатываемой поверхности, копируя ее профиль. Это дает возможность обрабатывать сложнопрофильные поверхности с использованием прямолинейного движения осцилляции.

Скорость заготовки $v_z = 0,8...3,6$ м/с, магнитная индукция – 0,8...1,2 Тл. При работе на таких режимах в течение 60...90 с шероховатость поверхности заготовки может уменьшиться до 12 раз, при этом производительность обработки составляет 10...30 мкм/мин.

Установлено, что за 60 с обработки заготовок из стали 45, имеющих исходную шероховатость $Ra = 1,5...0,63$ мкм, создается поверхность с шероховатостью $Ra = 0,04...0,02$ мкм, относительной опорной длиной профиля – $t_{50} 60...70\%$ и радиусами закругления неровностей 300...5000 мкм [2].

Наличие на обработанной поверхности впадин исходного профиля, выполняющих роль так называемых «масляных карманов», способствует улучшению смазки при трении. Исследованиями установлено также, что благодаря сравнительно мягкому воздействию эластичной «щетki» в поверхностных слоях создаются благоприятные сжимающие напряжения взамен растягивающих, образованных на предшествующих операциях шлифования. Кроме этого, МАО удаляет шаржированный абразивными осколками поверхностный слой, полученный после предварительного шлифования.

Производительность МАО и качество поверхности определяются параметрами магнитного поля (магнитной индукцией), величиной рабочего зазора между заготовкой и полюсными наконечниками, зернистостью порошка, относительной скоростью вращения заготовки, величиной осцилляции и продольной подачей.

ВОПРОСЫ К РАЗДЕЛУ 7

1. Что такое абразивная обработка?
2. Какие абразивные инструменты выпускаются промышленностью?
3. Перечислите наиболее распространенные формы шлифовальных кругов.
4. Назовите абразивные материалы природного происхождения.
5. Перечислите искусственные абразивные материалы.
6. Какие разновидности электрокорунда выпускаются промышленностью, и чем они различаются?
7. Какие разновидности карбида кремния выпускаются промышленностью, и чем они различаются?
8. На какие группы делятся абразивные материалы в зависимости от размера зёрен?
9. Шлифовальные порошки каких зернистостей выпускаются промышленностью?
10. Какие связки используются для изготовления абразивного инструмента, и как они обозначаются?
11. Что характеризует твердость абразивного инструмента?
12. Перечислите диапазоны твердости абразивного инструмента.
13. Что такое структура абразивного инструмента? Перечислите существующие виды структур.
14. Перечислите существующие классы точности и неуравновешенности шлифовальных кругов.
15. Напишите условное обозначение для произвольного шлифовального круга.
16. Что такое шлифование?
17. Перечислите основные виды шлифования.
18. Из каких этапов состоит цикл шлифования?
19. Какая составляющая силы резания имеет при шлифовании наибольшее значение и почему?
20. Какие основные температуры различают при шлифовании?
21. Какие мероприятия могут способствовать устранению возникновения шлифовочных прижогов и трещин при обработке?
22. Под влиянием каких факторов происходит формирование остаточных напряжений при шлифовании?
23. Из каких составляющих складывается расход инструмента при шлифовании?
24. Дайте характеристику абразивно-ленточному шлифованию.
25. Что такое хонингование?
26. Что такое суперфиниш?
27. Что такое доводка?
28. В чем суть виброабразивной обработки?
29. В чем заключается сущность турбоабразивной обработки?
30. Что представляет из себя магнитно-абразивная обработка?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В подготовленном авторами учебно-теоретическом пособии изложены основы обработки материалов резанием, описаны геометрия и конструкции инструментов основных видов, а также дана характеристика процессов формообразования, для которых предназначены данные инструменты. Более глубокое усвоение изложенного в пособии материала возможно лишь при решении конкретных инженерных задач, возникающих при проектировании технологических процессов изготовления деталей, а именно: выбора инструментальных материалов, геометрических параметров инструментов, режимов обработки, состава СОТС; расчета усилий при обработке, температуры в зоне резания, стойкости и расхода инструментов и т.д. Данные навыки приобретаются при выполнении расчетно-графических работ, курсовых и дипломного проектов.

Вместе с тем исходя из материала, приведенного в пособии, можно сделать следующие *выводы*:

1. Процесс резания представляет собой комплекс чрезвычайно сложных явлений, зависящих от физико-механических свойств обрабатываемого материала, качества режущего инструмента, условий резания, состояния станка и жесткости технологической системы. Он сопровождается упругими и пластическими деформациями, разрушением материала, трением, износом режущего инструмента, неоднородным температурным полем, вибрациями отдельных составляющих или технологической системы в целом. Знание закономерностей этих явлений позволяет выбрать рациональные условия формообразования и обеспечить производительную и качественную обработку.

2. Создание качественного режущего инструмента предполагает его экономичность, повышенную прочность, жесткость, виброустойчивость, стойкость, точность и быстротенность. Эти показатели формируются как на стадии проектирования, так и в процессе его изготовления. Поэтому конструктору-инструментальщику необходимо знать инструментальные материалы, конструкции и геометрию режущих инструментов, а также влияние геометрии на производительность и качество обработки.

3. Знание процессов механической обработки материалов, их технико-экономических показателей позволяет технологу-машиностроителю спроектировать оптимальный технологический процесс изготовления детали практически любой сложности.

Данное учебное пособие является составной частью учебно-методических комплексов по таким дисциплинам, как «Резание материалов», «Обработка конструкционных материалов», «Процессы и операции формообразования» и «Металлообрабатывающие машины и оборудование».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абуладзе, Н.Г. Характер и длина пластического контакта стружки с передней поверхностью инструмента / Н.Г. Абуладзе // Обработка жаропрочных и титановых сплавов: сб. науч. тр. – Куйбышев: Куйбышев. кн. изд-во, 1962. – С. 68-77.
2. Амитан, Г.Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение, 1988. – 719 с. – ISBN 5-217-00267-0.
3. Баранчиков, В.И. Обработка специальных материалов в машиностроении: справочник. Библиотека технолога / В.И. Баранчиков, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение, 2002. – 254 с. – ISBN 5-217-03132-8.
4. Баранчиков, В.И. Справочник конструктора – инструментальщика / В.И. Баранчиков [и др.]; под общ. ред. В.А. Гречишниковой и С.В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2006. – 542 с. – ISBN 5-217-03353-3.
5. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
6. Бобровский, А.В. Резание цветных металлов: справочник / А.В. Бобровский, О.И. Драчев, А.В. Рыбьяков. – СПб.: Политехника, 2001. – 200 с. – ISBN 5-7325-0536-9.
7. Гузеев, В.И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: справочник / В.И. Гузеев, В.А. Батуев, И.В. Сурков; под ред. В.И. Гузеева. – М.: Машиностроение, 2005. – 368 с. – ISBN 5-217-03278-2.
8. Драгун, А.П. Режущий инструмент / А.П. Драгун. – Л.: Лениздат, 1986. – 271 с.
9. Зуев, А.А. Технология машиностроения: учеб. пособие / А.А. Зуев. – СПб.: Изд-во «Лань», 2003. – 496 с. – ISBN 5-8114-0470-0.
10. Иванов, Ю.И. Режущий инструмент: учеб. пособие. Ч.1/ Ю.И. Иванов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. – 160 с.
11. Ипполитов, Г.М. Абразивно-алмазная обработка / Г.М. Ипполитов. – М.: Машиностроение, 1969. – 334 с.
12. Кожевников, Д.В. Режущий инструмент: учебник для вузов / Д.В. Кожевников [и др.]; под ред. С.В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с. – ISBN 5-217-03250-2.
13. Кожевников, Д.В. Резание материалов: учебник / Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов; под общ. ред. С.В. Кирсанова. – М.: Машиностроение, 2007. – 304 с. – ISBN 5-217-03357-6.

14. Кравченко, Б.А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке: учеб. пособие / Б.А. Кравченко. – Куйбышев: Куйбышев. политехн. ин-т, 1981. – 90 с.
15. Кривоухов, В.А. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки: учебник / В.А. Кривоухов [и др.]; под ред. П.Г. Петрухи. – М.: Машиностроение, 1974. – 616 с.
16. Лурье, Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 175 с.
17. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
18. Орлов, П.Н. Краткий справочник металлиста / П.Н. Орлов [и др.]; под ред. П.Н. Орлова, Е.А. Скороходова. – М.: Машиностроение, 1986. – 960 с.
19. Петруха, П.Г. Технология обработки конструкционных материалов: учебник / П.Г. Петруха [и др.]; под ред. П.Г. Петрухи. – М.: Высшая школа, 1991. – 512 с. – ISBN 5-06-000703-0.
20. Попов, С.А. Шлифовальные работы: учебник для проф. учеб. заведений / С.А. Попов. – М.: Высшая школа; Издательский центр «Академия», 1999. – 383 с. – ISBN 5-06-003607-3 (Высшая школа); ISBN 5-7695-0366-8 (Изд. центр. «Академия»).
21. Резников, А.Н. Основы расчета тепловых процессов в технологических системах: учебное пособие / А.Н. Резников, Л.А. Резников; Тольят. политехн. ин-т. – Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1986. – 153 с.
22. Розенберг, А.М. Элементы теории процесса резания металлов / А.М. Розенберг, А.Н. Ерёмин. – М.- Свердловск: Машгиз, 1956. – 318 с.
23. Рыжкин, А.А. Обработка материалов резанием: учеб. пособие / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 411 с. – ISBN 978-5-222-14019-2.
24. Скуратов, Д.Л. Обработка металлов шлифованием и методы её интенсификации: учебное пособие / Д.Л. Скуратов, В.Н. Трусов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 1997. – 88 с. – ISBN 5-7883-0019-3.
25. Солоненко, В.Г. Резание металлов и режущие инструменты: учеб. пособие / В.Г. Солоненко, А.А. Рыжкин. – М.: Высшая школа, 2007. – 414 с. – ISBN 978-5-06-005349-4.
26. Феценко, В.Н. Токарная обработка: учебник / В.Н. Феценко, Р.Х. Махмутов. – М.: Высшая школа, Изд. Центр «Академия», 2000. – 303 с. – ISBN 5-06-003726-6 (Высшая школа); ISBN 5-7695-0467-6 (Изд. Центр «Академия»).
27. Филонов, И.П. Проектирование технологических процессов в машиностроении: учебное пособие / И.П. Филонов [и др.]; под общ. ред. И.П. Филонова. – Минск.: УП «Технопринт», 2003. – 910 с. – ISBN 985-464-385-9.
28. Фельдштейн, Е.Э. Режущий инструмент. Курсовое и дипломное проектирование: учеб. пособие / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич, В.И. Шагун. – Минск: Дизайн ПРО, 2002. – 320 с. – ISBN 985-452-052-8.
29. Якимов, А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
30. Якухин, В.Г. Изготовление резьбы: справочник / В.Г. Якухин, В.А. Ставров. – М.: Машиностроение, 1989. – 192 с. – ISBN 5-217-00426-6.
31. Яперицын, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Яперицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Минск: Новое знание, 2006. – 512 с. – ISBN 985-475-195-3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	5
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ.....	8
1.1. Общие положения.....	8
1.1.1. Основные понятия и определения процесса резания.....	8
1.1.2. Основные понятия о единой геометрии режущего инструмента.....	10
1.2. Точение.....	11
1.2.1. Конструкция и геометрия токарного резца.....	11
1.2.2. Влияние установки резца и кинематики процесса резания на углы резца.....	16
1.2.3. Влияние величин углов резца на процесс резания.....	21
1.2.4. Номинальное сечение среза.....	22
1.2.5. Остаточное сечение среза.....	23
1.2.6. Методы токарной обработки.....	25
1.2.7. Токарные резцы.....	26
Вопросы к разделу 1.....	29
2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	30
2.1. Требования, предъявляемые к инструментальным материалам.....	30
2.2. Инструментальные стали.....	32
2.2.1. Углеродистые и легированные инструментальные стали.....	32
2.2.2. Быстрорежущие стали.....	33
2.3. Твердые сплавы.....	37
2.3.1. Группы твердых сплавов.....	37
2.3.2. Пути совершенствования твердых сплавов.....	43
2.4. Режущая керамика.....	46
2.5. Сверхтвердые синтетические материалы.....	47
Вопросы к разделу 2.....	49
3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ.....	51
3.1. Физические явления, возникающие в процессе резания.....	51
3.2. Стружкообразование при резании материалов.....	52
3.2.1. Виды стружки и условия её образования.....	52
3.2.2. Механизм образования стружки при свободном прямоугольном резании.....	54
3.2.3. Деформация срезаемого слоя и стружки при свободном прямоугольном резании.....	56
3.3. Контактные явления и трение в зоне резания.....	63

3.3.1. Контактные явления в процессе стружкообразования.....	63
3.3.2. Трение на контактных площадках.....	64
3.3.3. Наростообразование при резании материалов.....	67
3.4. Силы и работа резания.....	71
3.4.1. Силы, действующие на инструмент при свободном прямоугольном резании.....	71
3.4.2. Силы резания при несвободном резании.....	73
3.4.3. Работа и мощность резания при точении.....	76
3.5. Тепловые явления при резании металлов.....	79
3.6. Влияние смазывающе-охлаждающих технологических средств на процесс резания.....	84
3.7. Износ инструмента.....	88
3.8. Стойкость инструмента.....	94
3.9. Формирование шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя деталей.....	100
3.9.1. Понятие качества поверхностей деталей машин.....	100
3.9.2. Механизм образования шероховатости поверхности.....	102
3.9.3. Остаточные деформации и напряжения в поверхностном слое.....	105
Вопросы к разделу 3.....	107
4. СВЕРЛЕНИЕ, ЗЕНКЕРОВАНИЕ И РАЗВЕРТЫВАНИЕ.....	109
4.1. Сверление.....	109
4.1.1. Геометрия спирального сверла.....	110
4.1.2. Элементы режима резания при сверлении.....	113
4.1.3. Силы резания при сверлении.....	114
4.1.4. Особенности износа сверл.....	116
4.1.5. Методы улучшения конструкции сверл.....	117
4.2. Зенкерование. Особенности конструкции зенкеров.....	120
4.3. Развертывание. Особенности конструкции разверток.....	122
Вопросы к разделу 4.....	125
5. ФРЕЗЕРОВАНИЕ.....	126
5.1. Цилиндрическое фрезерование.....	127
5.1.1. Общие положения. Геометрия цилиндрической фрезы.....	127
5.1.2. Элементы режима резания при цилиндрическом фрезеровании.....	129
5.1.3. Равномерное фрезерование цилиндрическими фрезами и условие его осуществления. Особенности процессов встречного и попутного фрезерования.....	133
5.1.4. Силы резания и мощность при цилиндрическом фрезеровании.....	136
5.2. Дисковое фрезерование.....	140

5.3. Фасонное фрезерование.....	142
5.4. Торцовое и концевое фрезерование.....	145
5.4.1. Общие положения.....	145
5.4.2. Элементы режима резания при торцовом и концевом фрезеровании.....	146
Вопросы к разделу 5.....	149
6. МЕТОДЫ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ.....	150
6.1. Общие сведения.....	150
6.2. Нарезание резьбы резцами и гребенками.....	151
6.3. Нарезание резьбы резьбонарезными головками и фрезами.....	155
6.4. Нарезание резьбы метчиками и плашками.....	156
Вопросы к разделу 6.....	161
7. АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ.....	162
7.1. Абразивные инструменты и их характеристика.....	162
7.2. Шлифование.....	171
7.3. Абразивно-ленточное шлифование.....	179
7.4. Хонингование.....	180
7.5. Суперфиниш.....	181
7.6. Доводка.....	182
7.7. Виброабразивная обработка.....	183
7.8. Струйно-абразивная обработка.....	183
7.9. Турбоабразивная обработка.....	184
7.10. Магнитно-абразивная обработка.....	185
Вопросы к разделу 7.....	187
Заключение.....	188
Библиографический список.....	190

Учебное издание

*Скуратов Дмитрий Леонидович,
Трусов Владимир Николаевич*

**ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.
ПРОЦЕССЫ РЕЗАНИЯ И РЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТЫ
Часть 1**

Учебное пособие

Редактор Ю.Н. Литвинова
Довёрстка А.В. Ярославцева

Подписано в печать 22.11.2012 г. Формат 60х84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 12,25.
Тираж 200 экз. Заказ . Арт. – Д1(11)/2012.

Самарский государственный аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.
Изд-во Самарского государственного аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.