

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

**А.В. Калайдо,  
Е.Я. Сердюкова**

# **РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ**

**Учебное пособие**

для студентов очной и заочной форм обучения по направлению  
подготовки 44.03.01 «Педагогическое образование. Технология»

  
**КНИГА**  
Луганск  
2021

УДК 531(075.8)  
ББК 22. 21 я73  
К59

**Рецензенты:**

- Витренко В.А.** – проректор по научной работе и инновационной деятельности ГОУ ВО ЛНР «ЛГУ имени Владимира Даля», доктор технических наук, профессор;
- Старченко В.Н.** – профессор кафедры технологий производства и профессионального образования государственного образовательного учреждения высшего образования «Луганский государственный педагогический университет», доктор технических наук, профессор;
- Зинченко В.О.** – профессор кафедры педагогики государственного образовательного учреждения высшего образования «Луганский государственный педагогический университет», доктор педагогических наук, доцент.

**Калайдо А.В., Сердюкова Е.Я.**

**К59 Резание материалов** : учебное пособие / А.В. Калайдо, Е.Я. Сердюкова; Государственное образовательное учреждение высшего образования Луганской Народной Республики «Луганский государственный педагогический университет». – Луганск : Книта, 2021. – 156 с.

Учебное пособие «Резание материалов» включает 14 разделов, предусмотренных рабочей программой дисциплины, и блок самостоятельной работы с примерами выполнения типовых расчетов. Каждый раздел содержит в полном объеме необходимые теоретические сведения, актуальные для будущей профессиональной деятельности учителя технологии.

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 44.03.01 «Педагогическое образование. Технология», также оно может быть использовано студентами инженерных направлений подготовки при изучении дисциплин, связанных с лезвийной обработкой материалов.

**УДК 531(075.8)**  
**ББК 22. 21 я73**

*Рекомендовано Учебно-методическим советом Луганского государственного педагогического университета  
в качестве учебно-методического пособия для студентов очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 44.03.01 «Педагогическое образование. Технология»  
(протокол № 6 от 10 февраля 2021 г.)*

© Калайдо А.В., Сердюкова Е.Я., 2021  
© ГОУ ВО ЛНР «ЛГПУ», 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список основных обозначений.....	5
Введение.....	6
ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	8
1.1 Задачи и структура дисциплины «Резание материалов».....	8
1.2 Общие определения теории резания.....	9
1.3 Конструктивные и геометрические параметры резцов.....	12
1.4 Изменение геометрии резца в кинематике.....	14
1.5 Параметры срезаемого слоя.....	16
Вопросы для самоконтроля.....	17
ТЕМА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ.....	18
2.1 Типы стружки и методы ее исследования.....	18
2.2 Образование сливной стружки.....	20
2.3 Образование текстуры стружки и нароста.....	23
2.4 Определение усадки стружки.....	24
Вопросы для самоконтроля.....	25
ТЕМА 3. ДИНАМИКА ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ.....	26
3.1 Основные понятия динамики резания.....	26
3.2 Расчет сил резания, моментов и мощности при точении.....	28
3.3 Расчет сил резания, моментов и мощности при сверлении.....	29
3.4 Расчет сил резания, моментов и мощности при фрезеровании.....	30
Вопросы для самоконтроля.....	31
ТЕМА 4. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ.....	32
4.1 Источники возникновения тепла при резании.....	32
4.2 Методы определения температуры резания.....	34
Вопросы для самоконтроля.....	37
ТЕМА 5. ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА.....	38
5.1 Виды и критерии износа инструмента.....	38
5.2 Физическая природа износа инструмента.....	40
5.3 Стойкость режущего инструмента.....	42
5.4 Факторы, влияющие на период стойкости режущего инструмента.....	44
5.5 Упрочнение (наклеп) в зоне резания.....	48
Вопросы для самоконтроля.....	49
ТЕМА 6. ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ.....	50
6.1 Характеристики качества поверхности детали.....	50
6.2 Влияние режима резания и параметров инструмента на качество обработки поверхности.....	51
6.3 Влияние условий обработки на физико-механические свойства поверхностного слоя детали.....	53
Вопросы для самоконтроля.....	54
ТЕМА 7. ОСОБЕННОСТИ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ.....	55
7.1 Технологическая скорость резания.....	55
7.2 Скорость резания при сверлении, зенкерования и развертывании.....	56
7.3 Скорость резания при фрезеровании.....	57
Вопросы для самоконтроля.....	57

ТЕМА 8. ПРОЦЕССЫ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ.....	65
8.1 Абразивный инструмент и абразивные материалы.....	58
8.2 Методы абразивной обработки.....	63
8.3 Физические явления при абразивной обработке.....	68
Вопросы для самоконтроля.....	71
ТЕМА 9 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	72
9.1 Требования к инструментальным материалам.....	72
9.2 Основные виды инструментальных материалов.....	73
Вопросы для самоконтроля.....	77
ТЕМА 10. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ. ТИПЫ, КОНСТРУКЦИИ И ВЫБОР.....	78
10.1 Назначение и основные типы сверл.....	78
10.2 Зенкеры и зенковки.....	82
10.3 Развертки.....	86
Вопросы для самоконтроля.....	88
ТЕМА 11. РЕЗЦЫ И ФРЕЗЫ. ИХ КОНСТРУКЦИЯ И ВЫБОР.....	89
11.1 Классификация резцов.....	89
11.2 Сменные многогранные пластины, их крепление.....	95
11.3 Общие сведения о фрезях.....	98
11.4 Цилиндрические и дисковые фрезы.....	101
11.5 Прорезные и отрезные фрезы.....	104
Вопросы для самоконтроля.....	107
ТЕМА 12. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЗЬБЫ.....	108
12.1 Резьбовые резцы и гребенки.....	108
12.2 Резьбонарезные фрезы.....	111
12.3 Метчики и плашки.....	113
12.4 Резьбонарезные головки.....	115
Вопросы для самоконтроля.....	116
ТЕМА 13. РЕЗАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ.....	117
13.1 Общие сведения о резании древесины.....	117
13.2 Элементы и геометрия резца по дереву.....	119
13.3 Свойства древесины, учитываемые при резании.....	120
13.4 Рабочие движения и геометрия стружки.....	122
13.5 Шероховатость поверхности древесины.....	124
Вопросы для самоконтроля.....	126
ТЕМА 14. ОСОБЕННОСТИ РЕЗАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	127
14.1 Резание полимерных материалов.....	127
14.2 Особенности резания композиционных материалов.....	131
Вопросы для самоконтроля.....	135
Самостоятельная работа студентов по дисциплине «Резание материалов»...	136
1. Рекомендации к выполнению заданий самостоятельной работы.....	136
2. Примеры выполнения заданий самостоятельной работы.....	137
3. Задания к самостоятельной работе студентов.....	147
Вопросы для подготовки к зачету по дисциплине «Резание материалов»....	151
Заключение.....	153
Список использованной и рекомендованной литературы.....	154

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

<p><math>A_\alpha</math> – главная задняя поверхность;</p> <p><math>A'_\alpha</math> – вспомогательная задняя поверхность;</p> <p><math>A_\gamma</math> – передняя поверхность;</p> <p><math>a</math> – толщина срезаемого слоя, мм;</p> <p><math>b</math> – ширина срезаемого слоя, мм;</p> <p><math>D, d</math> – диаметр детали, сверла, мм;</p> <p><math>D_r</math> – главное движение, м/мин;</p> <p><math>D_s</math> – движение подачи, м/мин;</p> <p><math>f_n</math> – номинальная площадь среза, мм<sup>2</sup>;</p> <p><math>f_d</math> – действительная площадь среза, мм<sup>2</sup>;</p> <p><math>H</math> – степень наклепа;</p> <p><math>J</math> – удельный износ, мм/м;</p> <p><math>K</math> – главная режущая кромка;</p> <p><math>K_p</math> – поправочный коэффициент;</p> <p><math>L</math> – ширина стружки, детали, мм;</p> <p><math>M_{изг}</math> – изгибающий момент, Н·м;</p> <p><math>N</math> – мощность резания, Вт;</p> <p><math>n</math> – частота вращения, об/мин;</p> <p><math>P_H</math> – главная секущая плоскость;</p> <p><math>P_n</math> – плоскость резания;</p> <p><math>P_v</math> – основная плоскость;</p> <p><math>P_x</math> – осевая сила, Н;</p> <p><math>P_y</math> – радиальная сила, Н;</p> <p><math>P_z</math> – тангенциальная сила, Н;</p> <p><math>Q</math> – теплота, выделяющаяся при резании, Дж;</p> <p><math>q</math> – отведенная теплота, Дж;</p> <p><math>R_z</math> – высота неровностей, мкм;</p> <p><math>r</math> – радиус при вершине, мм;</p> <p><math>S_o</math> – подача на оборот, мм/об;</p> <p><math>S_{мин}</math> – минутная подача, мм/мин;</p> <p><math>S_z</math> – подача на зуб, мм/зуб;</p> <p><math>T</math> – период стойкости, час;</p> <p><math>t</math> – глубина резания, мм;</p> <p><math>u</math> – скорость подачи, м/мин;</p> <p><math>v</math> – скорость резания, м/мин;</p> <p><math>z</math> – число режущих кромок;</p>	<p><math>\alpha</math> – главный задний угол;</p> <p><math>\alpha'</math> – вспомогательный задний угол;</p> <p><math>\beta</math> – главный угол заострения;</p> <p><math>\beta_1</math> – угол сдвига;</p> <p><math>\gamma</math> – главный передний угол;</p> <p><math>\Delta</math> – допуск на перетачивание, мм;</p> <p><math>\delta</math> – главный угол резания;</p> <p><math>\delta'</math> – вспомогательный угол резания;</p> <p><math>\varepsilon</math> – угол при вершине;</p> <p><math>\eta</math> – угол остроты зуба;</p> <p><math>\theta</math> – температура резания, °С;</p> <p><math>\lambda</math> – угол наклона режущей кромки сверла;</p> <p><math>\sigma</math> – нормальное напряжение, МПа;</p> <p><math>\tau_{сд}</math> – напряжение сдвига, МПа;</p> <p><math>\varphi</math> – главный угол в плане;</p> <p><math>\varphi_1</math> – вспомогательный угол в плане;</p> <p><math>\omega</math> – угол трения.</p>
---	--

## ВВЕДЕНИЕ

Многие технологические процессы современного производства связаны с изменением формы материалов в процессе изготовления из них деталей машин и механизмов различного назначения. В настоящее по-прежнему широко используются методы обработки резанием, такие как точение, сверление, фрезерование, строгание и т.д. Несмотря на разнообразие данных методов, в их основе лежат общие закономерности процессов образования стружки и износа режущего инструмента.

Обработка материалов резанием играет важную роль в структуре подготовки студентов по направлению 44.03.01 «Педагогическое образование. Технология». Будущие учителя технологии должны иметь представление о рациональной механической обработке заготовок деталей машин, ориентироваться в технологическом универсальном оборудовании и оборудовании с числовым программным управлением, владеть навыками обработки резанием металлов, древесины и полимерных материалов. Подготовка высококвалифицированных учителей технологии, способных качественно решать задачи эксплуатации и ремонта станочного оборудования в условиях школьных мастерских, реализуется посредством изучения дисциплины «Резание материалов».

Учебная дисциплина «Резание материалов» изучает основные понятия и определения теории резания материалов различной природы, рассматривает физическую сущность процесса стружкообразования и сопровождающих его явлений, а также крайне актуальные вопросы износа и стойкости режущего инструмента. Знание основ теории резания материалов необходимо для понимания принципов работы металлорежущего оборудования, широко используемого на уроках технологии в общей школе.

Учебная дисциплина «Резание материалов» относится к блоку дисциплин профессиональной подготовки, изучая основные положения теории резания, физические и химические закономерности процессов, происходящих при обработке резанием, основы эксплуатации, обслуживания и ремонта станков и режущих инструментов, находящих достаточно широкое применение при изучении технологии в общей школе. По завершении ее изучения студенты должны:

- **знать** основные виды обработки резанием; обрабатываемые станки и их классификацию; виды и материалы обрабатываемого инструмента; установку инструмента и способы его наладки; правила выполнения операций обработки; технологию изготовления изделий из металла; правила безопасности при обработке металла ручным инструментом и на станках; основные сведения о графическом изображении операций обработки;

- **уметь** определять материалы по внешним признакам; готовить инструмент к работе, выполнять ним обработку материалов; выполнять операции по подготовке станочного оборудования к работе; разрабатывать технологию и изготавливать изделия;

– **владеть:** навыками работы со станочным оборудованием; навыками проектно-технологической деятельности; безопасными приемами обработки древесины и формообразования металлов; навыками использования измерительного инструмента.

Рабочей программой учебной дисциплины «Резание материалов» для направления подготовки 44.03.01 «Педагогическое образование. Технология» предусмотрены лекционные занятия и лабораторные работы, а также самостоятельное изучение материала студентами. Распределение учебной нагрузки по видам работ представлено в таблице.

Вид учебной работы	Объем часов (зач. ед.)	
	Очная форма	Заочная форма
<b>Общая учебная нагрузка (всего)</b>	<b>108</b> (3 зач. ед)	<b>108</b> (3 зач. ед)
<b>Обязательная аудиторная учебная нагрузка (всего), в том числе:</b>	<b>42</b>	<b>12</b>
Лекции	18	4
Семинарские занятия	-	-
Практические занятия	-	-
Лабораторные работы	24	8
Контрольные работы	-	-
Курсовая работа / курсовой проект	-	-
Другие формы организации учебного процесса	-	-
<b>Самостоятельная работа студента (всего)</b>	<b>66</b>	<b>96</b>
<b>Форма аттестации</b>	зачет	зачет

Учебное пособие «Резание материалов» включает 14 тем, предусмотренных рабочей программой дисциплины, каждая из которых содержит обширный теоретический материал, необходимый учителю технологии в будущей профессиональной деятельности. Значительное внимание уделено авторами учебного пособия организации самостоятельной работы, которая традиционно является наиболее сложной для студентов формой освоения материала. Приведенные в пособии вопросы для самоконтроля и для подготовки к зачету позволяют студентом ориентироваться на наиболее значимые аспекты курса, а также осуществлять подготовку к точке контроля по мере изучения теоретического материала.

Учебное пособие «Резание материалов» предназначено для студентов направления подготовки 44.03.01 «Педагогическое образование. Технология», также оно может быть использовано студентами инженерных направлений подготовки при изучении дисциплин, связанных с лезвийной обработкой материалов. Настоящее пособие является результатом преподавательской деятельности авторов на кафедре технологий производства и профессионального образования Государственного образовательного учреждения высшего образования Луганской Народной Республики «Луганский государственный педагогический университет».

## ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

### 1.1 Задачи и структура дисциплины «Резание материалов»

«*Резание материалов*» – учебная дисциплина, изучающая совокупность взаимосвязанных между собой физических процессов и явлений, одновременно протекающих на контактных участках режущего инструмента и заготовки.

*Резание материалов* – это операция удаления слоя материала с заготовки с помощью режущего инструмента, в основе режущей части которого лежит режущий клин.

*Режущий инструмент* – инструмент для формирования новых поверхностей отделением поверхностных слоев материала с образованием стружки.

Основные прикладные задачи в сфере резания материалов:

- повышение точности и качества обработки;
- освоение обработки новых конструкционных материалов, в том числе высокопрочных, жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов;
- поиск новых износо- и теплостойких инструментальных материалов;
- совершенствование конструкции режущих инструментов;
- совершенствование способов дробления и завивки стружки (для автоматических линий);
- поиск новых составов охлаждающих жидкостей и способов их подведения в зону резания;
- повышение производительности процесса лезвийной обработки.

Место механической обработки в структуре процесса изготовления детали представлено на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Структура трудоемкости процесса изготовления детали

Как видно из рис. 1.1, обработка металлов резанием занимает 50% рабочего времени. В последнее время наблюдается тенденция снижения трудоемкости обработки резанием за счет совершенствования заготовительных

операций. Все шире применяются литье по выплавляемым моделям, порошковая металлургия, холодная высадка и другие заготовительные операции, обеспечивающие получение минимальных припусков на механическую обработку. Однако, в силу больших преимуществ (высокая точность, производительность, качество обработанной поверхности и т.п.), обработка резанием еще на долгие годы останется основным методом получения готовых деталей.

Структура учебного курса «Резание материалов», который является частью подготовки бакалавров направления 44.03.01 «Педагогическое образование. Технология», показана на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Структура учебного курса «Резание материалов»

## 1.2 Общие определения теории резания

Для возможности удаления срезаемого слоя с заготовки и образования обработанной поверхности детали инструмент и деталь должны осуществлять относительные перемещения друг относительно друга. Слой металла, удаляемого с заготовки с целью придания ей формы и размеров готовой детали, называется припуском (рис. 1.3). В процессе резания припуск превращается в стружку.

Припуск может сниматься как за один, так и за несколько проходов режущего клина. В процессе срезания припуска на детали различают характерные поверхности: обрабатываемую, обработанную и поверхность резания (рис. 1.3).

*Обрабатываемой поверхностью* называют поверхность заготовки детали, которая исчезает в результате снятия припуска. *Обработанной поверхностью* называют поверхность, образовавшуюся на детали после снятия припуска.

*Поверхностью резания* называют поверхность, непосредственно образуемую лезвиями инструмента в процессе резания. Эта поверхность является переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями, она существует только во время обработки материала и исчезает по ее окончании. Поверхность резания с геометрической точки зрения образована совокупностью траекторий относительного рабочего движения инструмента.

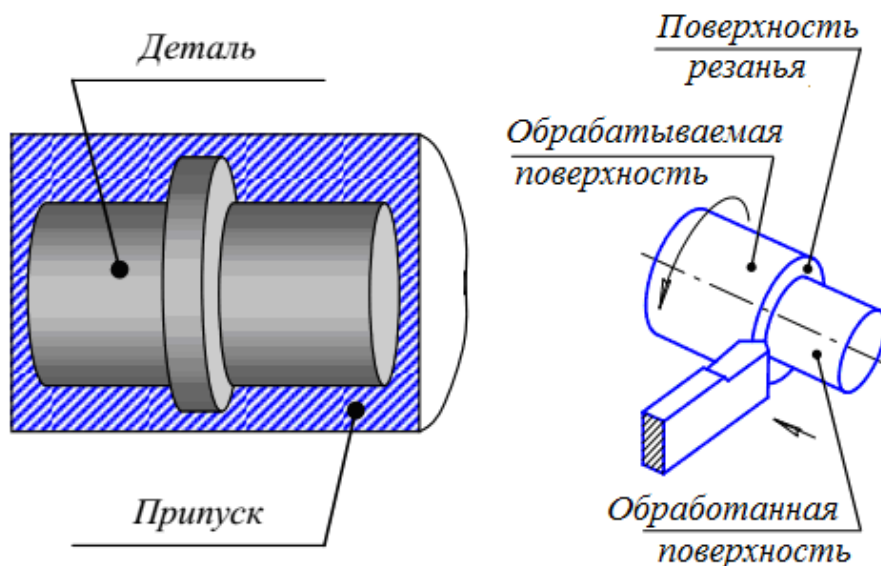


Рисунок 1.3 – Основные понятия теории резанья

Процесс резания выполняется при наличии основных и вспомогательных движений. Основные движения, совершаемые заготовкой и режущим инструментом, делятся на:

- главное движение  $D_r$  – движение заготовки или инструмента, которое осуществляется с максимальной скоростью;
- движение подачи  $D_s$  – обеспечивает врезание режущего клина инструмента в новые слои металла и имеет меньшую скорость  $S$ .

По характеру  $D_r$  и  $D_s$  могут быть вращательными или прямолинейно-поступательными. При различных методах обработки главное движение и движение подачи осуществляются или обрабатываемой заготовкой или режущим инструментом. Например, при точении  $D_r$  осуществляется заготовкой, а  $D_s$  – режущим инструментом (резцом), при цилиндрическом фрезеровании – наоборот, а при сверлении возможно, что оба движения осуществляет режущий инструмент (сверло), а заготовка неподвижна.

Процесс резания ведется в определенном режиме, элементами которого являются скорость резания  $v$ , подача  $S$  и глубина резания  $t$ , причем скорость резания является скоростью главного движения.

**Скорость резания**  $v$ , м/мин – путь, пройденный точкой обрабатываемой поверхности заготовки или режущей кромки инструмента в направлении главного движения за единицу времени. В случае вращательного характера главного движения

$$v = \frac{\pi D n}{1000}, \quad (1.1)$$

где  $D$  – диаметр заготовки (при точении) или инструмента (при фрезеровании, сверлении и т.д.), мм;  $n$  – число оборотов шпинделя станка, об/мин.

**Подача  $S$**  – это скорость движения подачи. Различают подачу на оборот  $S_o$ , минутную подачу  $S_{мин}$  и подачу на зуб  $S_z$ . Подача на оборот ( $S_o$ , мм/об) определяется как путь, пройденный точкой режущей кромки инструмента (или поверхности резания заготовки) в направлении движения подачи за один оборот шпинделя; минутная подача ( $S_{мин}$ , мм/мин) – путь, пройденный точкой режущей кромки инструмента (или поверхности резания заготовки) в направлении движения подачи за одну минуту.

**Глубина резания  $t$** , мм – это расстояние между обработанной и обрабатываемой поверхностями заготовки. При различных методах обработки металлов резанием глубину резания рассчитывают исходя из его определения и схем:

– при точении глубина резания равна половине разницы диаметров обрабатываемой  $D$  и обработанной  $d$  поверхностей заготовки (рис. 1.4, а);

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

– при сверлении глубина резания равна половине диаметра  $D$  сверла (рис. 1.4, б)

$$t = \frac{D}{2};$$

– при зенкерования глубина резания определяется как половина разницы диаметров зенкера  $D$  и предварительно подготовленного отверстия  $d$  (рис. 1.4, в).

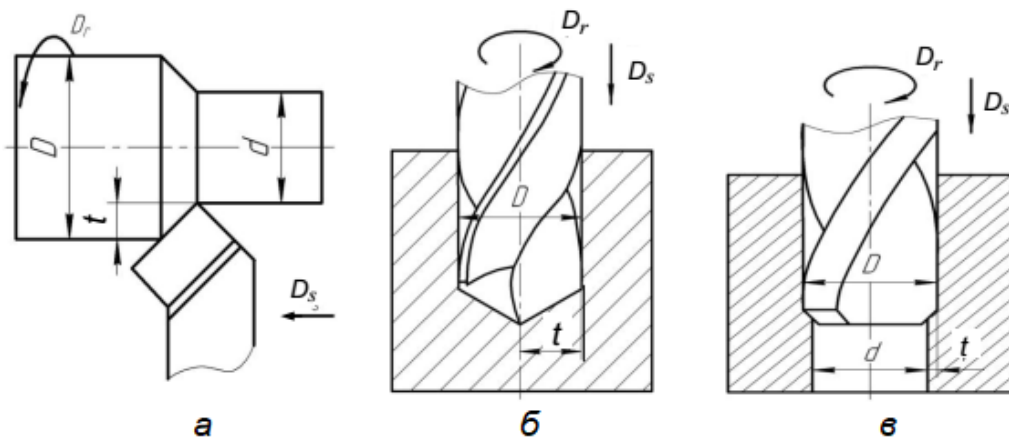


Рисунок 1.4 – К определению глубины резания

В зависимости от участия в резании главной или главной и вспомогательной режущих кромок различают свободное и несвободное резанье (рис. 1.5). При свободном резании в работе участвует только главная режущая кромка, а при несвободном – главная и вспомогательная режущие кромки. Большее количество режущих инструментов работает в условиях несвободного

резания, при этом имеет место большая напряженность процесса резания, возникают значительные силы резания и т.д.

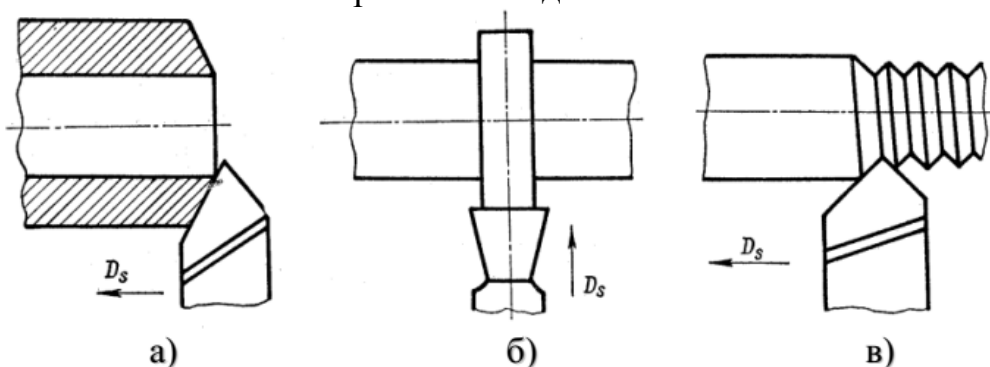


Рисунок 1.5 – Свободное (а и б) и несвободное (в) резание

Кроме того, в зависимости от расположения главной режущей кромки (ГРК) по отношению к направлению главного движения  $D_r$ , различают прямоугольное (ГРК перпендикулярна к  $D_r$ ) и косоугольное резание.

### 1.3 Конструктивные и геометрические параметры резцов

Для осуществления процесса резания режущий инструмент должен иметь определенную форму и расположение рабочих поверхностей. От рационального выбора формы и геометрии режущего инструмента зависят все характеристики процесса резания и качество обработанных поверхностей деталей. Конструктивными элементами головки резца являются (рис. 1.6, а):

- передняя поверхность  $A_\gamma$  – поверхность, по которой сходит стружка;
- главная задняя поверхность  $A_\alpha$  – поверхность, направленная к обрабатываемой поверхности заготовки;
- вспомогательная задняя поверхность  $A_{\alpha'}$  – поверхность, направленная к обрабатываемой заготовки;
- главная режущая кромка  $K$  – линия пересечения передней поверхности и главной задней поверхности;
- вспомогательная режущая кромка  $K'$  – линия пересечения передней поверхности и вспомогательной задней поверхности;
- вершина – точка соприкосновения режущих кромок.

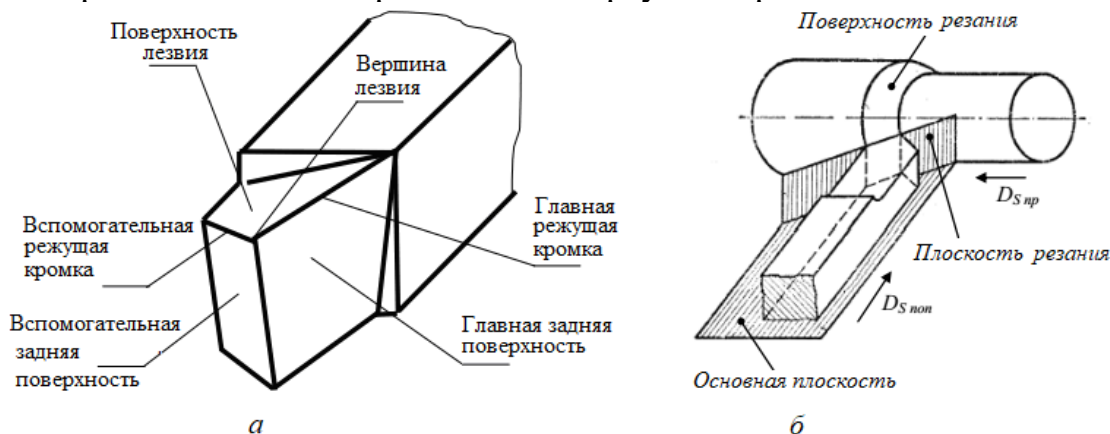


Рисунок 1.6 – Конструктивные характеристики: а – геометрические параметры резцов; а – координатные плоскости

Для определения геометрии резца рассматривают две координатные и две секущие плоскости. Координатными плоскостями являются (рис. 1.6, б):

- *основная плоскость*  $P_v$  – плоскость, параллельная продольной и поперечной подачам, которая совпадает с опорной гранью резца;

- *плоскость резания*  $P_n$  – плоскость, касательная к поверхности резания заготовки, проходящей через режущую кромку резца перпендикулярно к основной плоскости.

К касательным плоскостям относятся:

- *главная секущая плоскость*  $P_H$  – плоскость, перпендикулярная главной режущей кромке  $K$  резца;

- *вспомогательная секущая плоскость*  $P'_H$  – плоскость, перпендикулярная вспомогательной режущей кромке  $K'$  резца.

*Геометрия режущей части резца* – это совокупность углов, определяющих положение передней и задней поверхностей головки резца относительно координатных плоскостей. Геометрию резца рассматривают в главной и вспомогательной секущих плоскостях и в плане.

*Главные углы* резца (рис. 1.7, а) рассматривают в главной секущей плоскости  $P_H$ . К ним относятся:

- *главный передний угол*  $\gamma$  – угол между передней поверхностью резца  $A_\gamma$  и перпендикуляром к плоскости резания  $P_n$ ;

- *главный задний угол*  $\alpha$  – угол между плоскостью резания и главной задней поверхностью  $A_\alpha$  резца;

- *главный угол заострения*  $\beta$  – угол между передней и главной задней поверхностями резца;

- *главный угол резания*  $\delta$  – угол между плоскостью резания и передней поверхностью резца.

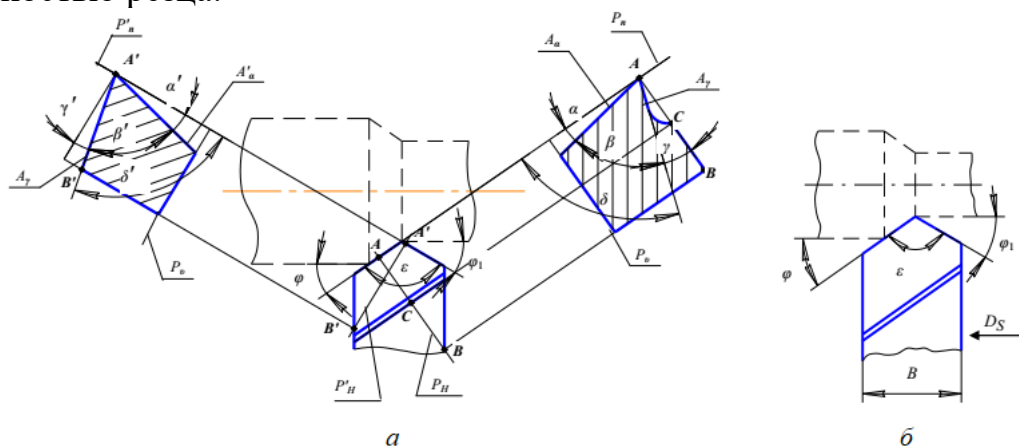


Рисунок 1.7 – Углы резца: а – главные и вспомогательные; б – в плане

*Вспомогательные углы* резца рассматривают в вспомогательной секущей плоскости  $P'_H$ . Различают:

- *вспомогательный передний угол*  $\gamma'$  – угол, образованный передней поверхностью резца и перпендикуляром к вспомогательной плоскости резания  $P'_n$ ;

- вспомогательный задний угол  $\alpha'$  – угол между вспомогательной плоскостью резания и вспомогательной задней поверхностью  $A'_\alpha$  резца;
- вспомогательный угол заострения  $\beta'$  – угол между передней и вспомогательной задней поверхностями резца;
- вспомогательный угол резания  $\delta'$  – угол между вспомогательной плоскостью резания и передней поверхностью резца.

В плане различают (рис. 1.7, б):

- главный угол в плане  $\varphi$  – угол между направлением подачи  $D_S$  и проекцией главной режущей кромки на основную плоскость;
- вспомогательный угол в плане  $\varphi_1$  – угол между направлением подачи и проекцией вспомогательной режущей кромки на основную плоскость;
- угол при вершине  $\varepsilon$  – угол между проекциями главной и вспомогательной режущих кромок на основную плоскость.

Назначение геометрических параметров инструмента:

– главный задний угол  $\alpha$  предназначен для уменьшения сил трения задней поверхности инструмента о поверхность резания (чем больше  $\alpha$ , тем меньше трение). Обычно  $\alpha = 6\text{--}12^\circ$ , большие значения берутся при обработке вязких материалов, способных к упругому восстановлению;

– главный передний угол  $\gamma$  влияет на условия образования стружки и степень пластической деформации срезаемого слоя, он может принимать значения от  $-10^\circ$  до  $+20^\circ$ . Для вязких материалов угол  $\gamma$  берется ближе к  $20^\circ$ , а отрицательный угол применяют при обработке твердых сплавов;

– главный угол в плане  $\varphi$  влияет на шероховатость обработанной поверхности, а также на силы, действующие на заготовку со стороны резца. При жесткой системе пытаются работать с меньшими углами  $\varphi = 30\text{--}40^\circ$ , при обработке нежестких деталей принимают  $\varphi \approx 90^\circ$ ;

– вспомогательный передний угол  $\gamma'$  влияет на шероховатость обработанной поверхности, при его уменьшении шероховатость уменьшается. Обычно  $\gamma' = 10\text{--}15^\circ$ ;

– угол наклона главной режущей кромки  $\alpha$  влияет на направление схода стружки, а также увеличивает прочность режущего клина. Отрицательные углы нельзя применять при обработке прерывистых поверхностей, при  $\alpha > 0$  стружка сходит в направлении обработанной поверхности детали, что используют при обработке материалов, имеющих литейную корку.

Радиус при вершине резца служит для укрепления вершины резца и для снижения класса шероховатости обработанной поверхности:  $r = 1\text{--}5$  мм – для быстрорежущих резцов и  $r = 0,2\text{--}3$  мм – для твердосплавного инструмента.

#### 1.4 Изменение геометрии резца в кинематике

Передний и задний углы сохраняют свои заточенные (статические) значения  $\alpha_{ст}$  и  $\gamma_{ст}$  при правильной установке резца на станке, когда его вершина находится на уровне оси центров станка (рис. 1.8). Расположение вершины резца не на уровне оси центров станка вызывает изменение статических значений данных углов.

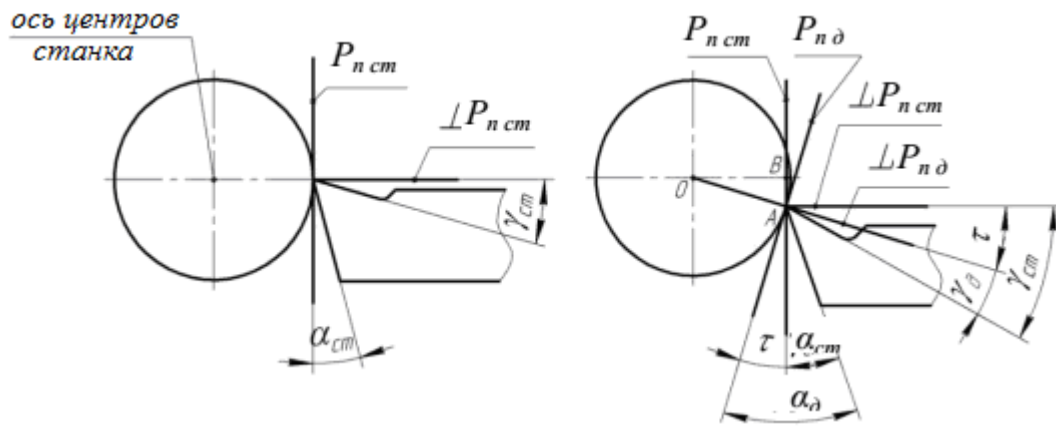


Рисунок 1.8 – Изменение геометрии резца в кинематике

Если вершина резца расположена ниже оси центров, то действительное значение заднего угла  $\alpha_\delta$  увеличивается, а истинное значение заднего угла  $\gamma_\delta$  уменьшается на величину угла  $\tau$ :

$$\alpha_\delta = \alpha_{cm} + \tau, \quad \gamma_\delta = \gamma_{cm} + \tau.$$

Если же вершина резца расположена выше оси центров, то действительное значение заднего угла  $\alpha_\delta$  уменьшается, а истинное значение переднего угла  $\gamma_\delta$  увеличивается на величину угла  $\tau$ .

Угол  $\tau$  можно определить, рассмотрев треугольник  $AOB$ , в котором катет  $AB$  является величиной смещения  $h$ , а гипотенуза  $OA$  составляет половину диаметра обработанной поверхности

$$\sin \tau = \frac{2h}{d}.$$

Величины заточенных (статических) углов в плане  $\varphi_{cm}$  и  $\varphi_{lcm}$  сохраняются, если резец установлен перпендикулярно оси центров станка и не сохраняются, если  $\rho \neq 90^\circ$  (рис. 1.9, а):

– если  $\rho > 90^\circ$ , то главный действительный угол в плане  $\varphi_\delta$  становится больше, а вспомогательный действительный угол в плане  $\varphi_{1\delta}$  становится меньше на величину угла  $\theta$  (рис. 1.9, б);

– если  $\rho < 90^\circ$ , то главный действительный угол в плане  $\varphi_\delta$  становится меньше, а вспомогательный действительный угол в плане  $\varphi_{1\delta}$  становится больше на величину угла  $\theta$  (рис. 1.9, в).

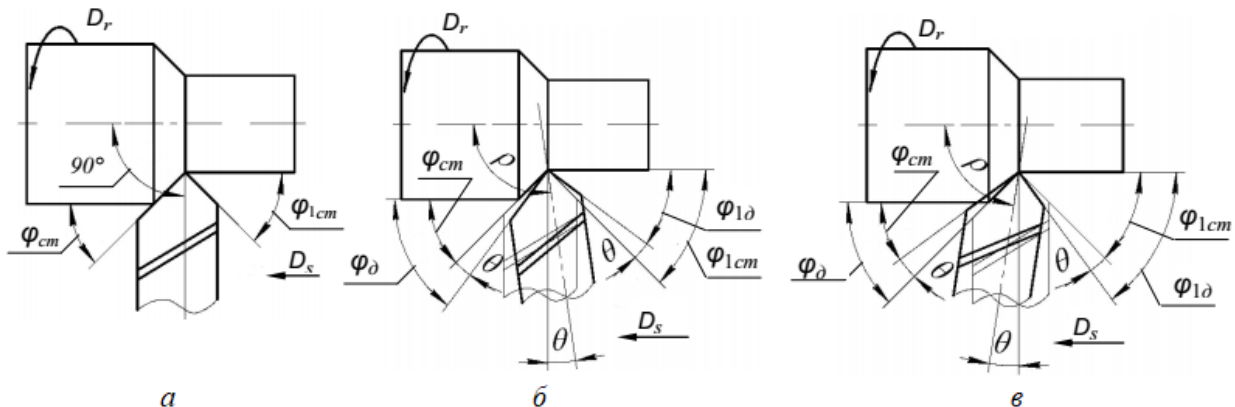


Рисунок 1.9 – Зависимость геометрии резца от его установки на станке

## 1.5 Параметры срезаемого слоя

Сечение срезаемого слоя  $ABCD$  образуется при пересечении отделяемой стружки плоскостью, параллельной основной плоскости (рис. 1.10).

Толщина срезаемого слоя ( $a = ND$ ) – расстояние между двумя последовательными положениями поверхности резания заготовки, измеренная по перпендикуляру. Величина  $a$  зависит от величины подачи ( $S_0$  или  $S_z$ ) и главного угла в плане  $\varphi$ .

Ширина срезаемого слоя ( $b = AB$ ) – расстояние между обработанной и обрабатываемой поверхностями заготовки, измеренное по поверхности резания. Ширина срезаемого слоя практически равна активной части режущей кромки инструмента. Величина  $b$  зависит от глубины резания  $t$  и главного угла в плане  $\varphi$ .

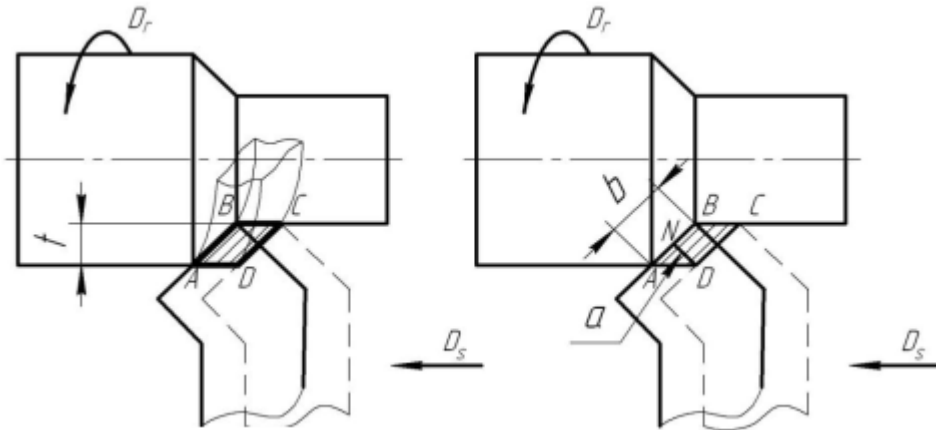


Рисунок 1.10 – Параметры срезаемого слоя

В случае точения (рис. 1.11, а)

$$a = S_0 \cdot \sin \varphi, \quad b = \frac{t}{\sin \varphi};$$

при сверлении (рис. 1.11, б)

$$a = S_z \cdot \sin \varphi, \quad b = \frac{t}{\sin \varphi};$$

а при цилиндрическом фрезеровании (рис. 1.11, в)

$$\varphi = \arccos\left(1 - \frac{2t}{D}\right), \quad a_{\max} = S_z \cdot \sin \varphi.$$

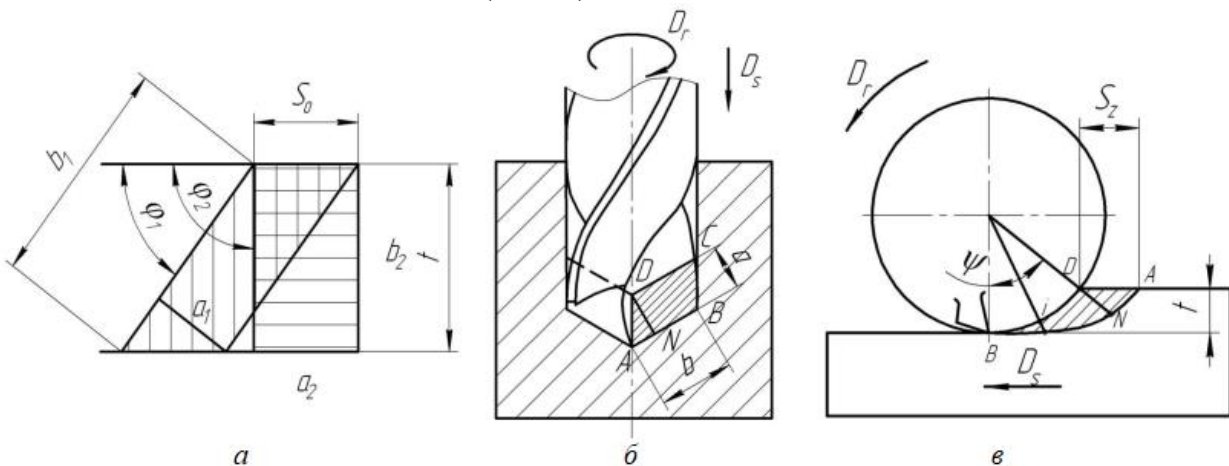


Рисунок 1.11 – К определению параметров  $a$  и  $b$

Различают следующие площади сечения срезаемого слоя (рис. 1.12):

– номинальная (теоретическая) площадь среза  $f_n$  равна площади параллелограмма  $ABCD$

$$f_n = S_v \cdot t = a \cdot b;$$

– действительная площадь среза  $f_d$  меньше номинальной, так как гребешок поверхности  $BCK$  остается на обработанной поверхности и площадь остаточного сечения вычитается из номинальной

$$f_d = f_n - f_{зал};$$

– площадь остаточного сечения равна площади треугольника  $BCK$ , высота которого является теоретической высотой гребешка шероховатости  $h_T$ . Из рассмотрения треугольников  $BCK$  и  $CMK$  следует

$$h_T = \frac{S_0}{ctg\varphi + ctg\varphi_1}, \quad f_{зал} = \frac{S_0^2}{2(ctg\varphi + ctg\varphi_1)}.$$

Фактическая площадь сечения срезаемого слоя определяется как разница номинальной и остаточной площадей.

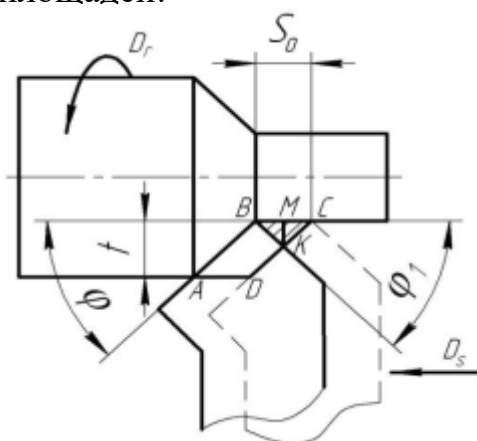


Рисунок 1.12 – Характеристики срезаемого слоя

### Вопросы для самоконтроля

1. Что называется процессом резания, какие его виды существуют?
2. Какие движения совершают резец и заготовка при обработке материалов резанием?
3. Какие поверхности принято выделять при изучении резания материалов?
4. Назовите основные характеристики процесса резания.
5. Назовите основные конструктивные и геометрические характеристики процесса резания.
6. Какие материалы могут обрабатываться резанием?

## ТЕМА 2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

### 2.1 Типы стружки и методы ее исследования

*Резанием* называется обработка материала, которая заключается в образовании новых поверхностей путем механического или любого другого влияния и дальнейшего отделения части материала (стружки). Обработка резанием является по форме простой, так как для ее осуществления необходимы три основных компонента (рис. 3.1): режущий инструмент, заготовка и их относительное движение, а по содержанию – сложной, поскольку она зависит от большого количества величин, называемых параметрами резания.

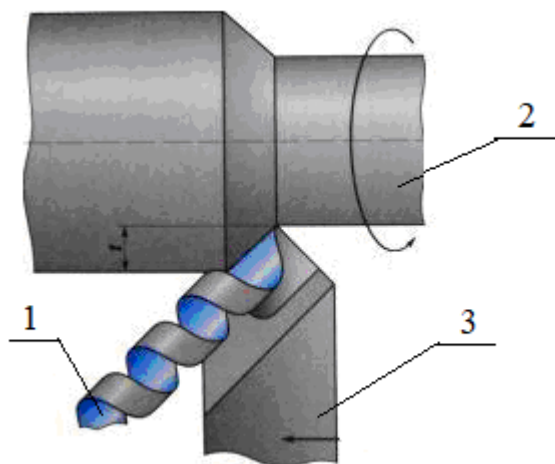


Рисунок 2.1 – Схема процесса резания:

1 – стружка; 2 – заготовка; 3 – резец

Режущий инструмент выполняет две функции:

- формообразования поверхности детали – главная функция;
- преобразование срезаемого припуска в стружку и удаления его из зоны резания.

Для исследования процесса резания необходимо рассмотреть процессы, происходящие на передней и задней поверхностях инструмента. При изучении процесса стружкообразования применяют следующие экспериментальные методы:

1. *Визуальный* – наблюдения процесса деформации срезаемого слоя.

2. *Метод скоростной киносъемки* – выполняется киносъемка с частотой до 10 000 кадров в секунду боковой стороны обрабатываемой детали. Высокая скорость съемки позволяет выяснить особенности процесса образования стружки при скоростях резания, используемых в производстве.

3. *Метод делительной сетки* заключается в том, что на боковой стороне наносят сетку с размерами в пределах 0,05...0,15 мм. Для получения неискаженной зоны деформации используют приспособления для мгновенной остановки процесса резания. Используя аппарат математической теории пластичности, по размерам деформированной решетки сетки определяют размеры и форму зоны деформации, интенсивность деформации и т.п.

4. *Поляризационно-оптический метод* – используется только для прозрачных образцов. В процессе резания наблюдается интерференционная картина упругих деформаций, по которой судят о деформации в зоне резания. Главным недостатком метода является то, что его нельзя использовать для металлов.

5. *Рентгеноструктурный* – метод исследования дифракции рентгеновских лучей на материале обрабатываемой детали.

6. *Метод измерения микротвердости корня стружки* – существует тесная связь между степенью пластической деформации и твердостью деформированного материала, поэтому измерение микротвердости корня стружки позволяет определить интенсивность деформаций в зоне контакта.

При обработке резанием в различных условиях (геометрия инструмента, режим и т.д.) в результате сильных деформаций среза образуются различные виды стружек. Все их можно свести к 4 типам согласно классификации И.А.Тиме (рис. 2.2).

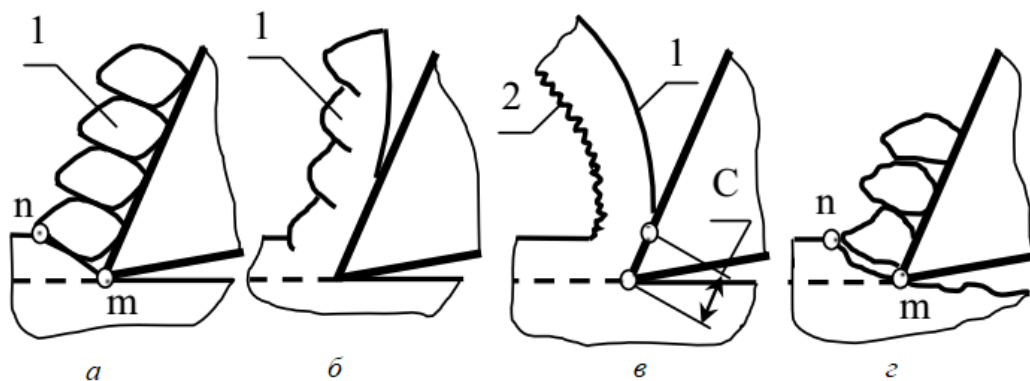


Рисунок 2.2 – Типы стружек, образующихся при резании материалов: а – элементная; б – суставчатая; в – сливная; г – скалывания

*Элементная стружка* состоит из отдельных сильно деформированных, слабо связанных между собой элементов примерно одинаковой геометрической формы и размеров (рис. 2.3). Она образуется при обработке твердых материалов на низких скоростях резания, при малых передних углах и больших

толщинах срезаемого слоя. Резание осуществляется неравномерно, в его процессе образуются вибрации, ухудшающие чистоту обработки поверхности. Длина контакта стружки с передней поверхностью небольшая, поэтому на передней поверхности вблизи главного лезвия концентрируются большие удельные нагрузки, требующие применения высокопрочных материалов. Износ инструмента происходит только по передней поверхности.

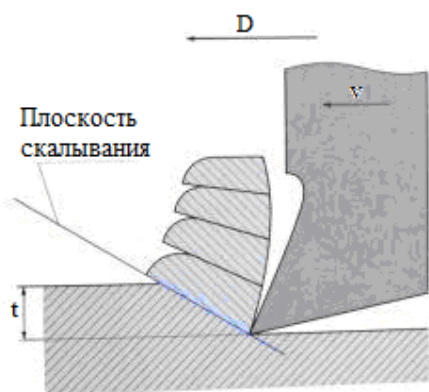


Рисунок 2.3 – Элементная стружка

Сливную и суставчатую стружки называют стружкой сдвига, так как их образование связано с напряжением сдвига.

*Суставчатая стружка* (рис. 2.4, а) получается при обработке сталей средней твердости на средних скоростях и является переходной от элементной стружки к сливной. Поверхность скалывания только наметилась, но она не пронизывает стружку по всей толщине, поэтому стружка состоит как бы из отдельных суставов без нарушения связи между ними.

*Сливная стружка* (рис. 2.4, б) представляет бесконечную ленту, состоящую из отдельных элементов в форме трапеции, которые деформированы по плоскости сдвига, внутри же элемент деформирован меньше. Контактная сторона стружки очень гладкая, а наружная имеет бархатный вид. Такая стружка имеет большую длину контакта с передней поверхностью резца, сходит по передней поверхности с большей скоростью и изнашивает ее наиболее интенсивно в месте максимального давления (в виде лунки). Изнашивается и задняя поверхность, но значительно меньше. Нагрузка на резец достаточно плавная, такая стружка наиболее опасна для работающих.

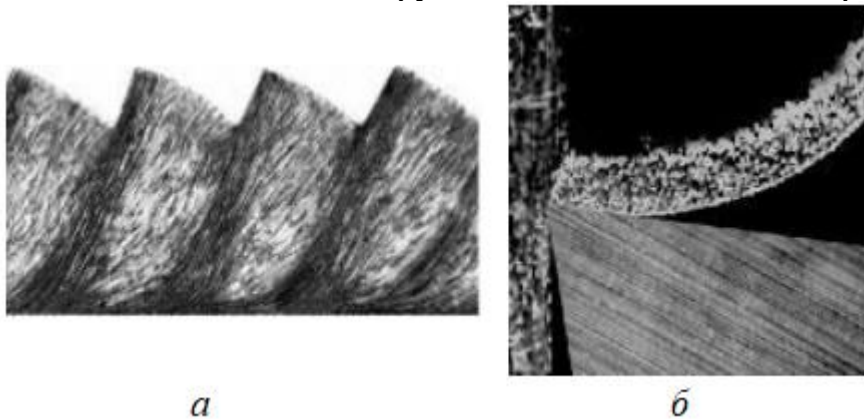


Рисунок 2.4 – Стружка сдвига: а – суставчатая; б – сливная

*Стружка скалывания* образуется при резании хрупких материалов (чугун, бронза), она состоит из отдельных частиц различной формы и материалов. Поскольку площадь контакта небольшая, то удельные нагрузки максимальны, из-за чего в качестве инструмента следует применять прочный твердый сплав. Процесс стружкообразования происходит за счет упругих деформаций, а большая шероховатость является результатом выкрашивания.

Тип стружки во многом зависит от рода и механических свойств обрабатываемого материала. При резании пластических материалов возможно образование первых трех видов стружки. При увеличении жесткости и прочности сливная стружка переходит в суставчатую, а затем – в элементную. При обработке хрупких материалов образуется или элементная стружка, или стружка скалывания.

Из геометрических параметров на тип стружки наиболее сильно влияет передний угол и угол наклона режущей кромки. При обработке пластичных материалов с увеличением  $\gamma$  и  $\lambda$  элементная стружка переходит в суставчатую, а затем – в сливную. При увеличении угла  $\lambda$  стружка превращается в сливную. Увеличение подачи приводит при резании пластических материалов к последовательному переходу от сливной стружки к суставчатой и элементной.

## 2.2 Образование сливной стружки

Многочисленными исследованиями установлено, что сливная стружка образуется за счет пластической деформации, которая имеет место в зоне резания перед режущим лезвием инструмента. Режущий клин инструмента

через площадку контакта  $C$  действует на срезаемый слой толщиной  $a$ . Сосредоточенная сила  $R$ , с которой передняя поверхность давит на срезаемый слой, получила название силы стружкообразования (рис. 2.5).

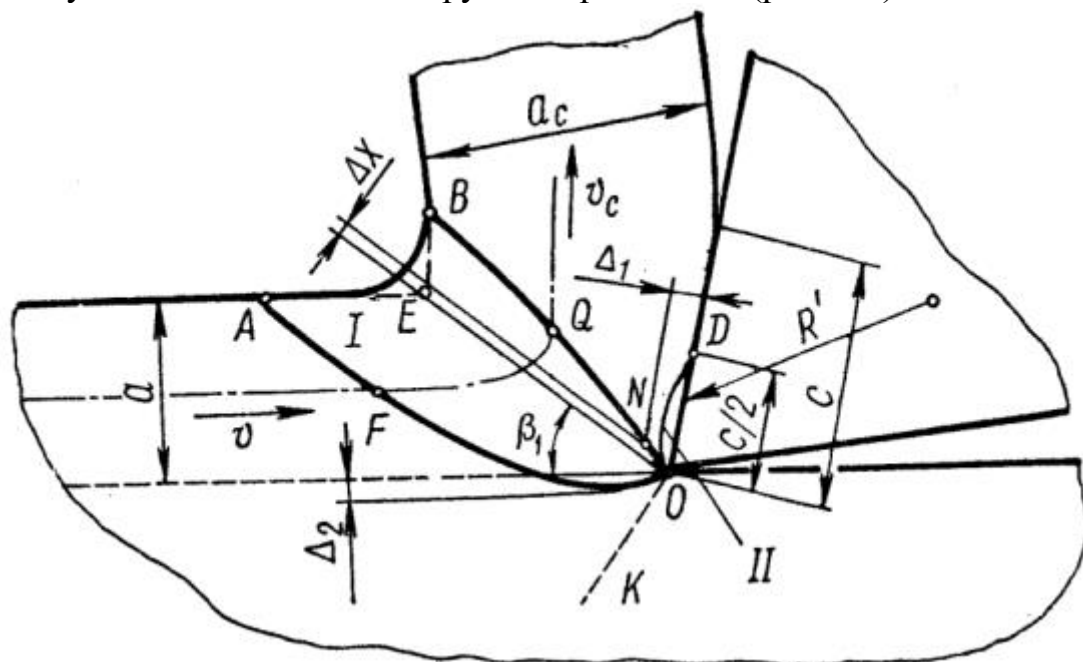
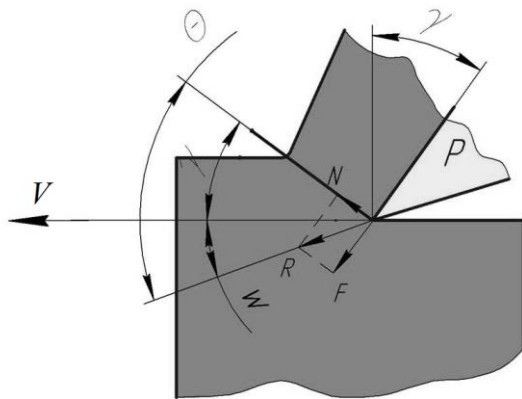


Рисунок 2.5 – Зоны первичной и повторной деформации при преобразовании срезаемого слоя в стружку

Перед передней поверхностью инструмента расположена зона  $I$  первичной деформации, имеющая форму клина с вершиной на лезвии инструмента. Левее линии  $OA$  находятся еще недеформированные зерна материала срезаемого слоя, а правее  $OB$  – зерна материала, принадлежащие стружке. Зерно срезаемого слоя, который перемещается относительно инструмента со скоростью  $V$ , начинает деформироваться в точке  $F$ , и, проходя по траектории своего движения, получает все большую степень деформации. Деформация заканчивается в точке  $Q$ , где зерно приобретает скорость  $v_c$ , равную скорости стружки. Деформированное состояние в зоне стружкообразования можно считать плоским (так как расширение стружки незначительно) и срезаемый слой претерпевает деформации сдвига.

Если бы между передней поверхностью инструмента и контактной поверхностью стружки отсутствовало трение, то на этом деформирование зерен срезаемого слоя закончилось. Поскольку между указанными поверхностями всегда есть трения, то зерна материала, находящегося в непосредственной близости от контактной поверхности стружки, продолжают деформироваться и после выхода из зоны первичной деформации. Ширина  $ED$  зоны  $II$  повторной деформации примерно равна  $C/2$ , а максимальная высота составляет  $0,1a_c$ . Зерна срезаемого слоя, проходя через зону повторной деформации, могут деформироваться в 20 раз больше, чем в среднем по стружке. Чем меньше сила трения на передней поверхности, тем меньше размеры зоны повторной деформации.

При передних углах инструмента, толщинах срезаемого слоя и скоростях резания, которые используются в производстве, протяженность  $FQ$  зоны первичной деформации резко уменьшается, ее предел  $AB$  сдвигается и приближается к некоторой линии  $OE$ , наклоненной к поверхности резания под углом  $\beta_1$ . Это позволяет считать, что деформации сдвига локализуются в очень тонком слое толщиной  $\Delta x$ , а зону деформации можно заменить единой плоскостью  $OE$ , которая называется плоскостью сдвига, а угол  $\beta_1$  называется углом сдвига.



С увеличением толщины среза срезанного слоя угол сдвига также увеличивается. Связь между углами  $\beta_1$ ,  $\omega$  и  $\theta$  имеет вид (рис. 2.6)

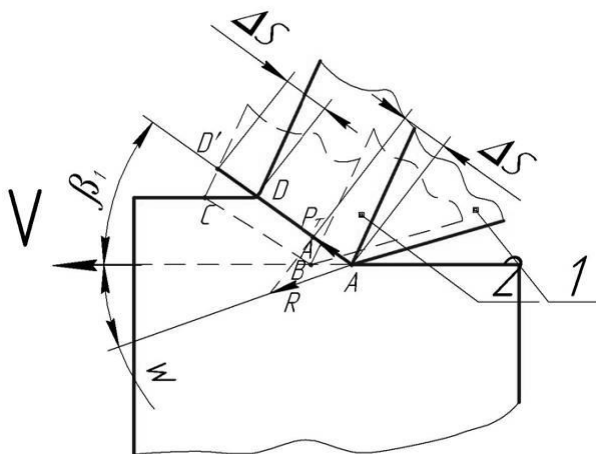
$$\beta_1 = 45^\circ + \frac{\gamma}{2} - \frac{\theta}{2}, \quad \theta = \gamma + \omega,$$

$$\omega = \theta - \gamma, \quad \beta_1 = 45^\circ - \frac{\omega}{2} \quad (2.1)$$

где  $\omega$  – угол трения;  $V$  – скорость резанья.

Рисунок 2.6 – Параметры стружкообразования

С увеличением скорости резания сила трения  $F$  уменьшается. При этом происходит поворот вектора равнодействующей  $R$ , то есть уменьшается угол  $\omega$ , а угол  $\beta_1$  увеличивается. При увеличении  $\gamma$  угол  $\beta_1$  увеличивается. Сила сдвига и касательные напряжения в условной плоскости сдвига



$$P_\tau = R \cos(\omega + \beta_1),$$

$$\tau_{\tilde{n}\tilde{a}} = \frac{P_r}{mn \cdot b},$$

где  $b$  – ширина срезаемого слоя,  $mn$  – длина поверхности сдвига.

$$\tau_{\tilde{n}\tilde{a}} = \frac{P_r \cdot \sin \beta_1}{a \cdot b} = \frac{R \cos(\omega + \beta_1) \cdot \sin \beta_1}{a \cdot b}$$

Условие сдвига (рис. 2.7)

$$\tau_{zc} \geq [\tau].$$

Рисунок 2.7 – Условие сдвига

Преобразование срезаемого слоя в стружку происходит путем простого смещения. Относительная величина сдвига

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{\Delta}.$$

При перемещении режущего клина из одного положения в другое осуществляется деформация простого сдвига в элементарном малом объеме  $ABCD$ , который превращается в  $A'B'CD$  в стружку.

### 2.3 Образование текстуры стружки и нароста

*Текстура* – вытянутые в определенном направлении деформированные зерна. С увеличением пластической деформации срезаемого слоя угол  $\psi$  уменьшается. В зоне трения текстура меняет свое направление (контактные слои стружки перемещаются по передней поверхности с меньшей скоростью) и образуется так называемый «заторможенный слой». При некоторых условиях скорость контактного слоя может равняться нулю, если силы трения и силы адгезии будут больше сил сопротивления внутреннему скольжению.

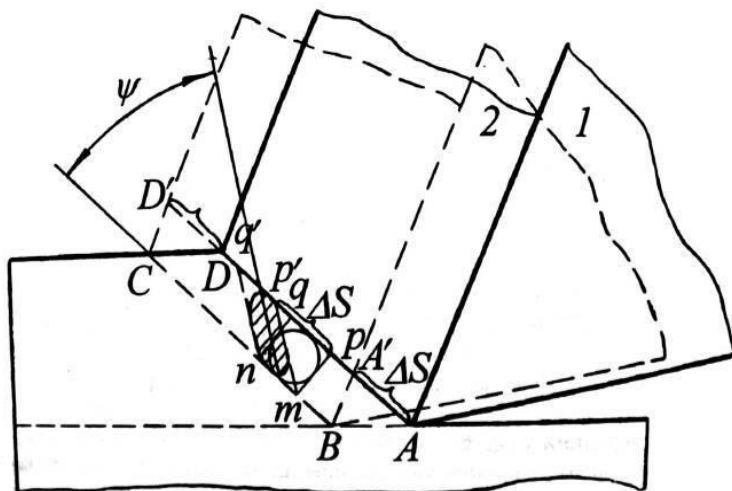


Рисунок 2.8 – Образование нароста

Если твердость материала застойной зоны за счет явления наклепа или упрочнения будет достаточно высока, то она превращается в нарост, который сам способен выполнять функции режущего инструмента (рис. 2.8). Твердость нароста обычно в 2–3 раза выше твердости обрабатываемого материала.

Нарост имеет непостоянную форму и размеры, его вершина постоянно обновляется путем срыва контактной стороной стружки обработанной поверхности и появлением новой (рис. 2.9). Основа нароста постоянно и достаточно прочно удерживается на передней поверхности инструмента, прикрывая ее от износа. Скорость резания из-за температуры оказывает сложное влияние на толщину срезаемого слоя: чем она больше, тем при меньших значениях скорости резания появляется и исчезает нарост.

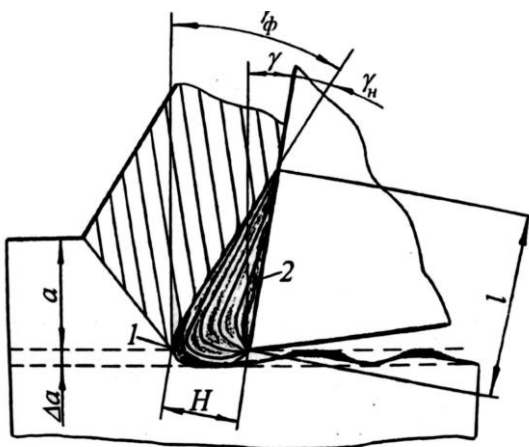


Рисунок 2.9 – Схема строения нароста: 1 – вершина нароста; 2 – основа нароста;  $H$  – высота нароста;  $l$  – длина подошвы нароста

Чем больше твердость и прочность обрабатываемого материала, тем при меньших значениях скорости резания возникает и исчезает нарост. Чем тяжелее условия процесса резания, то есть чем больше толщина срезаемого слоя и

прочность, чем меньше передний угол, тем при меньших значениях скорости резания появляется и исчезает нарост. Определяющим фактором является температура резания.

Образование наростов имеет ряд положительных сторон:

– облегчается процесс резания, поскольку с появлением нароста увеличивается фактический передний угол, следовательно, увеличивается угол сдвига  $\beta_1$ . В результате этого снижается степень пластической деформации (усадка стружки) и уменьшается работа пластической деформации, силы резания, температура резания и износ инструмента, облегчаются условия процесса образования стружки.

– нарост прикрывает от износа площадки контакта стружки с передней поверхностью резца, прикрывает главную режущую кромку и заднюю поверхность инструмента.

Отрицательные стороны нароста:

– вершина нароста часто срывается как стружкой, так и поверхностью резания, из-за чего шероховатость обработанной поверхности резко ухудшается;

– силы резания непостоянны, из-за чего возникают вибрации.

Таким образом, нарост полезен при черновой обработке материала и недопустим при чистовой.

## 2.4 Определение усадки стружки

При преобразовании срезаемого слоя в стружку за счет пластических деформаций в зоне резания происходит изменение размеров и формы срезаемого слоя. Объем срезаемого слоя является постоянной величиной (рис. 2.10)

$$abL = a_c b_c L_c; \quad b \approx b_c, \text{ откуда } aL = a_c L_c.$$

Определение коэффициента усадки стружки:

1. При строгании

$$K_L = \frac{L}{L_c} = \frac{a}{a_c},$$

где  $a$  – толщина среза;  $a_c$  – толщина стружки;  $K_L$  – коэффициент усадки стружки.

2. При точении

$$L = \frac{\pi D}{n} - b,$$

где  $D$  – диаметр заготовки;  $b$  – ширина пазов;  $n$  – число пазов;  $L$  – ширина стружки.

$$K_L = \frac{L}{L_c}$$

3. Весовой метод: вес снимаемого слоя

$$G_c = G = gabL,$$

тогда

$$L = \frac{G_c}{gab} \text{ и } K_c = \frac{L}{L_c} = \frac{G_c}{gabL_c}.$$

Данный способ применяется при образовании элементной и суставчатой стружки.

Влияние параметров резания на усадку стружки:

- с увеличением твердости и прочности обрабатываемого материала снижается коэффициент усадки стружки  $K_c$ ;
- с увеличением скорости резания уменьшается коэффициент усадки стружки;
- с увеличением толщины срезаемого слоя уменьшается коэффициент усадки стружки, поскольку угол  $\beta_1$  увеличивается;
- с увеличением переднего угла  $\gamma$  усадка стружки снижается.

Увеличение угла  $\gamma$  приводит к повороту всех сил по часовой стрелке. В результате угол действия  $\omega$  уменьшается, а угол сдвига  $\beta_1$  увеличивается. Увеличение угла  $\beta_1$  снижает работу пластической деформации срезаемого слоя, поскольку площадь поверхности сдвига уменьшается, следовательно, уменьшается усадка стружки. Чем больше  $\gamma$ , тем хуже условия для образования нароста, при  $\gamma = 45^\circ$  нарост не образуется при любых скоростях.

С увеличением главного угла в плане  $\varphi$  усадка стружки снижается, так как увеличивается толщина срезаемого слоя

$$a = S \cdot \sin \varphi.$$

Применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) снижает  $K_L$  за счет уменьшения сил трения. На высоких скоростях резания эффективность СОЖ снижается, поскольку высокая температура разрушает (испаряет) пленку жидкости.

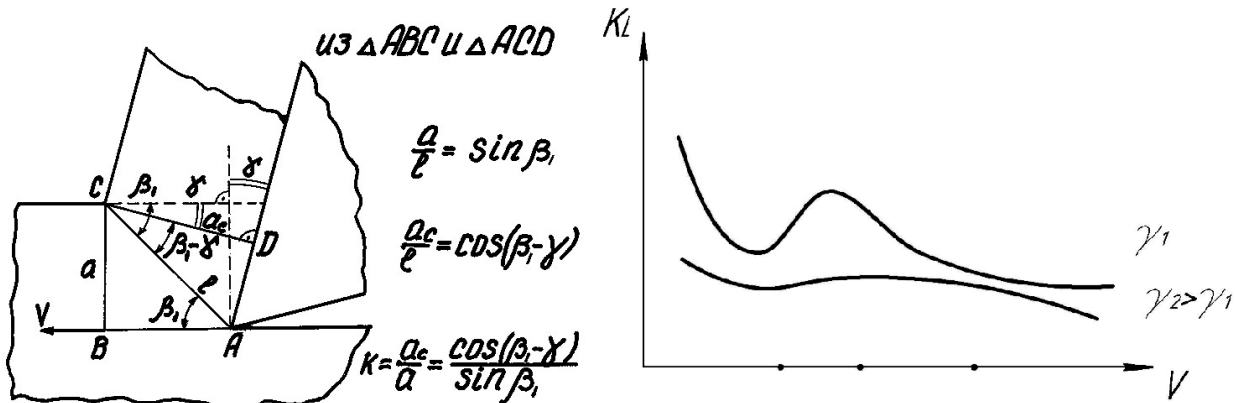


Рисунок 2.9 – Влияние параметров резания на усадку стружки

### Вопросы для самоконтроля:

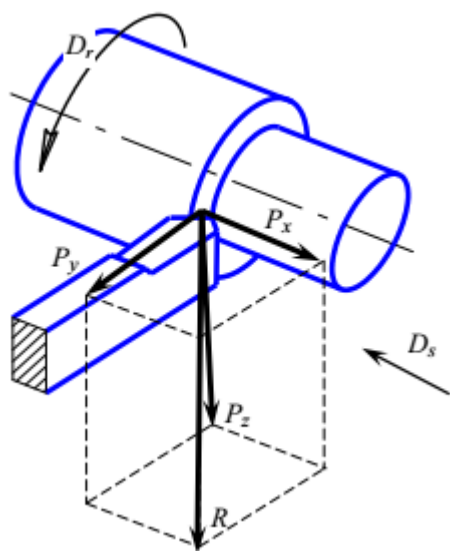
1. Какие физические явления имеют место при удалении припуска?
2. Какие виды стружки могут образовываться? От чего зависит, какая из стружек будет образовываться?
3. Что называется наростом? Какую роль он играет в процессе резания?
4. Что называется усадкой стружки? Чем она вызвана?
5. Для чего используют смазочно-охлаждающие жидкости при резании?

## ТЕМА 3. ДИНАМИКА ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

### 3.1 Основные понятия динамики резания

При резании металлов режущий инструмент действует на заготовку с определенной силой  $R'$ . Сила  $R'$  уравнивается сопротивлением обрабатываемого материала заготовки режущего клина. Таким образом, со стороны заготовки на инструмент действует сила, равная по величине силе  $R'$  и противоположная ей по направлению ( $R = R'$ ).

Для практических целей используется не сама сила  $R$ , а ее три составляющие  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$ . Они находятся как проекции вектора  $R$  на оси координат  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Выбор осей совпадает с направлением главного движения и движения подачи. При этом каждая составляющая силы  $R$  получает определенный технологический смысл (рис. 3.1):



– *тангенциальная сила  $P_z$*  – главная составляющая силы резания, действующей при точении на резец в направлении главного движения  $D_r$  по касательной к поверхности резания заготовки;

– *радиальная сила  $P_y$*  стремится оттолкнуть резец от заготовки;

– *осевая сила  $P_x$*  действует параллельно оси заготовки и направлена навстречу движению подачи  $D_s$ .

Из трех составляющих самая большая по величине сила  $P_z$ , а наименьшая, как правило, сила  $P_y = (0,2...0,3) \cdot P_z$ . Величина силы  $R$  рассчитывается по правилу параллелограмма

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}.$$

Рисунок 3.1 – Составляющие силы резания

На величину  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  влияют свойства обрабатываемого материала, элементы режима резания и геометрия режущего клина:

1. Чем больше у вязких материалов предел прочности на разрыв  $\sigma_6$  и чем выше твердость HB у хрупких материалов, тем больше величина  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$ .

2. С увеличением переднего угла  $\gamma$  уменьшается степень пластической деформации срезаемого слоя, что приводит к уменьшению величин  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$ .

3. Уменьшение заднего угла  $\alpha$  увеличивает контакт задней поверхности режущего клина с обрабатываемой деталью, что приводит к увеличению сил трения и величины  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$ . Интенсивность воздействия  $\alpha$  на силы резания невелика: увеличение  $\alpha$  от 2 до 10° ведет к росту величины  $P_z$  на 6%, а  $P_y$  – на 17%. Дальнейшее увеличение  $\alpha$  на силы резания не влияет.

4. Увеличение главного угла в плане  $\phi$  приводит к росту толщины срезаемого слоя ( $a = S_0 \cdot \sin\phi$ ) и уменьшению степени его деформации, что

влечет за собой уменьшение величин  $P_z$ , и  $P_y$ . Наряду с этим, увеличение  $\varphi$  приводит к уменьшению ширины срезаемого слоя, поскольку

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

что приводит к увеличению силы  $P_x$ .

5. Увеличение глубины резания  $t$  и подачи  $S_0$  связано с ростом площади поперечного сечения среза, поэтому вызывает большее сопротивление обрабатываемого материала резанию и приводит к увеличению  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$ . Увеличение  $t$  сильнее влияет на рост сил резания, чем увеличение  $S_0$ , так как растут активная длина режущей кромки, нормальное давление и силы трения по задней поверхности режущего клина.

6. Влияние скорости резания на  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  косвенно определяется свойствами обрабатываемого материала.

Если обрабатывается пластический материал (например, сталь 40X), дающий сливную стружку, то зависимость  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  от скорости резания имеет сложный неоднозначный характер в различных интервалах скоростей (рис.3.2, а). При увеличении скорости резания от 5 до 20–25 м/мин степень пластической деформации и величины  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  уменьшаются, так как растет нарост  $H_H$  на передней поверхности инструмента, который увеличивает фактический передний угол  $\gamma_n$ . Начиная со скорости 20–25 м/мин высота нароста уменьшается, фактический передний угол становится меньше, что увеличивает степень деформации и величины  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$ . При скоростях резания 40-50 м/мин нарост почти исчезает, передний угол принимает свое номинальное значение, степень деформации и величины  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  достигают максимума. При дальнейшем увеличении скорости резания степень пластической деформации и величины  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  уменьшаются, так как растет температура резания, уменьшающая коэффициент трения между стружкой и режущим клином.

При обработке хрупких материалов (например, серых чугунов), дающих элементную стружку, зависимость коэффициента усадки стружки от скорости резания имеет вид плавной кривой во всех интервалах скоростей (рис. 3.2, б). Это объясняется отсутствием нароста при обработке хрупких и твердых материалов. С увеличением скорости резания степень деформации уменьшается, что приводит к уменьшению величины сил резания. Аналогичный вид имеет зависимость для материалов, не подверженных наростообразованию: меди, жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, титановых сплавов.

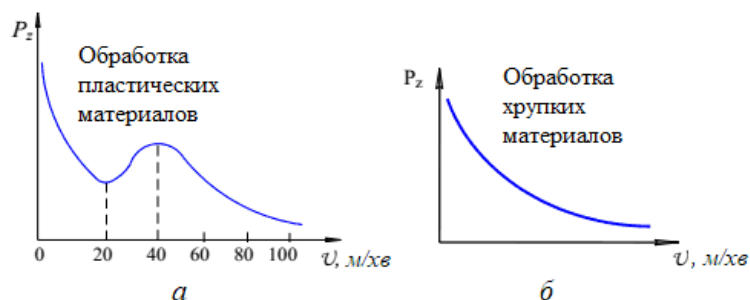


Рисунок 3.2 – Зависимость тангенциальной силы от скорости резания

### 3.2 Расчет сил резания, моментов и мощности при точении

При точении силы резания  $P$ ,  $N$  при работе различными резцами рассчитывают по эмпирическим формулам

$$P_{x,y,z} = 10 C_p \cdot t^x \cdot S_0^y \cdot v^n \cdot K_p,$$

где  $C_p$  – константа;  $x, y, n$  – показатели степеней (имеют разные значения для каждой из составляющих силы резания);  $K_p$  – общий поправочный коэффициент.

Общий поправочный коэффициент  $K_p$  рассчитывают по формуле

$$K_p = K_{M_p} \cdot K_{\varphi_p} \cdot K_{\gamma_p} \cdot K_{\lambda_p} \cdot K_{r_p},$$

где  $K_{M_p}$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние качества обрабатываемого материала на силы резания;  $K_{\varphi_p}, K_{\gamma_p}, K_{\lambda_p}$  и  $K_{r_p}$  – поправочные коэффициенты, учитывающие геометрию режущего инструмента.

Так, для сталей и чугунов  $K_{M_p}$  равны соответственно

$$K_{M_p} = \left( \frac{\sigma_b}{750} \right)^n \text{ и } K_{M_p} = \left( \frac{HB}{190} \right)^n,$$

где  $n = 0,75$  для твердых сплавов и  $n = 0,35$  – для быстрорежущих сталей.

Силы  $P_z$  и  $P_x$  деформируют резец и заготовку и создают крутящий и изгибающий моменты, а сила  $P_y$  работы не осуществляет, в направлении ее действия перемещения отсутствуют (рис. 3.3, а). Сила  $P_z$  изгибает резец в вертикальной плоскости  $y-z$ , создавая изгибающий момент  $M_{uz2z}$

$$M_{uz2z} = P_z \cdot l,$$

а сила  $P_x$  изгибает резец в горизонтальной плоскости  $y-x$ , создавая изгибающий момент  $M_{uz2x}$

$$M_{uz2x} = P_x \cdot l.$$

Кроме того, сила  $P_z$  создает крутящий момент на заготовке, который называют моментом сопротивления резанию  $M$  (рис. 3.3, б)

$$M_{uz2z} = \frac{P_z \cdot D}{2}.$$

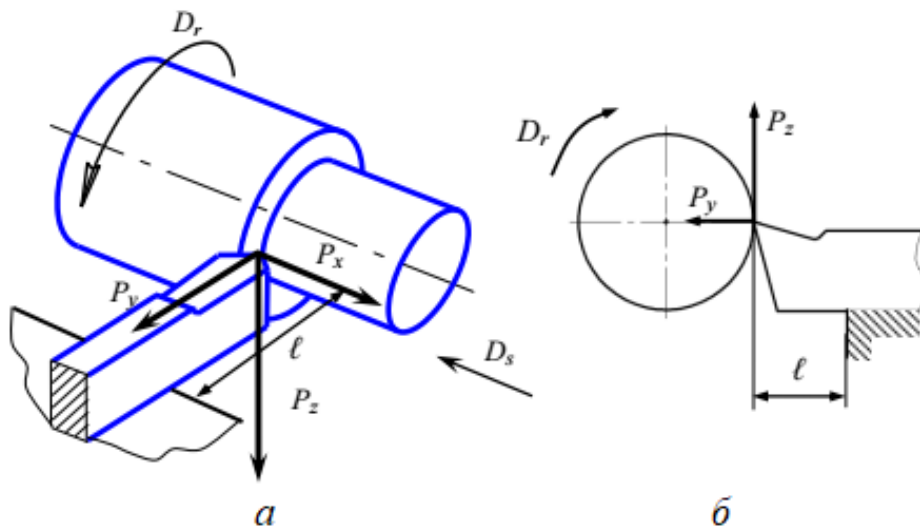


Рисунок 3.3 – Моменты сил при резании материалов

Мощность, затрачиваемую на резание (эффективную мощность  $N_{эф}$ , кВт) рассчитывают по формуле

$$N_{эф} = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60},$$

где  $P_z$  – сила резания, кН;  $v$  – скорость резания, м/мин.

Расчетная мощность станка  $N_p$  определяется по величине мощности электродвигателя  $N_{дв}$  с учетом коэффициента полезного действия  $\eta$

$$N_p = N_{дв} \cdot \eta.$$

Для осуществления процесса резания расчетная мощность должна быть не меньше эффективной мощности

$$N_p \geq N_{эф}.$$

### 3.3 Расчет сил резания, моментов и мощности при сверлении

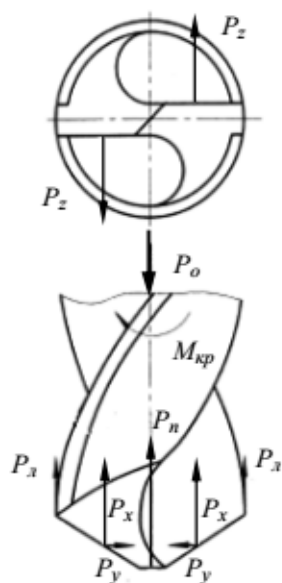
На сверло со стороны обрабатываемой заготовки действуют силы, которые по аналогии с точением раскладывают на три составляющие:  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_y$  (рис. 3.4). Эти силы действуют на оба режущих клина сверла. Силы сопротивления подачи  $P_x$  действуют параллельно оси сверла навстречу движению  $D_s$ , а радиальные силы  $P_y$  стремятся оттолкнуть сверло от заготовки и действуют по радиусу к центру сверла. При правильной заточке инструмента эти силы уравновешивают друг друга.

Пара сил  $P_z$  (рис. 3.4), сопротивляясь главному движению  $D_r$ , создает момент сопротивления  $M_{con}$ , Н·м

$$M_{con} = \frac{P_z \cdot D}{2}.$$

На поперечную кромку (перемычку) действует сила  $P_n$ , направленная вдоль оси сверла, а на ленты действуют силы  $P_l$ , направленные параллельно оси сверла. Сумма сил  $P_x$ ,  $P_n$  и  $P_{ст}$  определяет осевую силу  $P_o$ , которую развивает механизм станка

$$P_o = 2P_x + P_n + 2P_l.$$



В целом, действие сил на сверло в процессе обработки можно выразить через осевую силу  $P_o$ , Н и крутящий момент  $M_{кр}$ , Н·м, для расчета которых используются эмпирические зависимости

$$P_o = C_p \cdot D^x \cdot S_0^y \cdot K_p \text{ и } M_{кр} = 10 C_m \cdot D^q \cdot S_0^y \cdot K_p,$$

где  $C_p$  и  $C_m$  – постоянные, зависящие от вида обработки и свойств обрабатываемого и инструментального материалов;  $x$ ,  $y$ ,  $q$  – показатели степени, принимаемые по справочнику;  $D$  – диаметр сверла, мм;  $S_0$  – подача, мм/об;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий фактические условия резания и зависящий от обрабатываемого материала.

Рисунок 3.4 – Силы резания при сверлении материалов

Мощность резания  $N_{эф}$  при сверлении определяется по формуле

$$N_{эф} = \frac{M_{кр} \cdot n}{9750}.$$

### 3.4 Расчет сил резания, моментов и мощности при фрезеровании

На винтовой зуб фрезы действуют сила резания  $P_z$ , радиальная сила  $P_y$  и осевая сила  $P_o$  (рис. 3.5, а). Сила  $P_o$  действует вдоль оси фрезы, направление ее действия зависит от направления спирали зуба. В сечении  $a$  равнодействующая  $R'$  сил  $P_z$  и  $P_y$  может быть разложена на горизонтальную  $P_x$  и вертикальную  $P_V$  составляющие.

При встречном фрезеровании ( $D_r$  и  $D_s$  направлены навстречу друг другу) при воздействии на фрезу сила  $P_V$  направлена вниз и прижимает фрезу к заготовке, а сила  $P_x$  (сила подачи) совпадает с направлением подачи. Ее воспринимает механизм подачи станка (рис. 3.5, б). При попутном фрезеровании (направления  $D_r$  и  $D_s$  совпадают) направления действия сил  $P_V$  и  $P_x$  на фрезу меняются на противоположные. Поэтому при попутном фрезеровании сила  $P_V$  отжимает фрезу от заготовки и прижимает заготовку к столу станка (рис. 3.5, в).

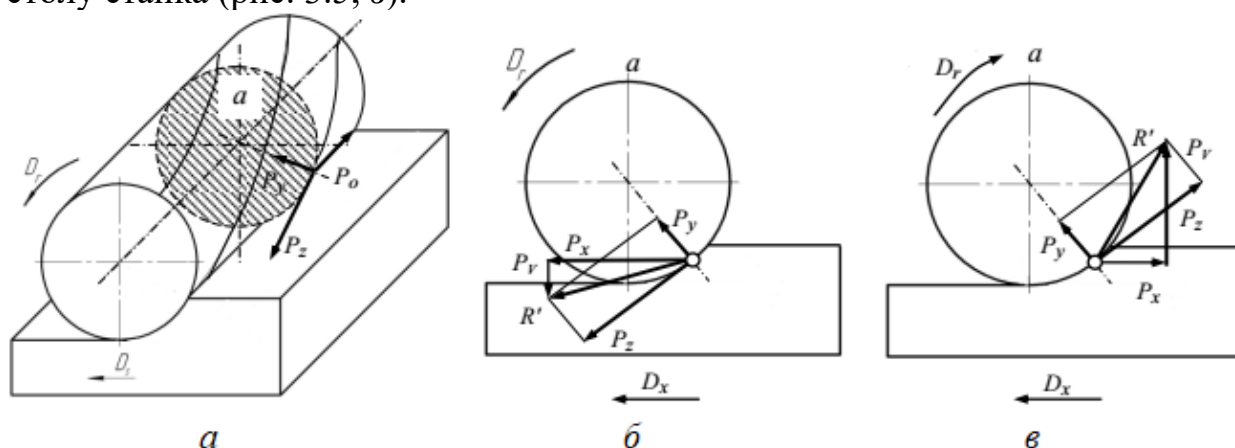


Рисунок 3.5 – Силы резания при фрезеровании

Силы  $P_z$ ,  $P_x$  и  $P_V$  при фрезеровании находятся в определенных соотношениях:

– при встречном фрезеровании

$$P_x = (1 \dots 1,2) \cdot P_z \text{ и } P_V = (0,2 \dots 0,3) \cdot P_z;$$

– при попутном фрезеровании

$$P_x = (0,8 \dots 0,9) \cdot P_z \text{ и } P_V = (0,75 \dots 0,8) \cdot P_z.$$

Силу  $P_z$  рассчитывают по эмпирической формуле:

$$P_z = \frac{10 C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{мп},$$

где  $C_p$  – постоянная, зависящая от конструкционного и инструментального материалов;  $t$  – глубина резания, мм;  $S_z$  – подача на зуб, мм/зуб;  $B$  – ширина фрезерования, мм;  $D$  – диаметр фрезы, мм;  $n$  – число оборотов шпинделя,

мм/об;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий фактические условия резания и зависящий от обрабатываемого материала.

Эффективную мощность при цилиндрическом фрезеровании определяют через окружную силу  $P_z$  и скорость резания  $v$

$$N_{эф} = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60}.$$

Расчетную мощность станка при фрезеровании определяют, учитывая расход мощности на подачу и коэффициент полезного действия  $\eta$

$$N_p = \frac{N_{см} \cdot \eta}{1,15}.$$

Для осуществления процесса фрезерования расчетная мощность должна быть не меньше эффективной мощности

$$N_p \geq N_{эф}.$$

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. На какие составляющие может быть разложена сила резания? По какому правилу выполняется это разложение?
2. Какой физический смысл каждой их составляющих силы резания?
3. Какое влияние на общую силу резания оказывают глубина резания и скорость резания?
4. Какие силовые факторы действуют на резец при токарной обработке материалов?
5. Какие моменты действуют на сверло при сверлении? Чем вызвано их появления?

## ТЕМА 4. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ

### 4.1 Источники возникновения тепла при резании

Процесс резания материала сопровождается значительным выделением теплоты. В соответствии с составляющими работы резания, различают следующие источники выделения теплоты:

- теплота, образуемая в результате работы сил деформации  $Q_1$ ;
- теплота, образуемая в результате работы сил трения по передней поверхности инструмента  $Q_2$ ;
- теплота, образуемая в результате работы сил трения по задней поверхности инструмента  $Q_3$ .

Таким образом, общее количество выделяющейся теплоты  $Q$  состоит из трех составляющих (рис. 4.1, а)

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Выделенная теплота отводится стружкой  $q_1$ , резцом  $q_2$ , заготовкой  $q_3$  и окружающей средой  $q_4$ . Возникает тепловой баланс между выделяющейся и отводимой теплотой, который описывается уравнением теплового баланса

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4.$$

**Температура резания**  $\theta$ , °С – результат теплового баланса в зоне резания. Она зависит от количества образовавшегося и отведенного тепла. Теплота, возникающая в зоне резания, согласно уравнению теплового баланса, нагревает стружку, обрабатываемую заготовку и режущий инструмент. Температура на контактных участках распределяется в соответствии с величиной и направлением тепловых потоков.

Различные слои стружки, режущего инструмента и обрабатываемой заготовки нагреваются неравномерно (рис. 4.1, б). В стружке наибольшее количество теплоты концентрируется в тонких слоях, прилегающих к передней поверхности режущего инструмента. У режущего инструмента наиболее разогреты участки передней поверхности, расположенные в середине длины площади контакта со стружкой. Температура обрабатываемого материала, лежащего ниже поверхности резания, значительно меньше.

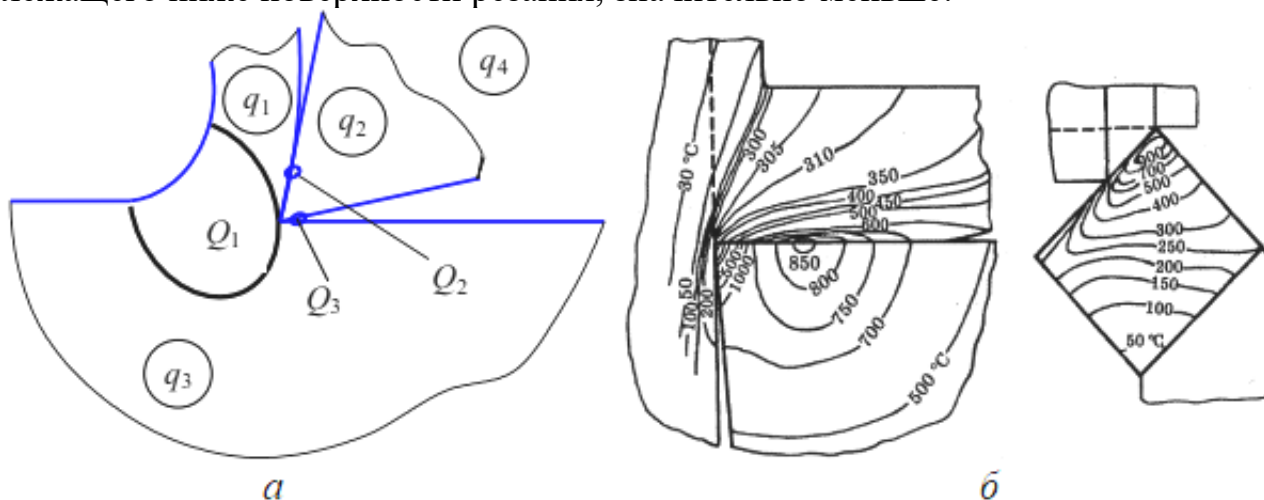


Рисунок 4.1 – Теплофизика резания: а – источники и стоки тепла; б – распределение температур в резце и обрабатываемом материале

В процессе обработки происходит накопление тепла в заготовке и резце, что приводит к повышению средней температуры резания. Количественную оценку тепловых явлений, имеющих место в зоне стружкообразования, выполняют различными методами. Наиболее распространенным является измерение температуры, а не количества теплоты. Когда отсутствует необходимость в изучении законов распределения температур на контактных участках или в теле инструмента и детали, наиболее удобным показателем тепловой напряженности процесса резания является *средняя температура резания* – показатель тепловой напряженности процесса резания.

На величину температуры резания  $\theta$  влияют такие условия резания, как свойства обрабатываемого материала, элементы режима резания и геометрия режущего клина. Чем выше предел прочности или твердость материала заготовки, тем большую работу необходимо затратить на снятие стружки и тем больше выделяется теплоты. С другой стороны, при увеличении твердости материала заготовки несколько уменьшается площадь контакта стружки с передней поверхностью резца, из-за чего температура резания повышается.

Кроме того, чем ниже теплопроводность  $\rho$  обрабатываемого материала, тем менее интенсивный отвод тепла от зон его выделения в заготовку и стружку и тем выше температура резания. Увеличение значений элементов режима резания приводит к увеличению значения температуры резания, но интенсивность изменения температуры резания в зависимости от изменения каждого элемента его режима разная (рис. 4.2).

С ростом скорости резания  $v$  увеличивается количество выделяющейся теплоты. При этом растет и температура резания, поскольку условия теплоотвода остаются практически неизменными, однако прирост температуры отстает от увеличения скорости резания. Это объясняется тем, что с увеличением скорости резания несколько снижается величина силы  $P_z$ , а также коэффициент трения (в определенном диапазоне скоростей резания), поэтому большее количество тепла отводится стружкой.

Уравнения зависимости температуры от скорости резания имеет вид

$$\theta = C_1 \cdot v^z,$$

где  $C_1$  – коэффициент, учитывающий влияние на температуру резания всех других условий, кроме скорости резания;  $z$  – показатель степени, характеризующий интенсивность прироста температуры с увеличением скорости резания (в зависимости от конкретных условий обработки обычно  $z = 0,26 \dots 0,72$ ).

С увеличением подачи растет сила резания и, значит, количество выделившейся теплоты. Сила  $P_z$  растет медленнее, чем увеличивается подача, поэтому прирост количества теплоты отстает от роста подачи.

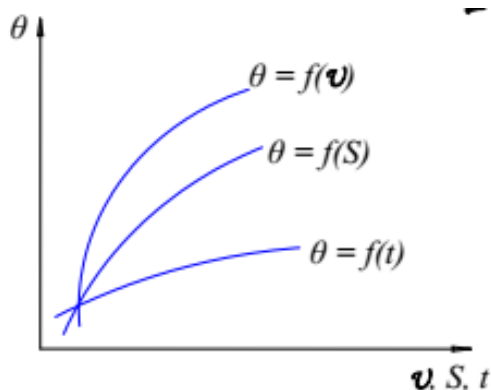


Рисунок 4.2 – Зависимость температуры резания от скорости резания, подачи и глубины резания

Кроме того, с увеличением подачи  $S$  центр давления стружки на резец удаляется от режущего лезвия и увеличивается площадь контакта стружки с резцом, в результате чего улучшаются условия теплоотвода. Температура резания повышается значительно медленнее увеличения подачи.

Уравнения зависимости температуры от подачи

$$\theta = C_2 \cdot S^x,$$

где  $C_2$  – коэффициент, зависящий от других условий обработки, кроме подачи;  $x$  – показатель степени, характеризующий интенсивность прироста температуры с увеличением подачи. При точении стальных  $x = 0,20 \dots 0,45$  (в зависимости от условий обработки).

С увеличением глубины резания  $t$  растет общее количество теплоты, поскольку увеличиваются сила и работа резания. Однако при этом возрастает и длина активного участка режущего лезвия, отводящего теплоту в тело резца, поэтому прирост температуры резания становится незначительным.

Уравнения зависимости температуры от глубины резания:

$$\theta = C_3 \cdot t^y,$$

где  $C_3$  – коэффициент, зависящий от других условий обработки, кроме глубины резания;  $y$  – показатель степени, характеризующий интенсивность прироста температуры с увеличением глубины резания. При точении  $y = 0,3 \dots 0,10$  (в зависимости от условий обработки).

Общее уравнение зависимости температуры резания от параметров режима резания имеет вид

$$\theta = C_\theta \cdot v^z \cdot S^x \cdot t^y,$$

где  $C_\theta$  – общий коэффициент, характеризующий условия обработки, не вошедшие в формулу в явном виде;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм;  $z, x, y$  – показатели степеней, характеризующие интенсивность прироста температуры с увеличением скорости, подачи и глубины резания.

Изменение переднего угла  $\gamma$  инструмента меняет условия подвода и отвода тепла и, следовательно, температуру резания. Увеличение угла  $\gamma$  до оптимального значения  $\gamma_0$  приводит к уменьшению силы  $P_z$  и работы резания  $A_{рез}$ , поэтому количество отведенной теплоты  $Q$  становится меньше. Но при этом ухудшаются условия отвода теплоты, поскольку при увеличении угла  $\gamma_0$  больше оптимального значения уменьшается массивность режущего клина, что приводит к росту температуры резания.

С увеличением главного угла в плане  $\phi$  сила и работа резания, а значит, и тепловыделение, несколько уменьшаются, поскольку растет толщина стружки и сокращается ее ширина. Но при этом уменьшается длина активной части  $l_a$  режущего лезвия и ухудшаются условия отвода тепла, что приводит к росту температуры резания.

## 4.2 Методы определения температуры резания

Для определения температуры резания применяются различные методы. На практике применяются калориметрический, термоэлектрический,

оптический, микроструктурный и другие методы. Достаточно распространены методы, действие которых основано на использовании термоэлектричества.

Суть явления термоэлектричества заключается в том, что если нагреть место спая двух проводников из разнородных металлов ( $A$  и  $B$ ), а свободные концы оставить при более низкой температуре, то на них возникнет термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС).

Термо-ЭДС зависит от разницы температур места спая и холодных концов, ее можно измерить, замкнув цепь через милливольтметр (рис. 4.3). Такая цепь называется термоэлектрической, а ток, который в ней возникает – термоток. Явление термоэлектричества лежит в основе методов искусственной, полуискусственной и природной термопар.

*Метод искусственной термопары* (рис. 4.3, *а*) используют при измерении температуры рабочей части резца. Для этого в резце сверлят отверстие малого диаметра (1,5...2 мм), не достигающее до передней поверхности на 0,5 мм. В отверстие вводится изолированная термопара (например, медь-константан). Тепло, поступающее в резец, нагревает место спая термопары и возникает термоток, который регистрируется миллиамперметром. Термопара заранее тарируется, а затем с помощью тарировочного графика показания миллиамперметра переводят в единицы температуры.

К недостаткам данного метода относятся:

- сложность экспериментального устройства;
- измеряется не самая высокая температура на контактных поверхностях резца, а более низкая температура нижних слоев инструмента;
- сложность исследования зависимости температуры от условий резания.

В *методе полуискусственной термопары* (рис. 4.3, *б*) одним из элементов термопары служит сам инструмент (резец). В просверленное в резце отверстие вводят второй элемент стандартной термопары (например, константановую проволоку) и расклепывают на передней или задней поверхности. Проволока в отверстии изолируется, измерение температуры происходит так же, как и в предыдущем методе.

Недостатки метода примерно те же, что и у метода искусственной термопары, а преимуществами можно считать более надежные результаты и менее сложную подготовку экспериментального устройства

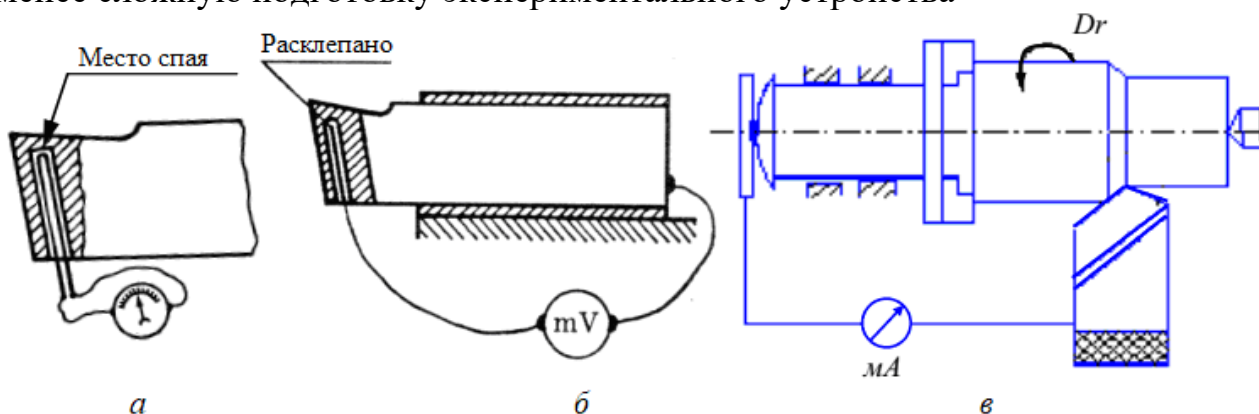


Рисунок 4.3 – Методы определения температуры резания: *а* – искусственной термопары; *б* – полуискусственной термопары; *в* – естественной термопары

*Метод естественной термопары* отличается тем, что элементами термопары служат деталь и инструмент, материалы которых электрически разнородные, а местом спая место контакта резца со стружкой и деталью (рис. 4.3, в). Температура места спая значительно выше температуры других мест детали и резца. Поэтому, если эти «холодные» концы соединить, образовав электрическую цепь, в нем появится термоэлектрический ток. Включив в созданный электрическую цепь милливольтметр или миллиамперметр, можно измерить напряжение или силу тока, которые пропорциональны разности температур.

Преимуществом метода естественной термопары является то, что при определении температуры в зоне резания нет необходимости в применении специального резца с установленной в нем термопарой. Метод позволяет не только определять среднюю температуру на контактных поверхностях резца и обрабатываемой детали, но и дает возможность вести эксперименты по установлению зависимости температуры резания от условий резания.

К основным недостаткам метода естественной термопары относятся невозможность исследования температурного поля на режущем инструменте и заготовке и сложность тарирования термопары, которое необходимо проводить для каждой комбинации обрабатываемого и инструментального материалов.

Одним из методов, позволяющих получить данные о распределении температуры нагрева в разных точках стружки, инструмента и обрабатываемой заготовки, является *оптический метод*. Он основан на фокусировке тепловых лучей, исходящих от нагретых точек стружки, инструмента и обрабатываемой заготовки. Через систему линз тепловые инфракрасные лучи фокусируются на термоэлементе, включенном в электрическую цепь и меняющем свое сопротивление в зависимости от интенсивности теплового потока. В цепь подключается заранее протарированный миллиамперметр или милливольтметр, показания которого с помощью тарировочного графика переводят в значение температуры (рис. 4.4, а).

Недостатками оптического метода является сложность устройства, трудности его тарирования, неудобство крепления прибора на станке и влияние на точность показания прибора внешних факторов (тонкие окисы на исследуемых поверхностях и т.д.). Указанные недостатки ограничивают его применение.

*Метод микроструктурного анализа* основан на исследовании фазовых и микроструктурных изменений, происходящих в поверхностных слоях рабочих поверхностей инструмента под действием температуры резания. Изменения микроструктуры и твердости, определяемые с помощью металлографического микроскопа и твердомера (рис. 4.4, б), позволяют судить о температуре в исследуемых точках поверхностных слоев инструмента. Для этого пользуются известными данными о микроструктуре, фазовом состоянии и твердости, соответствующие той или иной температуре нагрева конкретного инструментального материала.

Недостатками метода микроструктурного анализа является сложность оборудования для ведения исследований и ограниченность исследований тем

кругом инструментальных материалов, зависимость свойств которых от температурных воздействий достаточно изучена.

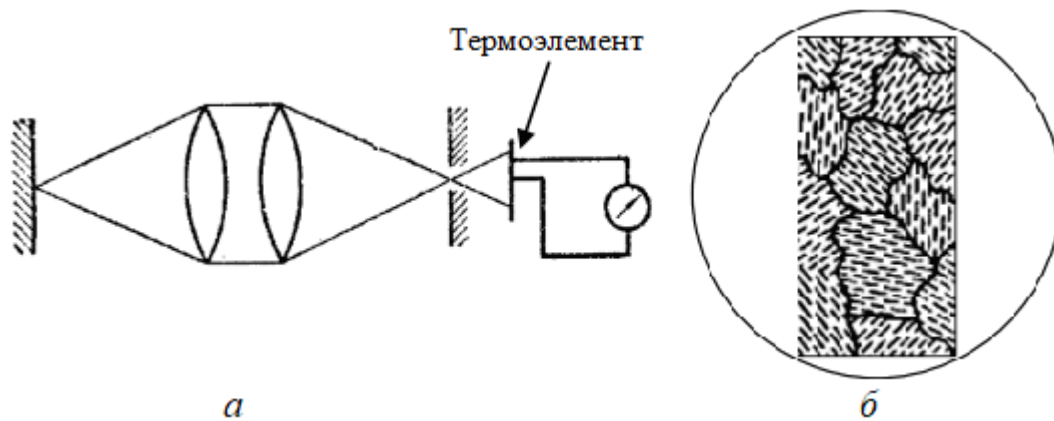


Рисунок 4.4 – Методы определения температуры резания: *а* – искусственной термопары; *б* – полуискусственной термопары

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Запишите уравнение теплового баланса при резании, пояснив смысл каждого из его слагаемых.
2. Опишите характер распределения температур в резце, поясните, чем он вызван.
3. Назовите источники отведения теплоты из зоны резания, расположив их в порядке убывания величины.
4. Сравните методы естественной, полуискусственной и искусственной термопары, их преимущества и недостатки.
5. Чем метод микроструктурного анализа принципиально отличается от других методов определения температуры резания?

## ТЕМА 5. ИЗНОС И СТОЙКОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

### 5.1 Виды и критерии износа инструмента

В результате высокого давления, температуры и скорости относительного перемещения контактные поверхности инструмента в процессе его эксплуатации изнашиваются. В зависимости от условий резания износ может наблюдаться:

– только по задней поверхности (рис. 5.1, а), если обрабатываются твердые и хрупкие металлы (серый чугун) и пластические материалы (стали) на низких скоростях резания с малыми толщинами среза ( $a < 0,1$  мм). Такой вид износа наблюдается при работе метчиков, протяжек, фасонных резцов, цилиндрических фрез;

– только по передней поверхности (рис. 5.1, б), если обрабатываются пластические материалы с высокой скоростью резания и с большой толщиной среза ( $a > 0,2$  мм) без охлаждения. Такой вид износа наблюдается при работе резцов, сверл, торцевых фрез;

– по передней и задней поверхностям одновременно (рис. 5.1, в), если обрабатываются пластические металлы с толщиной среза более 0,1 мм на средних скоростях резания с охлаждением. Такой вид износа можно наблюдать при работе осевых инструментов, резцов, торцевых фрез и головок.

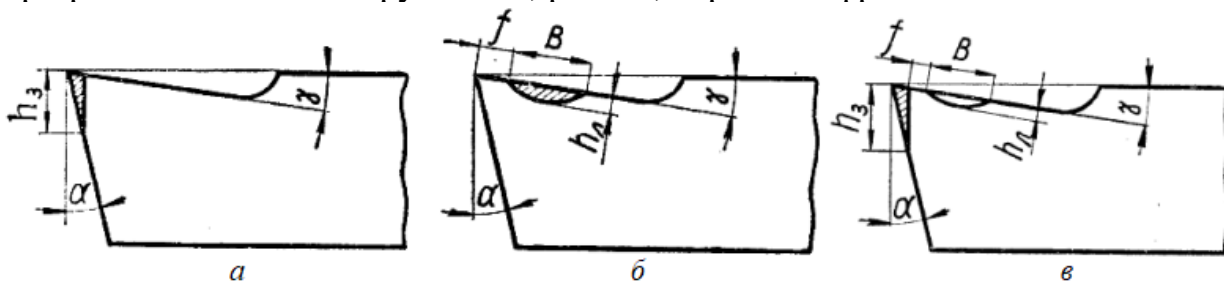


Рисунок 5.1 – Виды износа режущего инструмента

Кроме параметров линейного износа режущих инструментов, показателем затупления может служить износ по массе, равный массе инструментального материала, удаляемого из контактных площадок инструмента за время его работы.

Удельный износ определяется как отношение оптимального износа  $h_{из}$  к длине пути резания  $L$

$$J = \frac{h_{из}}{L}, \text{ мм/м.}$$

Длина пути резания  $L$  зависит от метода обработки и определяется в зависимости от диаметра заготовки  $D$ , длины обработанной поверхности  $l$  и подачи  $S_o$ . При точении длина пути резания

$$L = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{1000 \cdot S_o}, \text{ м.}$$

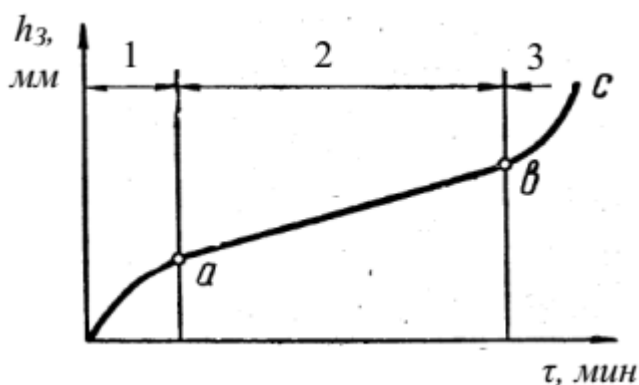
Интенсивность износа зависит от времени работы инструмента, графическое изображение закономерности нарастания величины износа за

время работы инструмента называется кривой износа (рис. 5.2). Кривая износа инструмента по передней и задней поверхностям одновременно может быть разделена на три участка, где наблюдается разная интенсивность увеличения износа со временем:

– *период приработки* (участок 1) – наблюдается в начальный период работы инструмента. За короткое время происходит быстрое увеличение размеров износа. Чем менее шероховата поверхность инструмента, тем более плавно будет расти износ;

– *период нормального рабочего износа* (участок 2) – износ медленно растет со временем работы инструмента;

– *период интенсивного износа* (участок 3) – при достижении определенного износа (в точке *в*) начинает быстро повышаться температура в



зоне резания из-за изменений геометрии изношенного клина, в связи с чем резко возрастает интенсивность износа. Если не прекратить в этот момент процесс резания, то будет иметь место быстрое и непродуктивное стирание значительной части режущего клина.

Рисунок 5.2 – Кривая износа режущего инструмента

Величина  $h_{из}$ , при которой дальнейшая работа инструмента должна быть прекращена, называется допустимой или критериальной величиной износа (точка *в* на рис. 5.2). Допустимая величина износа имеет различные значения в зависимости от типа инструмента, обрабатываемого материала и наличия охлаждения. Чтобы износ инструмента не превысил допустимого значения, необходимо знать, когда следует остановить работу инструмента. Для этого используют критерии (признаки) износа инструмента:

1. *Критерий «блестящей ленты»* – на поверхности резания заготовки при работе изношенным быстрорежущим инструментом при обработке стали появляется блестящая полоска, а при обработке чугуна – темные пятна. Это означает начало третьего периода износа. При дальнейшей работе в течение 1–2 мин имеет место полное разрушение режущей кромки. Этот критерий не применяют для чистовых операций и при работе сложным и дорогим инструментом.

2. *Критерий изменения цвета стружки* – при нормальном износе цвет стружки желтоватый, а при достижении катастрофического износа становится сиренево-фиолетовым.

3. *Силовой критерий* – при работе изношенным инструментом наблюдается увеличение сил  $P_y$  и  $P_x$ . Для регистрации их значений на станках должны быть установлены измерительные приборы, что возможно лишь на современных обрабатывающих центрах.

4. *Технологический критерий* – признаком износа инструмента служит внезапное появление несоответствия точности и шероховатости детали, заданных на чертеже. Этим критерием пользуются на чистовых операциях, работу инструмента останавливают до наступления конца 2-го периода износа.

5. *Критерий оптимального износа* – инструмент считают изношенным, когда линейный износ задней поверхности достигает значения, равного оптимальному износу. Под оптимальным износом понимают такой износ, при котором суммарный период стойкости инструмента достигает максимальной величины. Общий срок службы инструмента вычисляется по формуле:

$$T_{\text{общ}} = T \cdot (K + 1),$$

где  $T$  – стойкость инструмента в зависимости от принятого критерия износа;  $K$  – количество перетачиваний.

Перетачивания выполняются до тех пор, пока не износится  $2/3$  ширины пластинки

$$K = \frac{2}{3} \cdot \frac{B}{Y} = \frac{2}{3} \cdot \frac{B}{\frac{h_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\cos \gamma} + \Delta},$$

где  $\Delta$  – допуск на перетачивание, мм;  $B$  – ширина режущей пластинки, мм.

## 5.2 Физическая природа износа инструмента

На контактных участках инструмента при резании протекают сложные физико-химические и физико-механические явления. Физическая природа изнашивания поверхностей режущего инструмента до настоящего времени полностью не изучена из-за недоступности непосредственных наблюдений за данным процессом. Согласно современным представлениям, основными причинами, приводящими к износу контактных поверхностей, является:

1. *Абразивный износ*. При трении поверхности резания о задние поверхности инструмента и стружки о переднюю поверхность инструмента твердые микрокомпоненты материала обрабатываемой детали царапают материал инструмента, постоянно срезая его. Интенсивность абразивного износа возрастает при увеличении содержания в сталях цементита, в силуминах – карбида кремния. Контактные поверхности инструмента могут также царапать периодически разрушающиеся частицы нароста.

Абразивное действие обрабатываемого материала становится тем сильнее, чем меньше отношение твердости инструментального материала к твердости обрабатываемого. В результате абразивный износ заметно проявляется при работе инструментами из углеродистых и быстрорежущих сталей.

2. *Адгезивный износ* – схватывание материала, то есть появление прочных временных соединений между соприкасающимися поверхностями (стружки и передней поверхности инструмента), образующихся в твердом состоянии в результате совместного пластического деформирования химически чистых поверхностей. Схватыванию способствует возникающая в процессе резания высокая температура.

Фактическая площадь контакта между контактными поверхностями инструмента, стружкой и поверхностью резания составляет незначительную часть от номинальной площади контакта. В результате на этих участках возникают высокие удельные давления и высокая температура резания, то есть происходит столкновение химически чистых материалов, в результате чего возникают мостики схватывания. При перемещении инструмента по детали происходит непрерывное разрушение и обновление мостиков схватывания. Разрушение происходит под поверхностью контакта в обрабатываемом материале. Циклическое нагружение поверхностного слоя инструмента приводит к локальному разрушению инструмента. Чем меньше отношение твердости инструментального материала к твердости обрабатываемого, тем сильнее износ инструмента.

**Диффузионный износ.** При температуре выше 800–850°C происходит диффузное растворение инструментального материала в обрабатываемом. Различные компоненты твердого сплава диффундируют в обрабатываемый материал с разной скоростью. Наиболее быстро диффундирует углерод, медленнее – вольфрам, кобальт, титан. Интенсивность протекания диффузионных процессов заметно уменьшается при применении инструментальных материалов, химически инертных относительно обрабатываемого материала.

**Окисный износ.** При температурах резания 700–800°C кислород воздуха вступает в химическую реакцию с кобальтовой фазой твердого сплава и карбидами вольфрама и титана, причем наиболее сильно окисляется кобальт. Продуктами окисления являются окислы  $Co_3O_4$  и  $WO_3$ , твердость продуктов окисления в 40–60 раз ниже твердости самых сплавов. В результате размягчения кобальтовой фазы ослабляются связи между зернами карбидов вольфрама и титана. Однокарбидные сплавы окисляются сильнее, чем двухкарбидные. С увеличением содержания кобальта в твердом сплаве интенсивность и скорость окисления возрастает.

Кроме постепенного изнашивания инструмент может выходить из строя вследствие разрушения его режущей части, которое может быть хрупким и пластическим.

**Хрупкое разрушение** происходит под действием наибольших напряжений растяжения и является следствием зарождения и развития трещин. Необходимо различать выкрашивание и сколы. Выкрашивание проявляется в отделении мелких частиц, а сколы представляют собой отделение сравнительно больших объемов инструментальных материалов (рис. 5.3). Сколы определяются размерами клина режущего инструмента и зависят от величины переднего угла и угла затачивания.

При фрезеровании во время холостого хода зуба температура контактных поверхностей снижается до 1/3 температуры резания. В результате резкого снижения температуры поверхностные слои твердого сплава оказываются менее нагретыми, чем внутренние, поэтому на контактных поверхностях появляются напряжения растяжения, а при резании возникают сжимающие напряжения. Изменение знака напряжений имеет циклический характер и после

определенного числа циклов в твердом сплаве появляются усталостные трещины, которые располагаются перпендикулярно главному лезвию инструмента. Двухкарбидные сплавы наиболее склонны к образованию усталостных трещин.

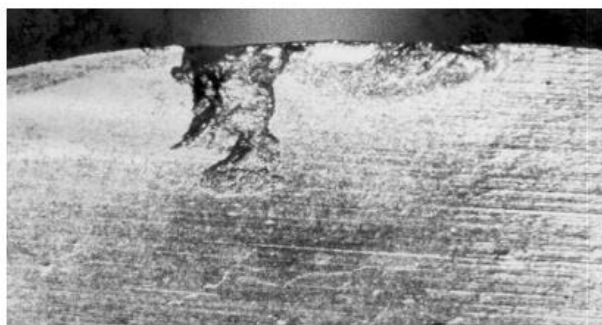
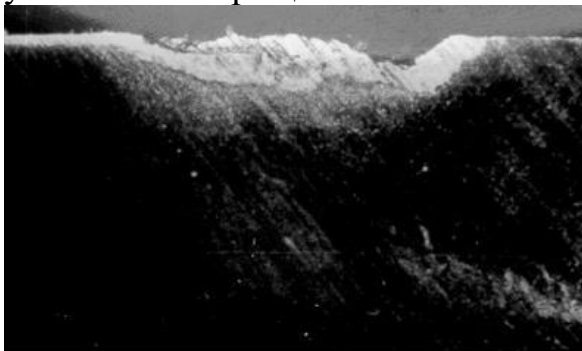


Рисунок 5.3 – Хрупкое разрушение режущей части инструментов

**Пластическое разрушение** характеризуется течением тонких слоев инструментального материала вдоль задней поверхности. Пластическое течение инструментального материала происходит при определенных температурах и давлениях (рис. 5.4).

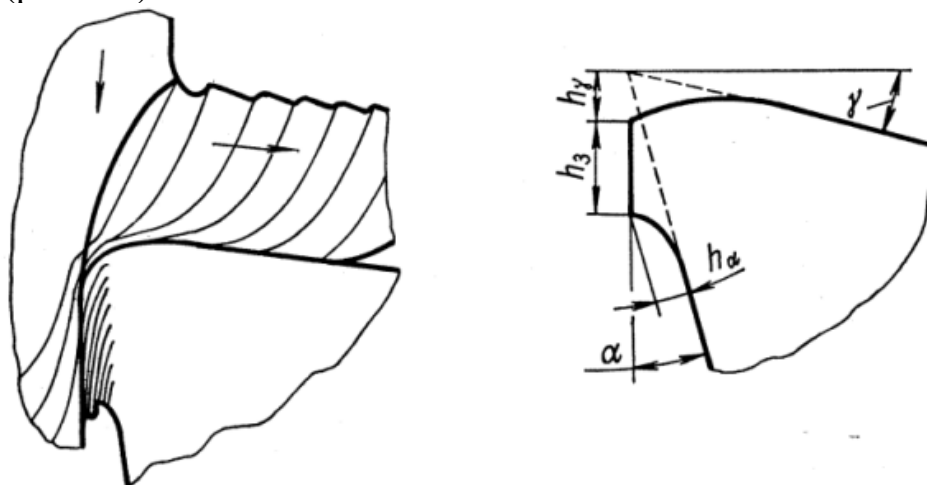


Рисунок 5.4 – Пластические разрушения режущей части инструментов

### 5.3 Стойкость режущего инструмента

**Стойкость режущего инструмента** – его способность сохранять режущие свойства до критериального износа. Время работы режущего инструмента до критериального износа называется *периодом стойкости*  $T$  и измеряется в минутах. Период стойкости зависит от рода, механических и теплофизических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрических параметров инструмента, режима резания и тому подобное. На рис. 5.5 показана связь между периодом стойкости  $T$  и скоростью резания  $v$ .

В современном производстве оптимальная скорость резания является компромиссом между производительностью и периодом стойкости инструмента. Экспериментально установлено, что повышение скорости резания приводит к снижению периода стойкости и увеличению расходов на режущий инструмент, и наоборот.

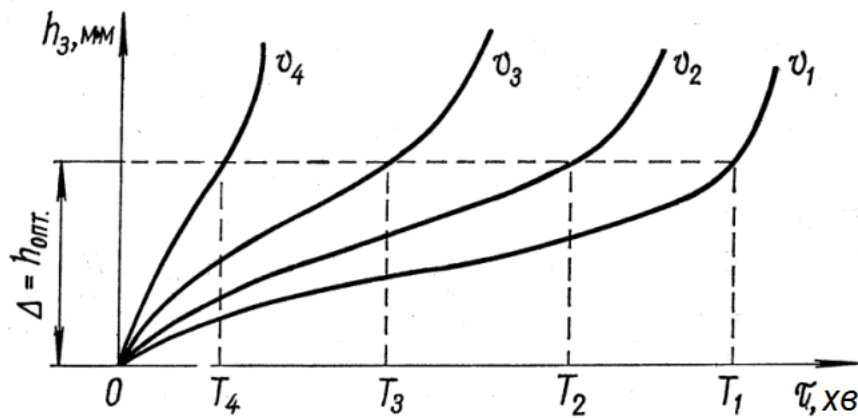


Рисунок 5.5 – Зависимость износа режущего инструмента от скорости резания

Практический интерес представляет математическая зависимость

$$T = f(v).$$

Ее получают, принимая равные или оптимальные величины износа (рис. 5.6). Зависимость периода стойкости от скорости резания описывается степенной функцией (участки *аб*, *вг*)

$$T = \frac{C_1}{v^m}, \quad (5.1)$$

где  $C$  – постоянная, зависящая от обрабатываемого и инструментального материалов, геометрических параметров инструмента, применяемой смазочно-охлаждающей жидкости, глубины резания и подачи;  $m$  – показатель относительной стойкости, который находят из прочностных опытов.

Связь между скоростью резания и периодом стойкости при обработке чугуна инструментами из быстрорежущих сталей и однокарбидных твердых сплавов выражается монотонно ниспадающей кривой 1.

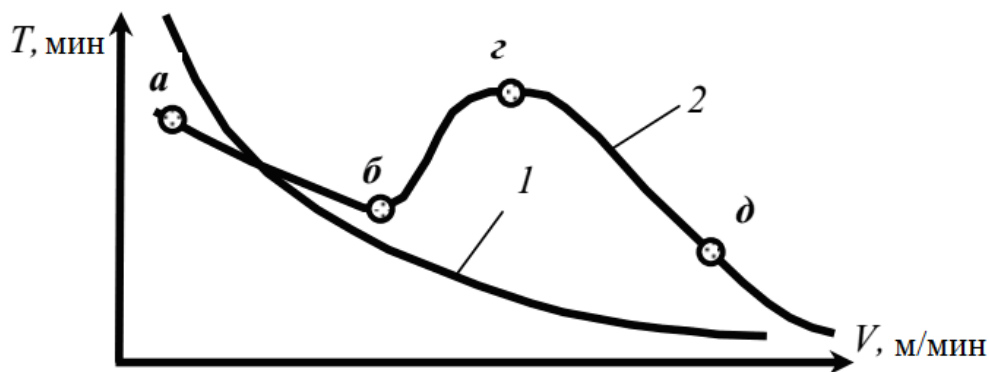


Рисунок 5.6 – Зависимость  $T = f(v)$ : 1 – кривая для не образующих нароста материалов, 2 – кривая для наростообразующих материалов

При резании чугунов показатель  $m$  меньше, чем при резании сталей; при использовании инструмента, оснащенного двухкарбидным сплавом, показатель  $m$  больше, чем при инструменте из однокарбидного сплава. По мере увеличения переднего угла инструмента и допустимой величины износа задней поверхности показатель  $m$  уменьшается, а при увеличении толщины срезаемого слоя – растет.

Для проходных и расточных резцов из быстрорежущей стали при обработке углеродистой конструкционной стали и высокопрочного чугуна с охлаждением  $m = 0,125$ , а при обработке серого чугуна  $m = 0,1$ . Для резцов, оснащенных пластинами из твердых сплавов, при обработке углеродистой конструкционной стали и высокопрочного чугуна  $m = 0,2$ , а при обработке серого чугуна и закаленных сталей  $m = 0,1$ .

Из формулы 5.1 получаем

$$v \cdot T^m = C \Rightarrow v_1 \cdot T_1^m = v_2 \cdot T_2^m = \dots = v_n T_n^m = const.$$

Отсюда имеем

$$T_2 = T_1 \cdot \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\frac{1}{m}} \text{ или } v_2 = v_1 \cdot \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^m.$$

Таким образом, зная стойкость  $T_1$  при скорости  $v_1$  в конкретных условиях обработки, можно определить, как изменится период стойкости  $T_2$ , если скорость резания изменить до  $v_2$  или определить скорость резания  $v_2$  при известном изменении  $T_2$ . Данные эмпирические формулы могут дать неверные результаты при пересчете скорости резания с малых значений периода стойкости на очень большие ( $T > 500$  мин), то есть при переходе на малые скорости резания.

#### 5.4 Факторы, влияющие на период стойкости режущего инструмента

Взаимосвязь между периодом стойкости, подачей и глубиной резания определяется зависимостью

$$T = \frac{C}{v^m \cdot t^q \cdot S^p}.$$

При обработке любых материалов  $m > p > q$  (рис. 5.7), то есть больше всего влияет на период стойкости скорость резания, подача и потом уже глубина резания.

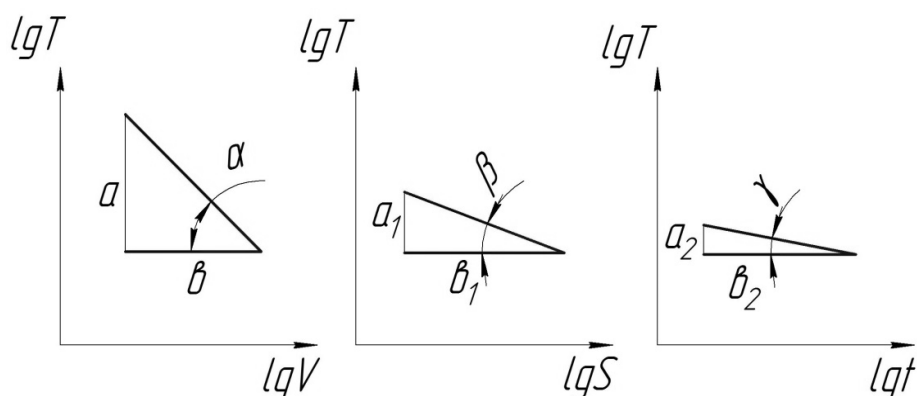


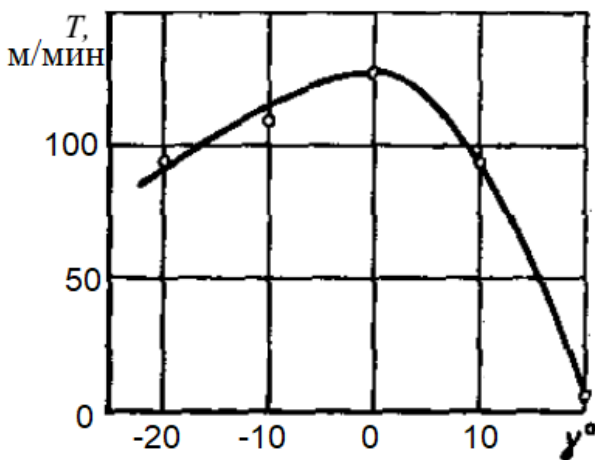
Рисунок 5.7 – Влияние параметров резанья на период стойкости инструмента

Интенсивность влияния  $v$ ,  $S$  и  $t$  на период стойкости такая же, как и на температуру резания. Для определения влияния толщины срезаемого слоя и ширины резанья используется зависимость (при неизменном главном угле в плане  $\varphi = const$ )

$$T = \frac{C}{v^m \cdot b^q \cdot a^p}$$

Увеличение *толщины срезаемого слоя* уменьшает период стойкости сильнее, чем равное увеличение ширины срезаемого слоя. Таким образом, необходимо стремиться работать с возможно большим отношением  $b/a$ .

С увеличением *переднего угла*  $\gamma$  условия стружкообразования облегчаются, уменьшается работы деформации и трения на передней поверхности, сила резания и количество выделяемого тепла в зоне резания. Уменьшение тепловыделения способствует повышению периода стойкости. Однако, увеличение переднего угла приводит при постоянном заднем угле к уменьшению угла заострения  $\beta_k$  клина инструмента. С уменьшением угла  $\beta_k$  теплоотвод ухудшается, а прочность падает, что ведет к снижению периода стойкости инструмента.



Уменьшение размеров клина особенно нежелательно для твердосплавных инструментов, хрупкая прочность которых низка. При малых углах  $\gamma$  наблюдаются микро- и макросколы вершины клина и главного лезвия инструмента. Таким образом, существует оптимальное значение переднего угла, которое обеспечивает максимальный период стойкости инструмента (рис. 5.8).

Рисунок 5.8 – Влияние переднего угла на период стойкости

Чем выше прочность и твердость обрабатываемого материала, тем большее количество тепла выделяется, поэтому с увеличением предела прочности и твердости обрабатываемого материала оптимальный передний угол  $\gamma$  уменьшается. Итак, оптимальный передний угол  $\gamma$  инструментов из быстрорежущих сталей больше, чем из твердосплавных. Для инструментов из быстрорежущих сталей

$$\gamma_{opt} = 42 - \frac{55}{K_{Lc}}$$

где  $K_{Lc}$  – стандартный коэффициент усадки стружки, определенный при следующих условиях: передний угол  $\gamma = 10^\circ$ ;  $a = 0,5$  мм;  $v = 10$  м/мин.

Для инструментов с пластинками из твердого сплава:

– при  $\sigma_s < 80$  МПа

$$\gamma_{opt} = \frac{2,5 \cdot 10^{15}}{\sigma_s^8};$$

– при  $\sigma_s = 80 \dots 120$  МПа

$$\gamma_{opt} = 5 \cdot 10^{-16} \cdot \sigma_s^8;$$

– при обработке чугунов

$$\gamma_{opt} = 17,2 - 0,066HB.$$

При увеличении *предела прочности и твердости* обрабатываемого материала величина положительного оптимального переднего угла уменьшается, а отрицательного – увеличивается. Отрицательный передний угол делают только для инструментов из твердых сплавов, минералокерамики и сверхтвердых материалов.

При варьировании *заднего угла  $\alpha$*  меняются величины сил, действующих на задней поверхности режущего клина инструмента, ширина площадки контакта по задней поверхности и интенсивность ее износа. От величины заднего угла зависят величина радиуса скругления режущего клина и прочность режущей части инструмента вследствие изменения угла заострения. Сначала с увеличением  $\alpha$  уменьшается сила трения на задней поверхности, которая уменьшает износ инструмента (рис. 5.9).

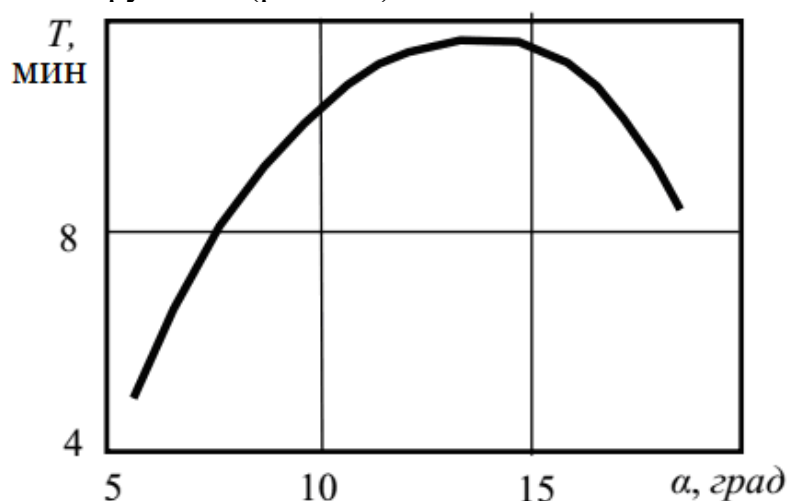
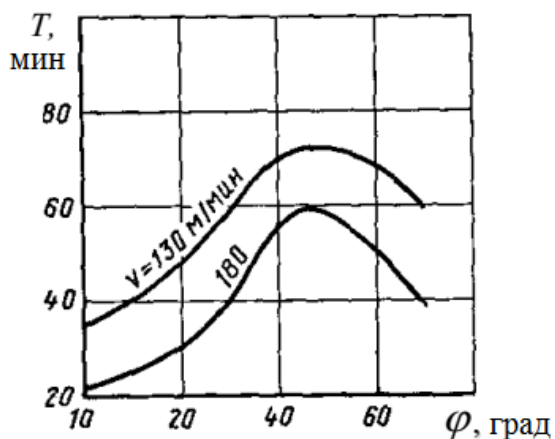


Рисунок 5.9 – Влияние заднего угла на период стойкости инструмента

При дальнейшем увеличении  $\alpha$  уменьшается  $\beta_k$ , что снижает прочность клина, ухудшает отвод тепла в тело инструмента и уменьшает период стойкости. С увеличением предела упругости материала обрабатываемой детали величина оптимального заднего угла становится больше. Чем меньше  $\alpha$ , тем больше изнашивается задняя поверхность инструмента, поэтому для уменьшения ширины площадки износа на задней поверхности задний угол должен быть увеличен:  $\alpha_{opt} = 6-8^\circ$  – для проходных резцов,  $\alpha_{opt} = 10-12^\circ$  – для отрезных резцов,  $\alpha_{opt} = 16^\circ$  – для торцевых фрез с мелким зубом, а для дисковых фрез  $\alpha_{opt} = 30^\circ$ , поскольку  $S_z < 0,01$  мм/зуб.

При увеличении *главного угла в плане  $\varphi$*  отношение  $b/a$  уменьшается, температура резания растет, стойкость инструмента падает. При недостаточной жесткости технологической системы применение малых углов в плане может не только снизить точность обработки, но и уменьшить период стойкости инструмента вследствие возникновения вибраций. На рис. 5.10 показано влияние главного угла в плане на период стойкости твердосплавного резца при точении с невысокой жесткостью технологической системы.

Главный угол в плане меняет соотношение между шириной и толщиной срезаемого слоя. При увеличении  $\varphi$



отношение  $b/a$  уменьшается и достигает минимума для  $\varphi = 90^\circ$ . Вследствие уменьшения отношения  $b/a$  температура резания растет, стойкость инструмента падает. Таким образом, для повышения периода стойкости инструмента необходимо, чтобы инструмент имел как можно меньший главный угол в плане.

Рисунок 5.10 – Влияние главного угла в плане на период стойкости инструмента

Однако это приводит к тому, что при обточке деталей возникает их прогиб и снижается точность обработки. Кроме того, при уменьшении жесткости технологической системы минимально допустимую величину угла  $\varphi$  необходимо увеличивать. При недостаточной жесткости технологической системы применение малых главных углов в плане может не только снизить точность обработки, но и уменьшить период стойкости инструмента вследствие возникновения вибраций. Появление вибраций особенно опасно при работе твердосплавным инструментом, который имеет пониженную прочность. Уменьшение периода стойкости резца для углов  $\varphi \leq 40^\circ$  вызвано увеличением амплитуды колебаний тем больше, чем меньшее значение имеет главный угол в плане.

С увеличением жесткости и твердости обрабатываемого материала материала период стойкости уменьшается. С увеличением твердости материала необходимо увеличить жесткость режущего инструмента и подобрать нужную геометрию. При обработке твердых и хрупких материалов необходимо использовать прочные инструменты: для полустальной обработки стали – Т15К6, для черновой обработки – Т5К10 (рис. 5.11): от  $V_1$  до  $V_2$  прочность и вязкость твердого сплава увеличиваются, уменьшается адгезионный износ, поэтому стойкость инструмента увеличивается.

Прерывистое резание характерно для долбления, строгания и фрезерования. Стойкость инструментов из быстрорежущих сталей практически не зависит от того, в каких условиях работает инструмент. Основной причиной снижения стойкости твердосплавных инструментов при прерывистом резании является появление микро- и макротрещин, в которых концентрируется износ передней и задней поверхностей. Возникновение и развитие трещин связано с циклическим охлаждением контактных поверхностей инструмента при холостом ходе лезвий. Все то, что усиливает охлаждение передней и задней поверхностей при холостом ходе, увеличивает напряжения растяжения в поверхностных слоях твердого сплава, приводя к снижению стойкости режущего инструмента.

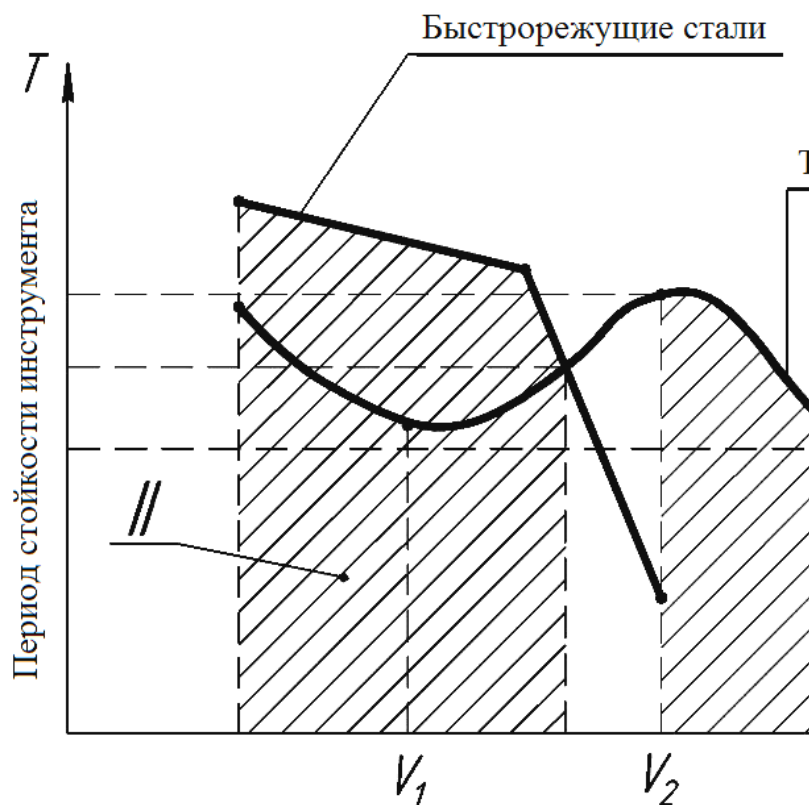


Рисунок 5.11 – Влияние инструментального материала на период стойкости инструмента: *I* – область целесообразного использования твердого сплава; *II* – область целесообразного использования быстрорежущих сталей

Применение СОЖ при торцевом фрезеровании снижает период стойкости твердосплавной фрезы, напротив, подогрев зубьев газовой горелкой способствует повышению стойкости. Период стойкости фрез зависит от продолжительности рабочего и холостого ходов. Если длина рабочего хода небольшая, то поверхностные слои инструментального материала не успевают прогреться и напряжения растяжения при холостом ходе значительно меньше, поэтому стойкость инструмента выше.

Стойкость инструмента при прерывистом резании определяется не только амплитудой изменения напряжений в поверхностном слое твердого сплава, но и числом этих изменений. Снижение стойкости инструмента при увеличении времени холостого хода происходит тем сильнее, чем меньшую прочность имеет инструментальный материал. Поэтому чем больше продолжительность холостого хода, тем более прочный твердый сплав необходимо использовать.

С увеличением *радиуса при вершине резца* улучшается теплоотвод и упрочняется вершина резца. Но при этом увеличиваются силы, отжимающие резец и увеличивается коэффициент усадки стружки.

### 5.5 Упрочнение (наклеп) в зоне резания

В процессе преобразования срезанного слоя в стружку благодаря пластической деформации происходит упрочнение материала (наклеп) и упрочняется стружка, особенно ее контактный слой. В случае образования

нароста контактный слой упрочняется еще больше, примерно в 2...3 раза по отношению к микротвердости обрабатываемого материала. Упрочнение характеризуется глубиной  $h$  и степенью наклепа  $H$  обработанной поверхности (рис. 5.12)

$$H = \frac{H_2 - H_1}{H_1} \cdot 100,$$

где  $H_2$  – микротвердость обработанной поверхности;  $H_1$  – микротвердость обрабатываемой заготовки.

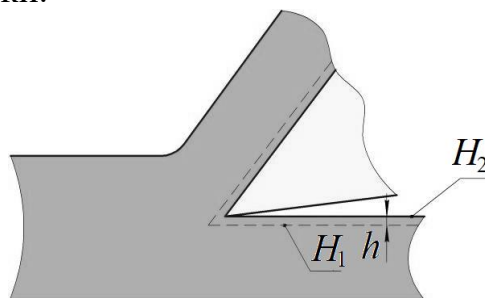


Рисунок 5.12 – Наклеп в зоне резания

С увеличением скорости резания происходит некоторое снижение глубины и степени наклепа, что связано с уменьшением зоны первичной пластической деформации. С увеличением подачи или толщины слоя срезаемая глубина и степень наклепа увеличиваются, что связано с увеличением сил резания.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Какие критерии используются для оценки износа режущего инструмента?
2. Дайте краткую характеристику каждого из видов износа режущего инструмента.
3. Назовите виды разрушения режущей части инструмента. Опишите особенности каждого из видов разрушения.
4. Как механические характеристики инструментального материала влияют на период стойкости инструмента?
5. Поясните причины возникновения наклепа в зоне резания и его влияние на процесс резания.

## ТЕМА 6. ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

### 6.1 Характеристики качества поверхности детали

*Качество детали* – свойства ее поверхностного слоя, которые формируются в результате воздействия на поверхность одного или нескольких последовательно применяемых технологических методов обработки. Качество обработанной поверхности характеризуется ее шероховатостью и волнистостью, а также физико-механическими свойствами поверхностного слоя, такими как наклеп и остаточные напряжения.

*Шероховатость поверхности* – совокупность неровностей с относительно малым шагом, образующих рельеф поверхностей детали и рассматриваемых на определенной (базовой) длине.

*Волнистость поверхности* – совокупность выступов и впадин, периодически чередующихся и изменяющихся примерно по синусоидальному закону. Расстояние между соседними выступами или впадинами превышает принятую при измерении шероховатости базовую длину.

Поверхность детали также характеризуется макрогеометрией, микрогеометрией и субмикрогеометрией. К макрогеометрии можно отнести неровности на больших участках поверхности, к микрогеометрии относятся отклонения на участке примерно 1...2 мм (шероховатость), а к субмикрогеометрии – неровности, обусловленные несовершенством внутреннего строения металла. Субмикроскопический рельеф рассматривается на участках поверхностей от одного до нескольких микрометров.

Шероховатость оценивается:

1. Критерием  $R_z$  или высотой неровностей (рис. 6.1)

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 H_{i\max} + \sum_{i=1}^5 H_{i\min} \right), \quad (6.1)$$

где  $H_{i\max}$  и  $H_{i\min}$  – соответственно максимальные и минимальные отклонения профиля в пределах базовой длины.

2. Арифметическим отклонением профиля

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

где  $y_i$  – отклонение профиля неровностей от средней линии.

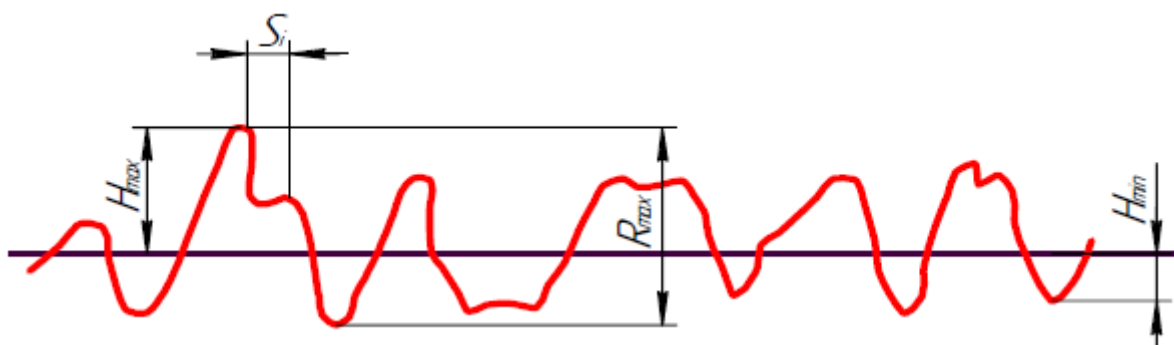


Рисунок 6.1 – Схема к определению шероховатости поверхности

## 6.2 Влияние режима резанья и параметров инструмента на качество обработки поверхности

Наибольшее влияние на качество обработки оказывают режимы резания и геометрические параметры инструмента. Основные причины образования шероховатости поверхности:

- геометрия и кинематика процесса резания;
- упругие и пластические деформации;
- вибрации.

При обработке поверхностей резцом с острозаточенной вершиной (рис. 6.2, а)

$$S_0 = ac + cb. \quad ac = \frac{ec}{\operatorname{tg}\varphi_1}, \quad cb = \frac{ec}{\operatorname{tg}\varphi} \Rightarrow S_0 = h \cdot \left( \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi_1} + \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi} \right),$$

а высота микронеровностей

$$h = S_0 \cdot \frac{\operatorname{tg}\varphi_1 \cdot \operatorname{tg}\varphi}{\operatorname{tg}\varphi_1 + \operatorname{tg}\varphi}. \quad (6.2)$$

Как следует из формулы (6.1), чистовую обработку следует вести на малых подачах и резцом с минимальными углами в плане. В связи с этим В.А. Колесовым был предложен резец, который снимает остающиеся гребешки дополнительной режущей кромкой с углом  $\varphi = 18^\circ$  и выполняет калибровку поверхности участком режущей кромки с  $\varphi = 0^\circ$ . Причем длина этого участка превышает значение подачи  $S_0$  и составляет примерно  $1,2 \cdot S_0$ . Высококачественное резанье с применением таких резцов получило название *силового резанья*.

При обработке поверхностей резцом с радиусом вершины (рис. 6.2, б)

$$h = r - of = r - \sqrt{r^2 - \frac{S_0^2}{4}}; \quad (r - h)^2 = r^2 - \frac{S_0^2}{4}; \quad r^2 - 2rh + h^2 = r^2 - \frac{S_0^2}{4},$$

а высота неровностей

$$h = \frac{S_0^2}{8r}. \quad (6.3)$$

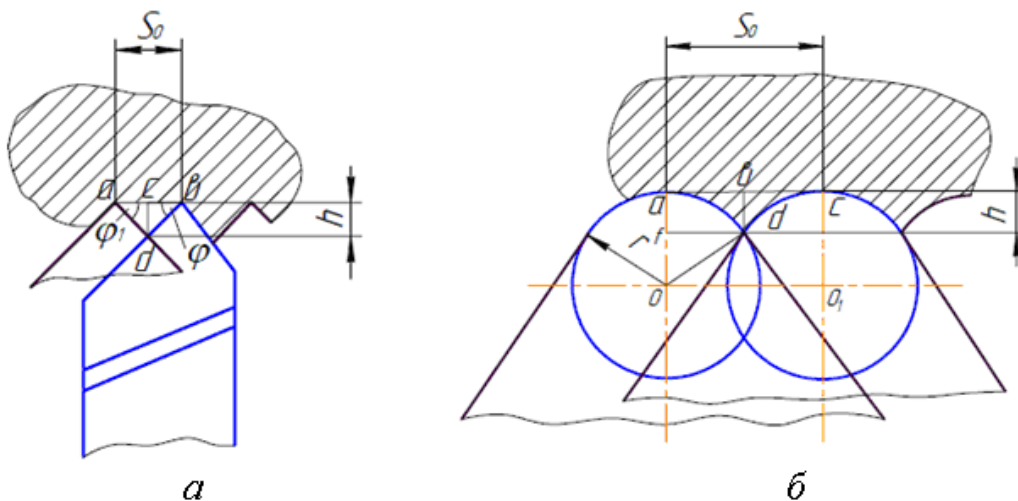


Рисунок 6.2 – Высота микронеровностей обработанной поверхности при точении: а – резцом с острозаточенной вершиной; б – резцом с радиусом вершины

Таким образом, для снижения шероховатости надо стремиться к уменьшению подачи и к увеличению радиуса при вершине резца. Приведенные выше формулы неточны, так как не учитывают процессов, протекающих на передней и задней поверхностях инструмента. Реальное значение  $R_z$  с учетом пластического деформирования металла

$$R_z = R_{z\text{ позр}} + \Delta R_z,$$

где  $\Delta R_z = \Delta R_{zn1} + \Delta R_{z\text{ ynp}} + \Delta R_{z3}$  – прирост высоты неровностей;  $R_{z\text{ ynp}} = 0,03 \cdot (\Delta R_{zn1} + \Delta R_{z3})$  – прирост от трения по задней поверхности.

Из кинематических параметров обработки наибольшее влияние на высоту неровностей имеет скорость резания (рис. 6.3, а). С увеличением скорости резания высота неровностей снижается. В диапазоне скоростей, при котором образуется нарост, характерно увеличение величины неровностей.

При увеличении подачи высота неровностей возрастает (рис. 6.3, б). При малых подачах основное влияние имеют не геометрические факторы, а пластическая и упругая деформации, скорость резания и радиус при вершине резца. При больших значениях подачи на шероховатость оказывают влияние геометрические факторы (следы движения инструмента), а глубина резания почти не влияет на шероховатость обработанной поверхности.

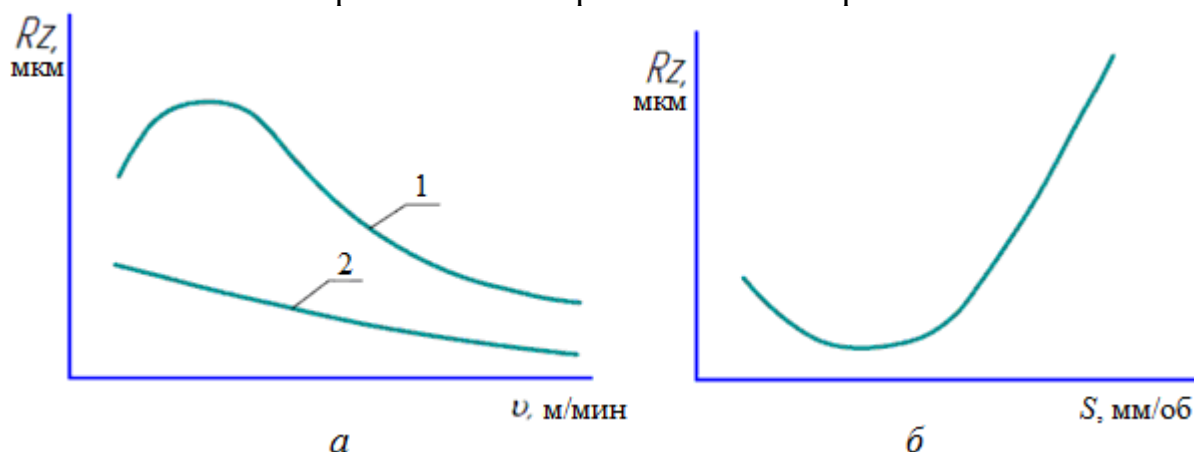


Рисунок 6.3 – Зависимость шероховатости обработанной поверхности детали от скорости резания (а) и подачи (б): 1 – резание с наростом, 2 – резание без нароста

Из геометрических параметров инструмента наибольшее влияние на шероховатость поверхности, как следует из формул (6.2) и (6.3), оказывает угол в плане  $\varphi$  и радиус закругления режущих кромок. С увеличением  $\varphi$  шероховатость несколько возрастает, а при уменьшении  $\varphi_1$  микронеровности уменьшаются. Передний угол  $\gamma$  также влияет на шероховатость, поскольку от него зависит образование нароста. Поэтому изменение  $\gamma$  особенно заметно влияет на шероховатость обработанной поверхности деталей из углеродистых конструкционных сталей в диапазоне скоростей 20... 40 м/мин – с уменьшением  $\gamma$  высота нароста увеличивается.

Задний угол  $\alpha$  влияет на шероховатость значительно меньше, чем  $\gamma$ . Наиболее сильно  $\alpha$  оказывает влияние в тех случаях, когда обработанная

поверхность образуется главной режущей кромкой, например, при протягивании.

На величину шероховатости также существенно влияет структура и твердость обрабатываемого металла (наличие феррита, перлита) из-за образования нароста, износ инструмента, микронеровности режущей кромки инструмента, жесткость технологической системы (вибрации), присутствие смазочно-охлаждающие жидкости, использованием которой можно уменьшить шероховатость в пределах до одного класса).

### **6.3 Влияние условий обработки на физико-механические свойства поверхностного слоя детали**

При обработке заготовок резанием в результате воздействия на поверхностный слой силового и температурного полей в нем возникают пластические деформации и создаются внутренние остаточные напряжения. Поверхностная пластическая деформация приводит к появлению наклепа (упрочнения) поверхностного слоя. Наклеп обычно характеризуется микротвердостью и рентгенографическими показателями (расширение или размытие интерференционных линий).

Основными причинами возникновения остаточных напряжений являются:

- наличие пластической деформации, приводит к укреплению и изменения физических свойств металла;
- извлечение кристаллических зерен металла, которые при этом испытывают упругопластическую деформацию растяжения в направлении резания;
- нагрев и охлаждение детали при резании, приводящие к развитию остаточных напряжений растяжения во внешних слоях и сжатия в нижних слоях металла;
- структурные изменения в металле.

При различных методах и режимах механической обработки, а также в зависимости от геометрии инструмента степень и глубина распространения наклепа различны (от 30 до 200 мкм). С увеличением подачи и глубины резания наклеп поверхностного слоя увеличивается (рис. 6.4, *а*), также он наблюдается при переходе от положительных значений передних углов лезвия к отрицательным, что объясняется ростом усилий резания.

С увеличением скорости резания выделяется больше теплоты и уменьшается продолжительность силового воздействия на металл, что способствует упрочнению поверхностного слоя и, следовательно, снижению степени наклепа и микротвердости (рис. 6.4, *б*). Значительное повышение наклепа наблюдается при затуплении режущего инструмента, а также при встречном фрезеровании по сравнению с попутным.

При абразивной обработке в целом сохраняются те же закономерности возникновения наклепа, что и при работе лезвийного инструмента. Он растет с увеличением глубины и скорости шлифования, а также размера и радиуса закругления абразивных зерен.

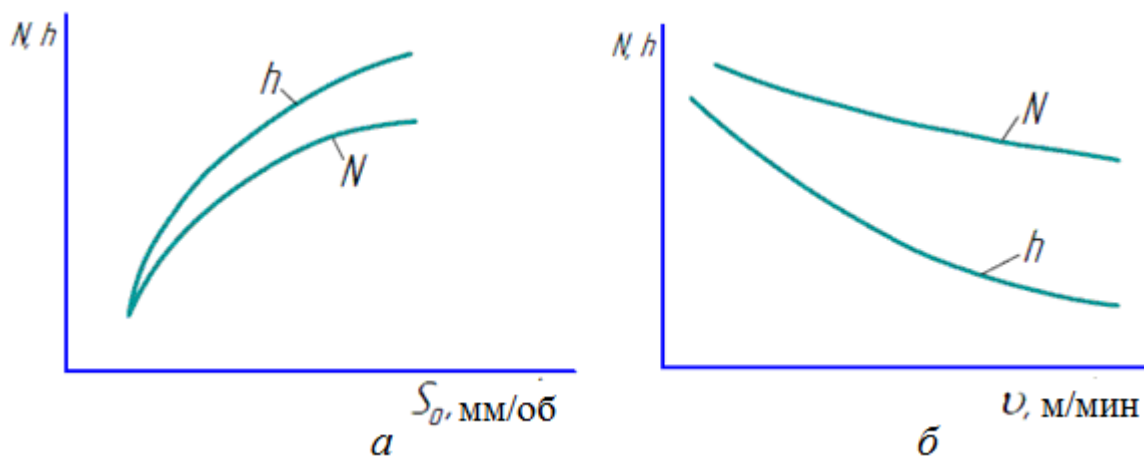


Рисунок 6.4 – Зависимость степени  $N$  и глубины  $h$  наклепа от подачи ( $a$ ) и скорости резания ( $b$ )

Внутренние остаточные напряжения поверхностного слоя также зависят от вида обработки, режимов резания, свойств металла и других факторов. Влияние режимов обработки и геометрии инструмента на окончательные напряжения определяются физико-механическими свойствами обрабатываемого металла. Например, при обработке пластичных материалов увеличение скорости резания и подачи приводит к увеличению остаточных растягивающих напряжений. С уменьшением переднего угла  $\gamma$  лезвия инструмента остаточные напряжения сжатия растут, а по мере затупления инструмента растут остаточные напряжения растяжения.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Какие величины используют для описания качества обработанной поверхности?
2. Какие параметры оказывают наибольшее влияние на качество обработки поверхности?
3. Как влияет на качество обработки скорость резания и глубина подачи?
4. В чем особенность стлового резания металлов?
5. Вследствие чего имеет место возникновение наклепа при обработке металлов?

## ТЕМА 7. ОСОБЕННОСТИ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

### 7.1 Технологическая скорость резания

Скорость резания, определяемая по формуле

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

является чисто кинематической величиной. В технологических расчетах используется скорость резания, допускаемая режущими свойствами инструмента, то есть скорость при заданном периоде стойкости режущего инструмента –  $v_m$ .

На скорость  $v_m$  влияют следующие основные факторы:

- период стойкости инструмента;
- глубина резания и подача;
- физико-механические свойства обрабатываемого материала (ОМ);
- материал режущей части инструмента (ИМ);
- конструктивные и геометрические параметры инструмента;
- присутствие смазочно-охлаждающие среды.

С учетом указанных выше факторов эмпирически выведены формулы расчета  $v_m$  для различных методов обработки. Скорость резания, допускаемая резцом при точении, равна

$$v_m = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot S_o^y} \cdot K_v, \quad (7.1)$$

где  $C_v$  – постоянная, зависящая от условий обработки;  $T$  – период стойкости резца, мин;  $t$  – глубина резания, мм;  $S_o$  – подача на оборот, мм/об;  $K_v$  – общий поправочный коэффициент, учитывающий условия резания, которые не вошли в формулы в явном виде.

Показатель степени  $x$  в (7.1) всегда меньше показателя степени  $y$ , что отражает большее влияние подачи на  $v_m$ .

Общий поправочный коэффициент  $K_v$  является произведением частных поправочных коэффициентов

$$K_v = K_{Mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv} \cdot K_{Tu} \cdot K_{Tc} \cdot K_{\varphi} \cdot K_{\varphi_1} \cdot K_r,$$

где  $K_{Mv}$  – коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки;  $K_{nv}$  – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки;  $K_{uv}$  – коэффициент, учитывающий материал режущей части резца;  $K_{Tu}$  – коэффициент изменения стойкости в зависимости от числа одновременно работающих инструментов;  $K_{Tc}$  – коэффициент изменения стойкости в зависимости от числа одновременно обслуживаемых станков;  $K_{\varphi}$  – коэффициент, учитывающий величину угла  $\varphi$ ;  $K_{\varphi_1}$  – коэффициент, учитывающий влияние угла  $\varphi_1$ ;  $K_r$  – коэффициент, учитывающий радиус закругления при вершине резцов.

С повышением прочности и твердости обрабатываемый материал все сильнее сопротивляется резанию, больше выделяет тепла, что приводит к более интенсивному износу резца. Поэтому необходимо снижать  $v_m$  – эту функцию

выполняет коэффициент  $K_{Mv}$ , который рассчитывается в зависимости от обрабатываемого материала:

– для сталей

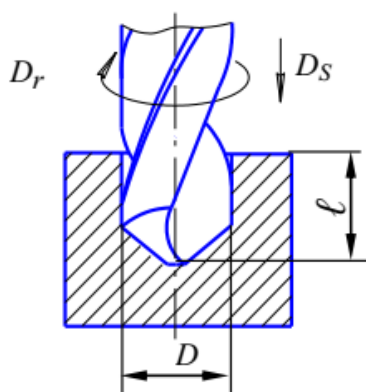
$$K_{Mv} = \left( \frac{750}{\sigma_s} \right)^n;$$

– для серых чугунов

$$K_{Mv} = \left( \frac{190}{HB} \right)^n.$$

## 7.2 Скорость резания при сверлении, зенкеровании и развертывании

Условия резания при сверлении менее благоприятны, чем при точении. Затруднен отвод стружки, поскольку он ограничен стенками отверстия и винтовыми канавками сверла. С увеличением глубины отверстия  $l$  ухудшаются



условия стружкообразования, растут силы трения, деформация обрабатываемого металла и температура резания. Смазочно-охлаждающая среда действует менее эффективно, чем при точении, так как ее подвод в зону резания также затруднен.

Поэтому  $v_m$  при сверлении с одинаковой толщиной и шириной среза меньше, чем при точении. Кроме общих факторов на  $v_m$  при сверлении влияет диаметр сверла и глубина сверления.

Рисунок 7.1 – Условия резания при сверлении

Допустимая скорость резания при сверлении рассчитывается по эмпирической формуле

$$v_m = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot S_o^y} \cdot K_v, \quad (7.2)$$

где  $C_v$  – постоянный коэффициент, зависящий от обрабатываемого, инструментального материалов и условий сверления;  $D$  – диаметр сверла, мм;  $T$  – период стойкости сверла, зависящий от его диаметра, обрабатываемого и инструментального материалов, мин;  $S_o$  – подача, выбираемая в зависимости от диаметра сверла и свойств обрабатываемого материала;  $K_v$  – общий поправочный коэффициент, учитывающий фактические условия резания.

Характерной особенностью формулы (7.2) является наличие в числителе диаметра. С увеличением  $D$  повышается прочность и жесткость сверла и улучшается теплоотвод, что позволяет повысить скорость резания.

Общий поправочный коэффициент  $K_v$ , учитывающий фактические условия резания, можно найти по формуле

$$K_v = K_{Mv} \cdot K_{lv} \cdot K_{uv},$$

где  $K_{Mv}$  – коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого материала;  $K_{uv}$  – коэффициент, учитывающий свойства инструментального материала;  $K_{lv}$  – коэффициент, учитывающий глубину сверления и зависящий от отношения глубины обрабатываемого отверстия к диаметру сверла.

Допустимая скорость резания при зенкерования и развертывание определяется по эмпирической формуле

$$v_m = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_o^y} \cdot K_v, \text{ м/мин.} \quad (7.3)$$

Эта формула отличается от аналогичной для сверления только наличием в знаменателе глубины резания в степени  $x$ . Показатель степени  $x$  при глубине резания всегда меньше показателя степени  $y$  при подаче.

### 7.3 Скорость резания при фрезеровании

Экспериментальные исследования показывают, что в общем случае скорость резания, допускаемую режущими свойствами фрезы, можно рассчитать по формуле

$$v_m = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot Z^p \cdot \omega^n} \cdot K_v, \quad (7.4)$$

где  $C_v$  – постоянный коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемого и инструментального материалов и условия фрезерования;  $D$  – диаметр фрезы, мм;  $T$  – период стойкости, зависящий от типа фрезы (цилиндрическая, торцевая, дисковая, концевая), ее диаметра и конструкции, мин;  $t$  – глубина резания, мм;  $B$  – ширина фрезерования, измеряемая в направлении, параллельном оси фрезы, мм;  $Z$  – число зубьев фрезы;  $\omega$  – угол наклона зуба фрезы или винтовой канавки для выхода стружки;  $K_v$  – общий поправочный коэффициент, учитывающий условия фрезерования;  $S_z$  – подача на один зуб, мм/зуб.

Параметр  $S_z$  выбирается в зависимости от мощности станка, типа и конструкции фрезы, обрабатываемого и инструментального материалов, вида фрезерования, жесткости системы «станок-приспособление-инструмент-деталь».

Общий поправочный коэффициент  $K_v$ , учитывающий фактические условия фрезерования, вычисляются по формуле

$$K_v = K_{Mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv},$$

где  $K_{Mv}$  – коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки;  $K_{nv}$  – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки;  $K_{uv}$  – коэффициент, учитывающий свойства инструментального материала.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. В чем необходимость введения технологической скорости резания?
2. Какие факторы наиболее влияют на величину технологической скорости резания?
3. Какие факторы ограничивают технологическую скорость резания при сверлении?

## ТЕМА 8. ПРОЦЕССЫ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

### 8.1 Абразивный инструмент и абразивные материалы

**Абразивный инструмент** – инструмент, предназначенный для механической обработки изделий и изготовленный из абразивных материалов. К абразивным инструментам относятся шлифовальные круги, сегменты, головки, бруски, коронки, карандаши, применяемые для обработки поверхностей металлов, стекла, камня, дерева, резины, кожи, мрамора и различных искусственных материалов, а также для бурения горных пород.

Абразивный инструмент применяется в шлифовальных, притирочных и доводочных станках, которые составляют около 25% современного станочного парка. Абразивный инструмент используется при обдирке и удалении большого количества материала, для получения особо точных и тонко обработанных поверхностей при тонкой шлифовке, доводке и притирке, а также для получения точного профиля при зубошлифовальных, резьбошлифовальных, профилишлифовальных работах, а при полировании – для достижения высокой гладкости поверхности.

Важным свойством абразивного инструмента является его способность к частичному или полному самозатачиванию. При полном самозатачивании абразивные зерна под влиянием растущего при их затуплении усилия резания выкрашиваются и измельчаются, при этом обнажаются острые режущие кромки других зерен, расположенных ниже. Таким образом, режущая способность абразивного инструмента непрерывно восстанавливается до первоначальной. При частичном самозатачивании лишь небольшая часть затупившихся зерен выкрашивается или разрушается полностью; режущая способность восстанавливается лишь частично и абразивный инструмент постепенно теряет режущую способность. Ее восстановление достигается удалением слоя затупившихся зерен во время правки инструмента.

Материалы абразивных зерен делятся на:

- *естественные* – алмаз, кварц, корунд, наждак, кремний и гранит и др.;
- *искусственные* – электрокорунд, монокорунд, карбид кремния, карбид бора, синтетический алмаз, кубанит и др..

**Алмаз** – материал класса самородных неметаллов, один из самых твердых природных материалов. Из тонны руды получается 0,1–0,2 гр природного чистого алмаза.

**Корунд** – минеральный состав из кристаллического оксида алюминия  $Al_2O_3$  с примесями, который является вторым по твердости после алмаза природным материалом.

**Электрокорунд** – представляет собой искусственно синтезированный синтетический корунд (88–99%  $Al_2O_3$ ), получаемый плавкой в электрических печах боксита с восстановителем (антрацит, нефтяной кокс) и осадителем (железные опилки). По химическому составу делится на нормальный (содержит 87–97%  $Al_2O_3$ ), белый ЭБ (98–99%  $Al_2O_3$ ), хромистый ЭХ (97%  $Al_2O_3$  и 0,4–1,2% оксида хрома) и титановый ЭТ.

**Карбид кремния** (карборунд) – химическое соединение кремния с углеродом, также получается в электрических печах. Имеет две разновидности:

- *кремний зеленый* (КЗ) – бывает трех марок (62С, 63С, 64С), содержит 97% карбида кремния, очень твердый и имеет повышенные режущие свойства;
- *кремний черный* (КЧ) марок 52С, 53С, 54С и 55С, содержит 95% карбида кремния.

**Карбид бора** – химическое соединение бора с углеродом  $B_4C$  ( $B_{12}C_3$ ). Он имеет очень высокую твердость, которая приближается к твердости алмазов.

**Кубический нитрид бора** – сверхтвердый материал, не имеющий естественного аналога. Производится в двух формах: кубонит (шлифопорошки КО и микропорошки КМ) и эльбор. Его высокая твердость (в 3–4 раза выше, чем у традиционных абразивов) является важным преимуществом, поскольку значительно уменьшает износ зерен при шлифовке и длительное время сохраняет их остроту.

**Синтетические алмазы** – наиболее твердое вещество из всех известных, благодаря искусственной структуре их прочность составляет 50–70% от теоретически возможной. Для абразивного инструмента используют следующие марки: АСО (искусственный алмаз), АСС ( $\sigma_{cm} = 2,6...7$  МПа, диаметр зерен 250–50 мкм), АСВ ( $\sigma_{cm} = 4...13$  МПа, диаметр зерен 315–60 мкм), АСК ( $\sigma_{cm} = 9...27$  МПа, диаметр зерен 400–80 мкм).

Наиболее используемые абразивные материалы представлены в табл. 8.1.

Таблица 8.1 – Маркировка современных абразивных материалов

Материал	Старое обозначение	Новое обозначение	Разновидность
<b>Электрокорунд</b>			
1. Нормальный	Э	1А	12А-16А
2. Белый	ЭБ	2А	22А-25А
3. Хромистый	ЭХ	3А	32А-34А
4. Титановый	ЭТ	3А	37А
Монокорунд	М	4А	43А-45А
<b>Карбид кремния</b>			
1. Черный	КЧ	5С	53С-55С
2. Зеленый	КЗ	6С	60С-64С
Корунд природный	ε	9ε	–
Алмаз природный	А	А	А, АМ, АН
Алмаз синтетический	АС	АС	АСВ, АСК, АСС, АСМ, АСН
Кубический нитрид бора	Л	Л	ЛО, ЛП

Для изготовления абразивного инструмента применяют связующие:

- *неорганическая* – керамическая, стеклоцементная, силикатная и магнезиальная;
- *органическая* – бакелитовая и вулканитовая.

Абразивный инструмент на керамической связке применяется для всех видов абразивных работ за исключением прорезания и шлифования тонких пазов, а на магнезиальной и силикатной связке – только при сухом шлифовании. Инструмент на бакелитовой и вулканитовой связке очень прочный, используется при разрезании, шлифовании канавок, шлифовании закаленной стали, при отделочных и доводочных работах, при фасонном шлифовании, притирке и т.п.

*Вулканитовая* связка состоит из каучука и серы (примерно 30% S). Она обладает высокой пластичностью и эластичностью, но очень боится влаги особенно – щелочей.

*Бакелитовая* связка состоит из искусственной смолы, которая готовится из карболовой кислоты и формалина. Круги имеют достаточную прочность и эластичность, допускают высокую окружную скорость.

*Керамическая* связка получила самое широкое распространение. Ее изготавливают из огнеупорной глины, полевого шпата, кварца с добавлением талька, мела и жидкого стекла. Она достаточно влагостойкая, но боится ударов, изгибающих моментов и т.д.

Шлифовальные свойства и качество работы абразивного инструмента зависят главным образом от зернистости, твердости и структуры самого абразива. Чем больше зерна абразива, тем больше толщина снимаемой стружки и выше производительность, но грубее обработка. Чем выше твердость круга, тем труднее выламываются тупые зерна, следовательно, тем меньше износ.

*Абразивное шлифование* – один из основных видов черновой шлифовальной обработки, выполняемой с целью снижения шероховатости поверхности и ликвидации периодического рельефа, который возникает на детали после механической обработки на станках. От правильного выбора шлифовального круга зависит трудоемкость окончательной готовности изделия и его способность лучше противостоять возникающим фрикционным нагрузкам. Абразивное шлифование выполняют с помощью кругов, головок, фрез и сегментов.

***Шлифовальный круг*** – твердое тело, состоящее из абразивных зерен материала, которые с помощью специального вяжущего состава цементируются между собой. Чаще всего это тело вращения (рис. 8.1), которое может иметь разные размер и профиль сечения.

Зернистость шлифовального круга определяется размерами зерен согласно ГОСТ 3647-71. Круги подразделяются на 28 номеров зернистости, причем номер зернистости соответствует размеру зерна в мкм, например – номера 200-16 – шлифовальные зерна;

- номера 12 – шлифовальные порошки;
- М63-М14 – микропорошки;
- М10-М5 – тонкие микропорошки.



Рисунок 8.1 – Шлифовальный круг

Чем больше поверхность контакта круга с обрабатываемой деталью, тем крупнее должен быть порошок.

Твердость шлифовального круга определяется твердостью связки. Твердость абразивного инструмента – это способность связки удерживать зерна от выкрашивания. Шлифовальные круги бывают: мягкие (М1, М2, М3), средней мягкости (СМ1-СМ2), средне-твердые (СТ1-СТ3), твердые (Т1, Т2), очень твердые (ВТ1, ВТ2) и чрезвычайно твердые (ЧТ1, ЧТ2). С увеличением твердости обрабатываемого материала твердость круга следует уменьшать.

Структура шлифовальных кругов характеризуется количественным состоянием в окружности между зернами, связкой и порами. Существует 12 номеров структуры: 0–3 (плотные), 4–6 (средней плотности), 7–12 (открытые) (рис. 8.2). Для увеличения производительности необходимо брать открытые структуры.

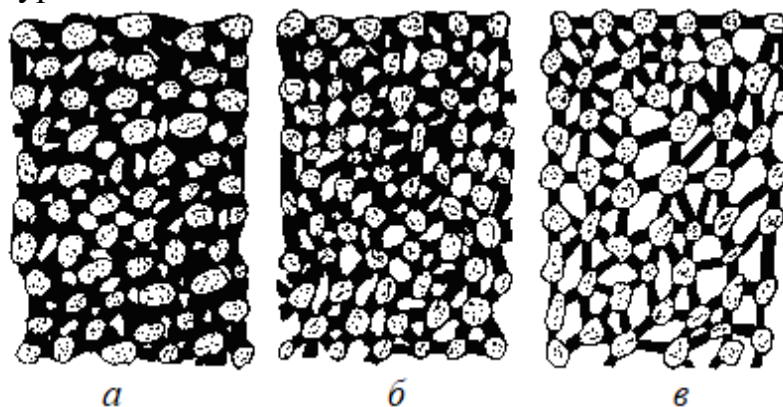


Рисунок 8.2 – Схема структур шлифовального круга *а* – плотная, *б* – средне плотная, *в* – открытая

Маркировка шлифовальных кругов наносится краской на торце шлифовального круга. Круги для скоростного шлифования, то есть для рабочей окружной скорости  $v = 50$  м/с, должны иметь на торце красную полосу, две полосы – для кругов с рабочей скоростью  $v = 60$  м/с. Содержание маркировки (рис. 8.3): 1. Завод-изготовитель; 2. Типоразмер; 3. Марка абразивного материала; 4. Номер зернистости; 5. Степень твердости; 6. Вид связки; 7. Рабочая окружная скорость (для кругов с диаметром 150 мм); 8. Размеры круга; 9. Класс дисбаланса; 10. Номер маршрутного листа.

Пример расшифровки маркировки КА324А40С25К1 35 м/с 250×20×127 ( $D \times H \times d$ ) корундового круга, показанного на рис. 8.3:

- 2 кл. 142,
- КА3 – Касулинский абразивный завод,
- 24А – электрокорундовый белый,
- 40 – номер зернистости,
- С2 – жесткость (средняя),
- 5 – номер структуры,
- К1 – вид связки (керамическая).



Рисунок 8.3 – Маркировка шлифовального круга

Пример обозначения алмазного круга: ТЗАИ АСР100/80100 Б156 2317 1973:

- ТЗАИ – Томилинский завод абразивного инструмента,
- АСР100 – марка, 80 – зернистость,
- 100 – концентрация алмаза,
- Б156 – бакелитовая связка,
- 2317 – номер круга,
- 1973 – год изготовления.

Пример обозначения эльборового круга: ИЛО 12С2 100 7К 1215 1974:

- ИЛО – Ленинград,
- 12С2 – марка эльборового порошка,
- 100 – размер зерна,
- 7К – номер керамической структурной связки,
- 1215 – номер круга,
- 1974 – год изготовления.

Шлифование считается окончательной обработкой материалов, однако данная операция достаточно продуктивна, поэтому она также применяется для обдирки и зачистки. Для выполнения шлифовальных операций используются станки:

- *круглошлифовальные* – для наружных и внутренних поверхностей;
- *плоскошлифовальные* – для шлифования плоских поверхностей с высокой точностью;
- *безцентровошлифовальные* – для наружных и внутренних поверхностей;
- *резьбошлифовальные, зубошлифовальные, хонинговальные* – для отделочной обработки деталей.

## 8.2 Методы абразивной обработки

**Абразивная обработка** – механическая обработка деталей из металла, дерева, стекла, пластмассы и других материалов абразивным инструментом на станках или вручную. Различными методами абразивной обработки достигается точность до долей микрометра и шероховатости в диапазоне  $R_z$  от 0,10 до 0,025 мкм.

Самые распространенные способы абразивной обработки – это различные виды шлифования: круглое наружное и внутреннее, фасонное, зубошлифование и резьбошлифование. На машиностроительных предприятиях количество станков шлифовального типа достигает 10...30%, а в подшипниковой промышленности – до 60 %.

Современные методы абразивной обработки делятся на два вида:

- способы обработки, в которых режущие зерна скреплены в твердый продукт – инструмент (круги, бруски, сегменты и т.д.);
- способы обработки свободными абразивными зёрнами в виде порошка или пасты.

Абразивная обработка первого вида может быть реализована в виде шлифовки, хонингования, суперфиниширования, доводки, электрохимического и ленточного шлифования. Примерами использования свободного абразива служит струйно-абразивная, ультразвуковая, магнитно-абразивная и инерционно-абразивная обработка, а также различные способы полировки.

**Шлифование** обычно выполняется с помощью трех движений: вращения шлифовального круга, вращения или возвратно-поступательного движения обрабатываемой детали и движения подачи, который выполняет круг или обрабатываемая деталь. Скорость вращения шлифовального круга – это скорость резанья, которую определяют по формуле

$$v_k = \frac{\pi D_k \cdot n_k}{60 \ 000}, \text{ м/с}, \quad (8.1)$$

где  $D_k$  – диаметр круга, мм;  $n_k$  – частота вращения круга, об/мин.

Скорость вращения (окружная подача) обрабатываемой детали

$$v_d = \frac{\pi D_d \cdot n_d}{60 \ 000}, \text{ м/с}, \quad (8.2)$$

где  $D_d$  – диаметр обрабатываемой детали, мм;  $n_k$  – частота вращения обрабатываемой детали, об/мин.

Существует три способа круглого шлифования (рис. 8.4): с продольной подачей; методом врезания и глубинное шлифование.

При круглом наружном шлифовании круг и обрабатываемая деталь вращаются в одну сторону. При шлифовании с продольной подачей и глубинном шлифовании подача осуществляется движением обрабатываемой детали. Шлифование с продольной подачей применяют при обработке сравнительно длинных (не жестких) деталей со следующими требованиями к режиму резанья:

1. Скорость резанья должна быть как можно больше. Максимальная скорость ограничивается в основном прочностью круга и при обычном шлифовании не превышает 35...40 м/с.

2. Глубину резанья, равную поперечной подаче, измеряют за время двойного продольного хода обрабатываемой детали. При черновом шлифовании стали  $S_n = 0,01 \dots 0,07$  мм/дв. ход, при чистовом  $S_n = 0,005 \dots 0,02$  мм на двойной ход.

3. Продольную подачу выбирают в зависимости от ширины круга  $B$ . Для чернового шлифования  $S_{np} = (0,3 \dots 0,85) B$ , для чистового –  $S_{np} = (0,2 \dots 0,3) B$ . Подача  $S_{np}$  измеряется в миллиметрах за один оборот обрабатываемой детали.

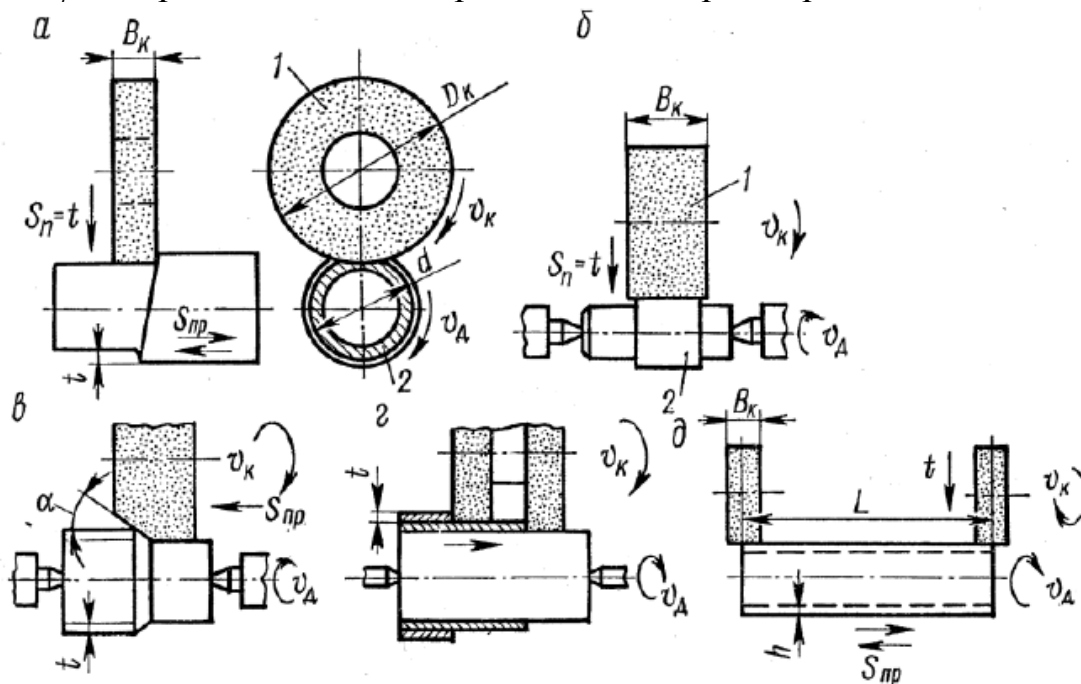


Рисунок 8.4 – Схемы круглого шлифования: а, б – с продольной подачей; в – методом врезания; г – глубинное

*Глубинное шлифование* применяют при обработке сравнительно коротких (жестких) деталей. Этот способ шлифовки более производительный, чем шлифование с продольной подачей, поскольку припуск снимается за один проход. Значения скорости вращения круга и обрабатываемой детали берут те же, что и в предыдущем случае, подача находится в пределах  $S_{np} = 1 \dots 6$  мм/об. Чем больше диаметр обрабатываемой детали, тем большую выбирают подачу.

Шлифование методом врезания используют, если длина обрабатываемой поверхности детали меньше ширины круга. Поперечную подачу выбирают из условия  $S_n = 0,02 \dots 0,07$  мм/об.

При шлифовании с продольной подачей круг изнашивается неравномерно – быстрее у одного торца и медленнее у другого. При глубинном шлифовании основную работу выполняет заборная (коническая) часть круга, а цилиндрическая защищает обрабатываемую поверхность. В этом случае круг изнашивается более равномерно, чем при шлифовании с продольной подачей. Во время шлифования методом врезания круг изнашивается еще равномернее.

При круглом внутреннем шлифовании круг и обрабатываемая деталь вращаются в разные стороны. Скорость резания определяется скоростью вращения круга, хотя действительная (или относительная) скорость резания больше скорости вращения круга на значение скорости вращения обрабатываемой детали. Но учитывая, что скорость вращения детали во много раз меньше скорости вращения круга, ею можно пренебречь. Различают внутреннее шлифование с продольной подачей (рис. 8.5, а и в), планетарное (рис. 8.5, д) и бесцентровое (рис. 8.5, з) шлифование.

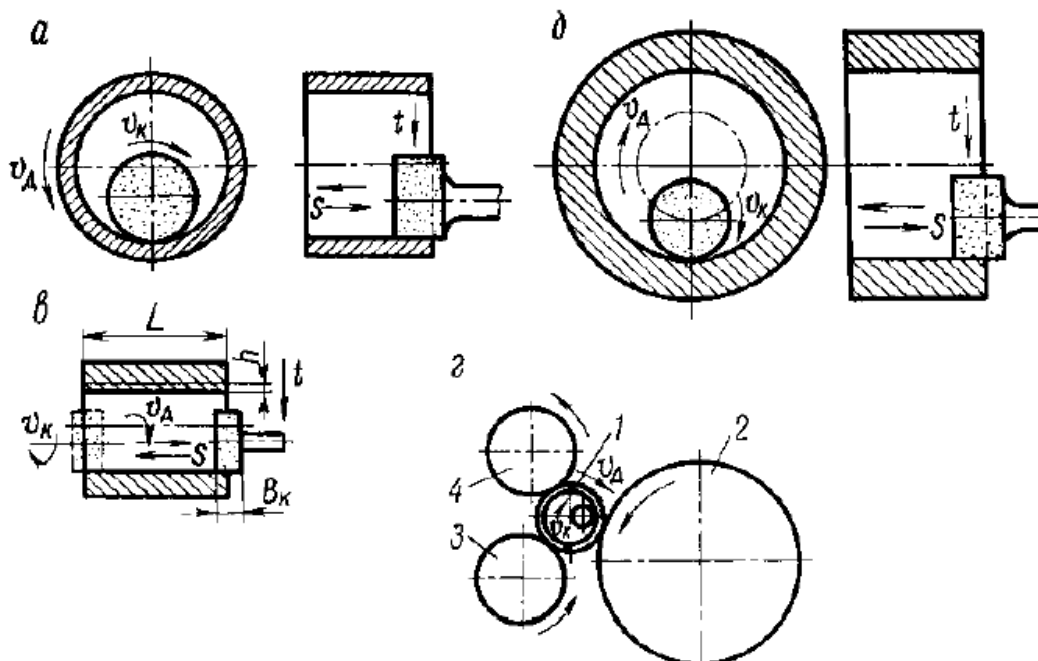


Рисунок 8.5 – Внутреннее шлифование: а, в – продольное; д – планетарное; з – бесцентровое

Планетарное шлифование используется при обработке больших по габаритным размерам деталей. В таком случае шлифовальный шпиндель выполняет вращательное движение вокруг оси круга  $D$  со скоростью  $V_{пл}$ .

Круглое внутреннее шлифование происходит в более сложных условиях, чем внешнее, поскольку:

- шлифовальный круг меньше шлифуемого отверстия  $D_k = (0,25 \dots 0,75) \cdot d$ , а нагрузки на зерно больше, потому что большая поверхность контакта шлифовального круга с деталью;
- шлифовальный шпиндель имеет низкую жесткость;

– доступ охлаждающей жидкости в зону шлифования затруднен, что приводит к ухудшению теплоотвода.

Несмотря на это, внутреннее шлифование выполняется с глубиной резания и подачей в два раза меньшей, чем при наружном круглом шлифовании.

*Плоское шлифование* выполняют периферией круга (рис. 8.6, а) или его торцом (рис. 8.6, б). Первый способ применяют при обработке нежестких деталей, а второй – когда обрабатывают большими партиями массивные и жесткие детали. При шлифовании торцом круга поверхность контакта больше, чем при шлифовании периферией, что увеличивает тепловыделение, а значит и возможность возникновения дефектов поверхностного слоя деталей.

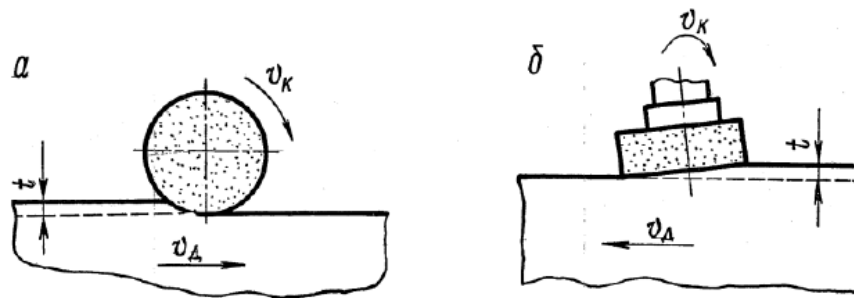


Рисунок 8.6 – Плоское шлифование: а – периферией круга, б – торцом круга

При *бесцентровом внешнем шлифовании* обрабатываемая деталь размещается между двумя кругами, вращающимися с разными скоростями: рабочим кругом 1, который осуществляет процесс резания, и ведущим 3, реализующим вращательное и поступательное движения детали 2 (рис. 8.7).

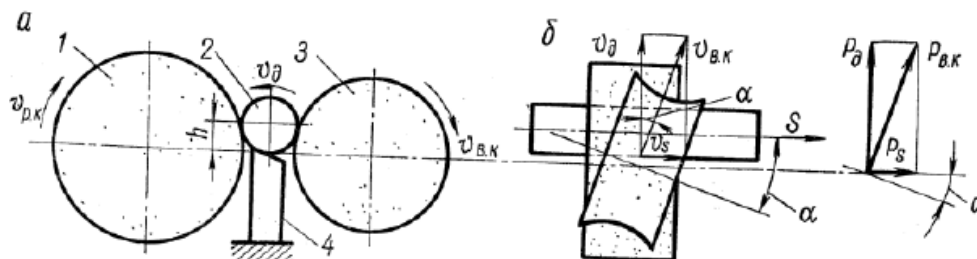


Рисунок 8.7 – Бесцентровое шлифование

Деталь опирается на подставку-нож 2, она подается с одной стороны кругов и выходит обработанной с другой. Ось детали должна быть выше от оси кругов на  $h = (0,1...0,3) D_д$ , причем большие значения  $h$  рекомендуются для деталей меньшего диаметра. Чтобы придать детали движение продольной подачи, ось ведущего круга поворачивается относительно оси рабочего круга на угол  $\alpha = 1...5^\circ$ . Вектор скорости ведущего круга  $v_{вк}$  раскладывается на вектор скорости вращения детали  $v_д$  и вектор скорости ее продольной подачи  $S_{пр}$ . Аналогично можно разложить и вектор силы  $P_{вк}$ ,  $P_д$  и  $P_s$ . Осевая сила  $P_s$  перемещает деталь в продольном направлении, а составляющая  $P_д$  прижимает деталь к рабочему кругу.

Рабочий круг вращается со скоростью 30...35 м/с, ведущий – от 0,25 до 0,5 м/с. Если оба круга будут вращаться с одинаковой скоростью, то резания не

будет. Чтобы увеличить силу трения, ведущий круг изготавливают на вулканитовой связке из мелкозернистого абразива твердостью СТ2–СТ1. Значение  $v_d$ , м/с определяют по формуле

$$v_d = v_{вк} \cos \alpha \cdot k_{нр} = \frac{\pi D_{вк} \cdot n_{вк} \cos \alpha \cdot k_{нр}}{60 \cdot 000}, \quad (8.3)$$

где  $k_{нр} = 0,95 \dots 0,99$  – коэффициент проскальзывания детали;  $D_{вк}$  – диаметр ведущего круга, мм;  $n_{вк}$  – частота вращения ведущего круга, об/мин.

От угла  $\alpha$  зависят производительность и качество бесцентрового шлифования: чем больше угол, тем выше производительность, но качество поверхности хуже. Обычно принимают  $\alpha = 3 \dots 5^\circ$  для предварительного и  $\alpha = 1 \dots 2^\circ$  – для чистового. Применяют следующие способы *бесцентрового шлифования*:

1. Детали цилиндрической формы без выступов (валы, оси, кольца и т.п.) шлифуют методом сквозной продольной подачи. При общем припуске на шлифование не более 0,5 мм глубина резания не превышает 0,1...0,15 мм для предварительного и 0,01...0,2 мм – для чистового шлифования. Выполнив шлифование всей партии деталей за одну установку, круги сближают, чтобы снять следующий слой припуска.

2. Ступенчатые детали, если их длина меньше ширины круга, шлифуют с поперечным врезанием с подачей  $S_n$  кругов. Если длина детали превышает ширину круга – в этом случае обработку выполняют с продольной подачей.

3. Фасонные детали шлифуют фасонным профилем круга с поперечной подачей. Длина детали должна быть меньше ширины круга.

Шлифование имеет ряд существенных отличий от обработки материала лезвийным инструментом:

1. Большое количество режущих элементов (зерен) – зерна имеют неправильную форму и снимают стружку в виде запятой (рис. 8.8).

2. Большие усилия отжима – поскольку глубина шлифовки мала, то и толщина срезаемого слоя тоже мала. Как следствие, большая усадка стружки и большая удельная работа. Между зернами нет места для стружки, и она приваривается к поверхности. Происходит снижение качества шлифования.

Связку выбирают так, что бы при увеличении нагрузки зерна выламывались и происходило самозатачивание круга. Чем больше твердость обрабатываемого материала, тем мягче круг надо брать, чтобы лучше происходил процесс самозатачивания.

3. Имеет место сильный нагрев в ходе шлифовки, температура достигает 1 200–1 500<sup>0</sup>С.

4. Обрабатываемый слой находится в напряженном состоянии, на обрабатываемой поверхности остаются вдавленные зерна. Поэтому шлифованные поверхности быстро изнашиваются в соединениях деталей.

5. Использование охлаждающих жидкостей уменьшает процесс засаливания круга.

6. Необходима частая правка (от 5 до 40 мин), наибольшее срабатывание круга (до 60–90%) имеет место во время правки.

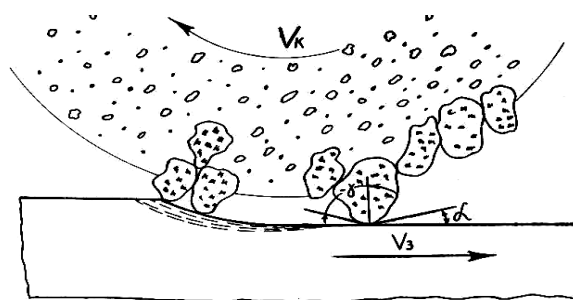


Рисунок 8.8 – Схема работы шлифовальных зерен

Износ шлифовального круга происходит в форме выкрашивания зерен, вызываемого действием сил резания. Такие износы являются полезными, если они не протекают слишком интенсивно. Очень мягкие круги интенсивно изнашиваются, а очень твердые засаливаются и требуют частой правки алмазным карандашом.

### 8.3 Физические явления при абразивной обработке

Из большого количества известных способов обработки металлов закрепленными или свободными режущими зёрнами наиболее распространенными являются абразивное и алмазное шлифование. Они осуществляются большим количеством хаотично расположенных абразивных зерен высокой микротвердости. Эти зёрна, образуя прерывистый режущий контур, прорезают канавки, а объём металла, срезаемого в единицу времени, значительно меньше, чем при резании металлическим инструментом. Абразивный круг имеет на своей периферии огромное количество режущих зерен. Так, для круга зернистостью 315/250 при среднем расстоянии между зёрнами 0,252 мм количество зерен на периферии круга превосходит 62 000.

При резании объём металла, снимаемого одним абразивным зёрном, составляет 0,00011 мм<sup>3</sup>, что в 400 000 раз меньше объёма металла, который срезается одним зубом фрезы. Расход энергии на единицу веса снятия стружки при шлифовании в 4–5 раз больше, чем при фрезеровании, и в 12–15 раз больше, чем при точении. Сравнительный анализ различных видов обработки материалов представлено в табл. 8.2.

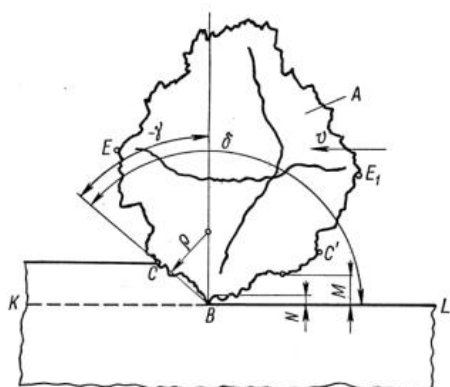
Таблица 8.2 – Зависимость удельной силы резания от вида обработки

Вид обработки	Удельная сила резания $p \cdot 10^9$ , Па
Точение	2...2,5
Сверление	3...3,5
Фрезерование	5...5,7
Шлифование	100...200

Значительное повышение удельной силы резания при снятии тонких слоев и возможность протекания процесса обработки в зоне особых свойств металла, близких к области его теоретической прочности, заставляет рассматривать процесс шлифовки как особый вид обработки металлов резанием.

Скорость резания при обычном шлифовании составляет 30 м/с, а при скоростном – 50 м/с. В настоящее время внедряется высокоскоростное шлифование, скорость резания которого достигает 80...90 м/с, что в 10...50 раз превышает скорости резания, применяемые при точении. С увеличением скорости все сопротивления деформации растут, особенно сильно влияние скорости сказывается на величине предела текучести. Высокие скорости резания приближают деформацию к условиям удара.

Абразивные зерна имеют вид многогранников неправильной формы с закругленными вершинами с радиусом  $\rho = 8...20$  мкм, который сопоставим с толщиной срезаемого слоя (рис. 8.9). При нормальном, и особенно, – при тонком шлифовании, когда срезается очень тонкий слой металла, в зоне резания возникают высокие температуры и удельные давления и химическое взаимодействие срезаемого металла со средой. В этих условиях стружка сгорает или оплавляется и поэтому трудно заметить закономерности ее формирования. При грубом шлифовании крупнозернистыми кругами



возникают большие силы резания, аналогичные возникающим при тонком точении или фрезеровании, под действием которых абразивные зерна проникают на глубину 0,02...0,2 мм, срезая стружку заметных размеров. При этом возникает возможность определения усадки стружки, которая в среднем имеет значение от 1,3 до 1,71, однако относительное смещение ее элементов достаточно велико и достигает значения 6,72, что объясняется спецификой шлифования.

Рисунок 8.9 – Схема контакта абразивного зерна со слоем срезаемого материала

Процесс деформации протекает с большой скоростью при больших отрицательных фактических передних углах. Статистические данные показывают, что при грубом шлифовании наиболее вероятными являются такие параметры режущего лезвия: угол резания  $\delta = 135^\circ$ , передний угол  $\gamma = -45^\circ$  и задний угол  $\alpha = 20...70^\circ$ . При резании с большими отрицательными углами имеет место значительный наклеп поверхностного слоя.

В процессе шлифования, особенно алмазного, очень важно обеспечить оптимальное значение давления круга, так как при недостаточном давлении алмазные зерна не врезаются в обрабатываемый материал и быстро изнашиваются, а вместо резания имеет место трение. Однако и избыточное давление нежелательно, так как оно вызывает вырывание зерен из связки, повышаются трение и износ инструмента.

На силы резания  $P_z$  и  $P_y$  влияет использование смазочно-охлаждающей жидкости. При ее использовании эти силы уменьшаются, поскольку уменьшаются силы трения, кроме того, жидкость смывает шлам, предотвращая засаливание круга. Определение составляющих силы важно не только для

объяснения явления стружкообразования при шлифовании, но и для расчетов конструкторского и технологического характера. Так, по силе  $P_z$  рассчитывается мощность электродвигателя станка, необходимая для шлифования; по силе  $P_y$  – упругое отжатие или деформация детали и круга, которые влияют на точность обработки; по  $P_x$  – сила, необходимая для привода продольной подачи круга или детали. Теоретические расчеты сил резания усложняются рядом допущений и для практических вычислений используются редко. Чаще всего применяют эмпирические зависимости, полученные экспериментальными методами.

На снятие определенного количества массы материала необходимо затратить некоторое количество энергии, то есть выполнить определенную работу на преодоление сопротивления при микрорезании, пластическом, упругом деформировании и трении в зоне контакта. Удельная работа шлифования зависит от многих факторов, особенно от физико-механических свойств обрабатываемого материала (табл. 8.3).

Таблица 8.3 – Зависимость удельной работы шлифования от вида обрабатываемого материала

Обрабатываемый материал	Удельная работа шлифования, Н·м/мм <sup>3</sup>
Быстрорежущая сталь Р9Ф5	850
Быстрорежущая сталь Р18	700
Алюминиевая бронза АМЦ	360
Шарикоподшипниковая сталь ШХ15	350
Никель	300
Твердый сплав Т15К6	280
Хромованадиевая сталь Х12Ф1	270
Серый чугун СЧ21	40
Кремний	80

При шлифовании почти вся механическая мощность микрорезания превращается в тепловую, и только ее десятые доли процента переходят в скрытую энергию изменения параметров решетки обрабатываемого материала. Вся тепловая энергия распределяется между деталью, кругом, стружкой и охлаждающей средой:

$$Q = Q_d + Q_k + Q_c + Q_{o.c.} \quad (8.4)$$

где  $Q_d$  – теплота, переходящая в обрабатываемую деталь;  $Q_k$  и  $Q_c$  – теплота, переходящая в круг и стружку соответственно;  $Q_{o.c.}$  – теплота, отбираемая охлаждающей средой.

Для широких условий шлифования баланс теплоты находится в следующих пределах: поток теплоты в обрабатываемую деталь составляет 69...80%, в абразивный круг – 11...13% и в стружку – до 8%. Эти соотношения меняются в зависимости от вида шлифования, физико-механических свойств обрабатываемого материала, характеристик круга, методов подвода смазочно-

охлаждающей жидкости и т.д. Чаще всего используются следующие расчетные формулы для определения составляющих теплового баланса:

$$\begin{aligned} Q_K &= 0,885\theta_{max} \cdot B \cdot \sqrt{\lambda_K \cdot C_K \cdot \rho_K \cdot v_d \cdot L_d}, \\ Q_D &= 0,885\theta_{max} \cdot B \cdot \sqrt{\lambda_D \cdot C_D \cdot \rho_D \cdot v_K \cdot L_K}, \end{aligned} \quad (8.5)$$

где  $\theta_{max}$  – максимальная температура в зоне шлифования;  $B$  – ширина круга;  $\lambda_K$  и  $\lambda_D$  – коэффициент теплопроводности круга и детали;  $C_K$  и  $C_D$  – удельная теплоемкость круга и детали;  $\rho_K$  и  $\rho_D$  – плотность материала круга и детали.

В формулах (8.5) не учтено влияние охлаждения. Количество теплоты, выносимой из зоны контакта стружкой

$$Q_c = m_c \cdot c_c \cdot \theta_c, \quad (8.6)$$

где  $m_c$  – масса снятой стружки, кг;  $c_c$  – теплоемкость материала стружки, Дж/(кг·К);  $\theta_c$  – температура стружки в момент резания, К.

Расчет общего количества тепловой энергии при шлифовании следует выполнять по формуле

$$Q = P_z \cdot v_K, \quad (8.7)$$

где  $Q$  – тепловыделение, Дж/с;  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы шлифования, Н;  $v_K$  – скорость круга, м/с.

Существует несколько способов управления тепловым балансом при шлифовании: использование более эффективных смазочно-охлаждающих жидкостей, включение в абразивную массу активных наполнителей, смачивание шлифовального инструмента специальными растворами и др. Особенно перспективная роль в этом отношении принадлежит химически активным соединениям, их использование приводит в зоне контакта к химическим реакциям, поглощающим большое количество теплоты. Некоторые вещества при нагревании диссоциируют с поглощением теплоты и их можно использовать наполнителями. Тепловой эффект этих реакций разный и находится в пределах 90...460 кДж/моль. Таким путем надежно обеспечивается шлифование без пригорания и повышаются режущие свойства кругов, а основные показатели шлифования возрастают на 30%.

В зоне прохождения абразивного зерна развиваются мгновенные температуры, превышающие критические для стали и даже достигающие температуры ее плавления. При высоком нагреве изменяются механические свойства обрабатываемого материала, имеют место взаимная диффузия и адгезия, приводящие к засаливанию кругов. Под действием высокого нагрева и быстрого охлаждения в поверхностном слое возникают напряжения растяжения, негативно влияющие на эксплуатационные характеристики обрабатываемых деталей.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Какие материалы и инструменты называются абразивными? Приведите примеры природных и искусственных абразивных материалов.
2. В чем преимущества абразивной обработки материалов?
3. Какие виды шлифования используются? В чем их особенности?
4. В каких отраслях наиболее распространена абразивная обработка?

## ТЕМА 9 ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 9.1 Требования к инструментальным материалам

Значительное влияние на процесс резания и достижения высокой производительности обработки имеет материал режущего лезвия инструмента (инструментальный материал). В связи с этим к инструментальным материалам предъявляются определенные требования по обеспечению:

- высокой твердости и прочности;
- высокой теплостойкости или красностойкости, характеризующейся высокой температурой, при которой инструментальный материал сохраняет свои режущие свойства;
- высокой износостойкости;
- удовлетворительных технологических качеств (материалы должны хорошо поддаваться ковке, термообработке, шлифовке, заточке и т.д.);
- сравнительной дешевизны и отсутствия остродефицитных элементов.

К инструментальным материалам относятся следующие разновидности: углеродистые и легированные инструментальные стали, быстрорежущей стали и сплавы, твердые сплавы, минералокерамика и сверхтвердые материалы. Наиболее распространенным инструментальным материалом является быстрорежущая сталь. Из этого материала изготавливается около 66% инструмента, из твердого сплава – около 32%, из других групп инструментальных материалов – только 2% (рис. 9.1, *а*). Сравнение же применяемости каждой группы материалов по объему стружки дает другую картину их распространения (рис. 9.1, *б*).

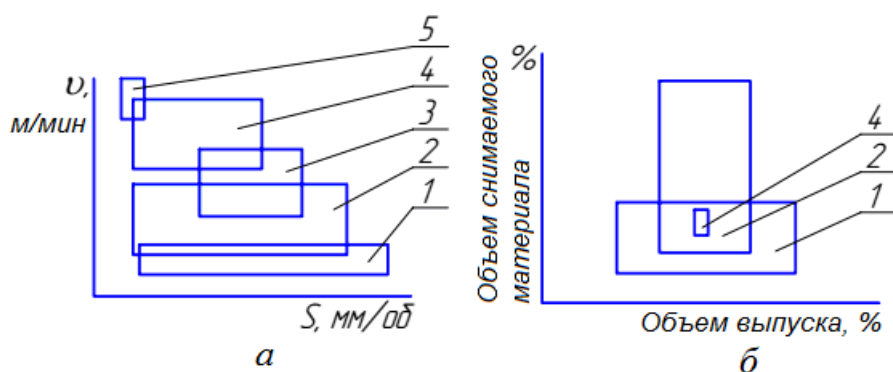


Рисунок 9.1 – Использование инструментальных материалов: *а* – в диапазоне допустимых скоростей резания и подач; *б* – по объему выпуска и снимаемого материала: 1 – быстрорежущие стали; 2 – твердые сплавы; 3 – твердые сплавы с покрытиями; 4 – керамика; 5 – сверхтвердые материалы

Так, инструментом из твердого сплава снимается примерно 68% стружки, инструментом из быстрорежущей стали – около 28%, на долю других групп материалов приходится только 4%. Приведенные процентные соотношения в течение времени меняются в зависимости от изменения структуры обрабатываемых материалов, парка оборудования и точности изготовленных деталей. Наиболее быстрыми темпами в настоящее время развиваются

инструменты из сверхтвердых материалов и минералокерамики, а также материалы с износостойкими покрытиями (рис. 9.2).

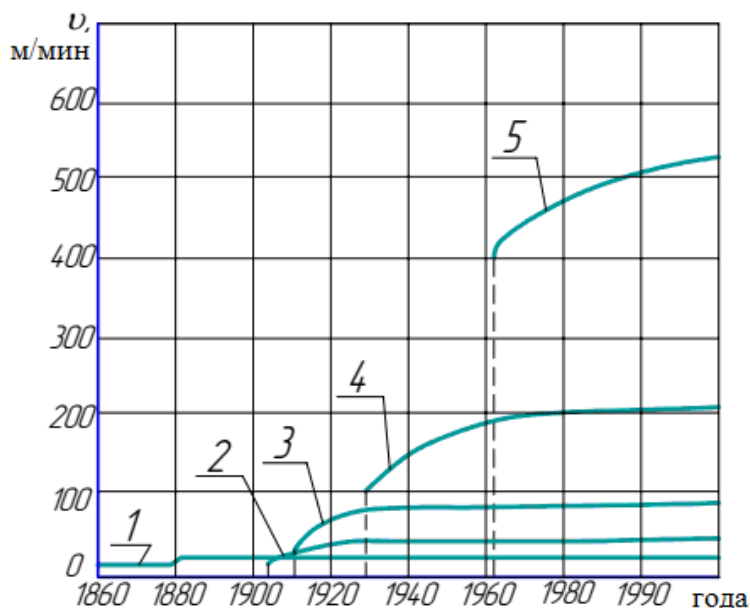


Рисунок 9.2 – Применение инструментальных материалов по годам и скоростям и резания: 1 – инструментальные стали; 2 – легированные стали; 3 – литые твердые сплавы; 4 – порошковые твердые сплавы; 5 – керамика

## 9.2 Основные виды инструментальных материалов

Наиболее распространенными марками *углеродистых инструментальных сталей* является У10А, У11А, У12А, У13А, где буква У означает «углеродистая», цифры – содержание углерода в десятых долях процента, буква А – сталь улучшенная. Такие стали имеют твердость 61...63 HRC, предел прочности  $\sigma_s = 2\,000...2\,200$  МПа и теплостойкость  $\theta_m = 200...250^\circ\text{C}$ , и применяются в условиях единичного и мелкосерийного производства для изготовления метчиков, плашек, сверл малых диаметров и других инструментов (в том числе слесарных), работающих при невысоких скоростях резания 8...10 м/мин.

*Легированные инструментальные стали* отличаются от инструментальных углеродистых наличием в них легирующих элементов – хрома, вольфрама, молибдена, ванадия и других. Введение легирующих элементов повышает теплостойкость инструментальной стали до 350...400°C, что позволяет увеличить скорость резания по сравнению с инструментальными углеродными сталями в 1,2...1,4 раза ( $v = 10...14$  м/мин). Наибольшее распространение для изготовления режущего инструмента получили стали марок 9ХС (0,09% углерода, Х – хром, С – кремний). ХВСГ (В – вольфрам, Г – марганец), ХВГ и другие. Твердость таких сталей 65...67 HRC. Основное преимущество инструментальных легированных сталей – возможность изготовления тонкого и длинного стержневого инструмента – протяжек, сверел, разверток, метчиков и т.д.

Быстрорежущие стали имеют лучшие режущие свойства, чем рассмотренные выше, их твердость составляет 63...65 HRC, красностойкость

$\theta_m = 600\text{--}720^\circ\text{C}$ , они позволяют работать при скоростях резания 20...40 м/мин. Возможность работы на таких скоростях резания объясняется наличием в их составе вольфрама, молибдена, кобальта и ванадия.

Маркировка быстрорежущей стали включает в себя букв Р (режущие) и буквы, которые обозначают карбидообразующие и легирующие элементы (В – вольфрам, М – молибден, Ф – ванадий, К – кобальт, Т – титан, Ц – цирконий, А – азот) и цифры (с буквами), обозначающие среднее массовое содержание элемента в процентах. Например, Р18 (W – 18%, Cr – 4,1%, V – 1,2%, C – 0,75%, Si и Mn – 0,4%, Mo – 3%, P и S – 33%). Быстрорежущие стали делятся на: вольфрамовые – Р18, Р12, Р9 и др.; вольфрамомолибденовые – Р6М5, 10Р6М5 и др.; вольфрамованадиевые – Р18Ф, Р12Ф3 и др.; вольфрамокобальтовые – Р9К5, Р9К10 (64...65 HRC,  $\theta_{кр} = 630^\circ\text{C}$ ); вольфрамованадиевые с кобальтом – Р18К5Ф2, Р18Ф2К8 и др. (66...68 HRC,  $\theta_{кр} = 640^\circ\text{C}$ ); вольфрамомолибденованадиевые с кобальтом – Р6М5К5, Р12М3Ф2К5, Р10М4Ф3К10, Р6М5Ф2К8 и др. (66...69 HRC) с интерметаллидным упрочнением – В11МЕК23, В14МЕК25, 30В20К16 и др. (68...69 HRC,  $\theta_{кр} = 700\text{--}725^\circ\text{C}$ ).

Влияние отдельных элементов на свойства сталей проявляется по-разному. Повышение процентного содержания углерода приводит к повышению твердости и красностойкости, но одновременно снижает прочность, ухудшает технологические свойства сталей. Вольфрам дает красностойкость, а хром – хорошую прокаливаемость. Ванадий также увеличивает красностойкость, но ухудшает способность к шлифовке сталей. Молибден влияет на красностойкость так же, как и вольфрам. Режущие свойства сталей существенно зависят от термообработки, которая состоит в закаливании ( $\theta_c = 1300^\circ\text{C}$ ) в соляных ваннах и следующем двух- или трехкратном отпуске.

Применяются также литые быстрорежущие стали для изготовления инструментов простой формы, вязкость которых выше, чем у кованных. Порошковые быстрорежущие стали изготавливают методом прессования порошков, которые получают распылением расплавленной стали в среде инертных газов (азот, аргон), чтобы избежать их окисления. Порошок (размер зерен около 150 мкм) предварительно прессуют в холодном состоянии при давлении 40 000 МПа, после вакуумирования порошок нагревают до 1 150...1 200 $^\circ\text{C}$  и второй раз прессуют под давлением 4 000 МПа, а затем куят заготовки диаметром 100...200 мм.

*Твердые сплавы* получают методами порошковой металлургии в виде пластинок путем спекания их в электрических печах при температуре около 1 500 $^\circ\text{C}$ . Для стандартных твердых сплавов  $\sigma_u = 950\text{--}1800$  МПа и  $\sigma_g = 4\,000\text{--}6\,000$  МПа. В зависимости от состава карбидной фазы выделяют три группы сплавов:

1. Вольфрамокобальтовые или однокарбидные ВК – ВК2 (98% WC + 2% железа), ВК3, ВК4, ВК4В, ВК6М, ВК60М, ВК8, ВК8В, ВК10М и др.
2. Титановольфрамовые или двухкарбидные ТК – Т5К10 (85% WC + 10% Со + 5% TiC), Т5К12В, Т15К6, Т30К4 и др.

3. Титано-танталовольфрамкобальтовые или трехкарбидные ТТК – ТТ7К12, ТТ7К15, ТТ10К8 (3% TiC + 10 (TaC + NbC) + 82% WC + 8% Co) и др.

Сплавы с размером зерен WC от 3 до 5 мкм относят к крупнозернистым и обозначают буквой В; если размер зерен WC не превышает 0,5...1,5 мкм, то сплавы являются мелкозернистыми и обозначаются буквой М, если зерна меньше 1 мкм, то сплавы особенно мелкозернистые – ОМ.

Сплавы первой группы применяются для обработки материалов, которые дают стружку надлома или элементную, например, жаропрочных сталей и титановых сплавов. Сплавы второй группы применяются при обработке пластичных материалов, они более жесткие, теплостойкие и износостойкие, но в то же время, более хрупкие и менее прочные, чем сплавы первой группы. Поэтому сплавы ТК плохо воспринимают ударные нагрузки и прерывистое резание с переменным сечением среза. Твердые сплавы третьей группы имеют более высокую прочность и вязкость, чем ТК за счет замены части TiC карбидом тантала TaC, который имеет меньшую микротвердость и более высокую температуру плавления. Уступая ТК в теплостойкости, сплавы ТТК превосходят их в прочности и характеризуются высокой износостойкостью, ударным сопротивлением, устойчивостью против вибраций и выкрашивания.

Относительно новой группой твердых сплавов являются безвольфрамовые твердые сплавы, в которых карбид вольфрама заменен карбидом титана или карбонитридом титана, а в качестве связки используются никель, железо и молибден. Сплавы отличаются, с одной стороны, высокой окалинотойкостью, малым коэффициентом трения, пониженной склонностью к адгезии, меньшей плотностью, и, с другой стороны, пониженной прочностью, склонностью к образованию трещин при напайвании. Их применяют в основном при полустойковой обработке, например маркировка – ТН-25 (TiC – 79%, Ni – 15%, Mo – 6%), ТН-25, ТН-30, КНТ-16.

Дальнейшее развитие твердых сплавов, а также быстрорежущих сталей происходит в направлении углубления их специализации и сокращения марочного состава в пределах каждой группы. Перспективным направлением является нанесение на режущий инструмент износостойких покрытий методами химического и физического осаждения. Методы химического осаждения применяются для нанесения покрытий с TiC, TiN и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на твердосплавные пластины. Отличительной их особенностью являются высокие температуры (более 1 000°С) нанесения покрытий, что не позволяет использовать эти методы для быстрорежущих и инструментальных сталей. К методам физического осаждения покрытий относятся ионно-плазменные, в частности электронно-лучевые технологии, метод магнетронного распыления в вакууме и электродугового напыления, которые реализуются при температуре не более 500°С, что позволяет использовать их для инструментальных и быстрорежущих сталей. При этих методах на поверхность лезвия инструмента наносятся одно- или многослойные покрытия, например TiN, TiC, ZrN, толщиной 2...0 мкм. Износостойкие покрытия позволяют повысить стойкость инструментов в 2...5 раз по сравнению с исходным материалом.

*Минералокерамика* выпускается в виде пластин белого, светло-желтого и черного цветов высокой твердости (90 ... 94 НРА), теплостойкости (до 1200°C) и износостойкости, что превышают аналогичные показатели твердых сплавов. Ее недостатки – высокая хрупкость, низкая ударная вязкость, низкое сопротивление циклическим изменениям температуры. Основой этих материалов является глинозем ( $Al_2O_3$ ). Минералокерамику на основе оксида алюминия подразделяют на:

- оксидную керамику ( $Al_2O_3$  до 99,7%), например ЦМ – 332;
- керамику, представляющую собой оксид алюминия с добавлением металлов (титан, ниобий и др.);
- оксидно-карбидную керамику (черного цвета), состоящую из оксида алюминия и карбидов тугоплавких металлов (титана, вольфрама, молибдена), например, ВОК-60, ВОК-63.

Наряду с материалами на основе  $Al_2O_3$  выпускается керамика на основе нитрида кремния – силинит Р и картинит ОНТ-20 (с добавками оксида алюминия и некоторых других веществ), отличающаяся отсутствием склонности к адгезии. Минералокерамика используется для получистовой и чистовой обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов, чугунов, а также неметаллических материалов.

Значительное распространение приобрели сверхтвердые материалы на основе алмаза и нитрида бора. Природный алмаз (А) имеет высокую твердость и прочность ( $\sigma = 2\,000$  МПа), теплопроводность и низкий коэффициент линейного расширения. Недостатки – способность интенсивно растворяться в железе и его сплавах с углеродом при  $\theta = 750^\circ C$ , высокая стоимость. Синтетические алмазы (СА) тверже природных, их получают переводением углерода в другую модификацию за счет графита при  $\theta = 2\,500^\circ C$  и давлении  $P = 100\,000$  МПа. Алмазы А и СА применяются в абразивных и реже – лезвийных инструментах для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов.

Сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора (КНБ) подразделяют на композиты:

- с массовой долей КНБ более 95% – эльбор Р (композит 01), гексаном (композит 10), белбор (композит 02), исмит, ПТНБ в виде столбиков диаметром 4...6 мм и высотой 3...6 мм;
- с массовой долей КНБ до 75% с различными добавками – композит 05 в виде таблеток диаметром 8 мм и высотой 6 мм.

К сверхтвердым материалам также относятся материалы на основе диборита титана, искусственных монокристаллов сапфира, рубина и т.д.

Отдельную группу инструментальных материалов составляют *абразивные материалы* для изготовления абразивных инструментов. К ним относятся: электрокорунд, карбид кремния, карбид бора, алмаз, кубический нитрид бора, белбор и другие. При маркировке абразивных материалов используют цифровые и буквенные обозначения, например, белый электрокорунд – 25А, 24А, 23А, 22А; карбид кремния черный – 55С, 54С, 53С; карбид кремния зеленый – 64С, 63С, 62С; алмаз природный – А; алмаз

синтетический – АС, АСР, АСВ; эльбор – Л и т.д. Размеры зерен абразивного материала подразделяют по номерам зернистости: 125, 80, 50, 40 и т.д., что соответствует значению 1,25 мм, 0,8 мм, 0,5 мм, 0,4 мм и т.д.

Твердость материала обозначают буквами: М – мягкий, СМ – среднемягкий, С – средний, СТ – среднетвердый. Абразивные зерна могут использоваться в свободном состоянии и связываться между собой с помощью специальных веществ, называемых связками: К – керамической, Б – бакелитовой, В – вулканитовой, М – металлической и т.д. Различают плотную, среднюю и открытую структуры абразивного материала, например, 4, 5, 6, 7 – средняя структура.

Эти обозначения входят в маркировку абразивных инструментов. Например, *шлифовальный круг ЧАЗ 250×16×75 25А 40 С25К5 35 м/с А 1кл ГОСТ 2424-83*, где ЧАЗ – наименование завода изготовителя, 250×16×75 – размеры круга (внешний диаметр, высота, внутренний диаметр). 25А – вид абразивного материала, 40 – зернистость, С2 – твердость, 5 – структура, К5 – вид связи, 35 м/с – скорость вращения круга, а – класс точности, 1 кл – класс неуравновешенности.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Назовите группы материалов, которые используются в качестве инструментальных материалов.
2. Проведите сравнительный анализ химического состава углеродистых и легированных сталей.
3. В чем состоит физический смысл процесса легирования? Какие легирующие элементы используются?
4. Как маркируются углеродистые стали? Приведите примеры.
5. Как маркируются легированные стали? Приведите примеры.
6. Дайте определение твердосплавных инструментальных материалов? Где они получили наибольшее распространение?
7. Какие неметаллические материалы применяются в настоящее время в качестве инструментальных?

## ТЕМА 10. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ. ТИПЫ, КОНСТРУКЦИИ И ВЫБОР

### 10.1 Назначение и основные типы сверл

**Сверла** – это осевые режущие инструменты, предназначенные для получения отверстий в цельном материале, а также для обработки (рассверливания) отверстий, предварительно изготовленных ковкой, штамповкой, литьем или сверлением. Они широко применяются в машиностроении, занимая по распространенности второе место после резцов.

Кинематика процесса сверления состоит из двух движений: главного – вращательного вокруг оси инструмента (заготовки) и поступательного – движения подачи вдоль той же оси.

По конструктивному исполнению сверла отличаются большим разнообразием, которое можно свести к следующим основным типам: перьевые (лопастные); спиральные (с винтовыми канавками) и специальные (для сверления глубоких отверстий, кольцевые, комбинированные и т.д.).

В качестве материала рабочей части сверла в основном используются быстрорежущие стали, прежде всего – сталь марки Р6М5. В последние годы в массовых объемах выпускаются различные конструкции сверл, оснащенных твердыми сплавами. Перьевые сверла наиболее распространены, их современные конструкции показаны на рис. 10.1, а – в.

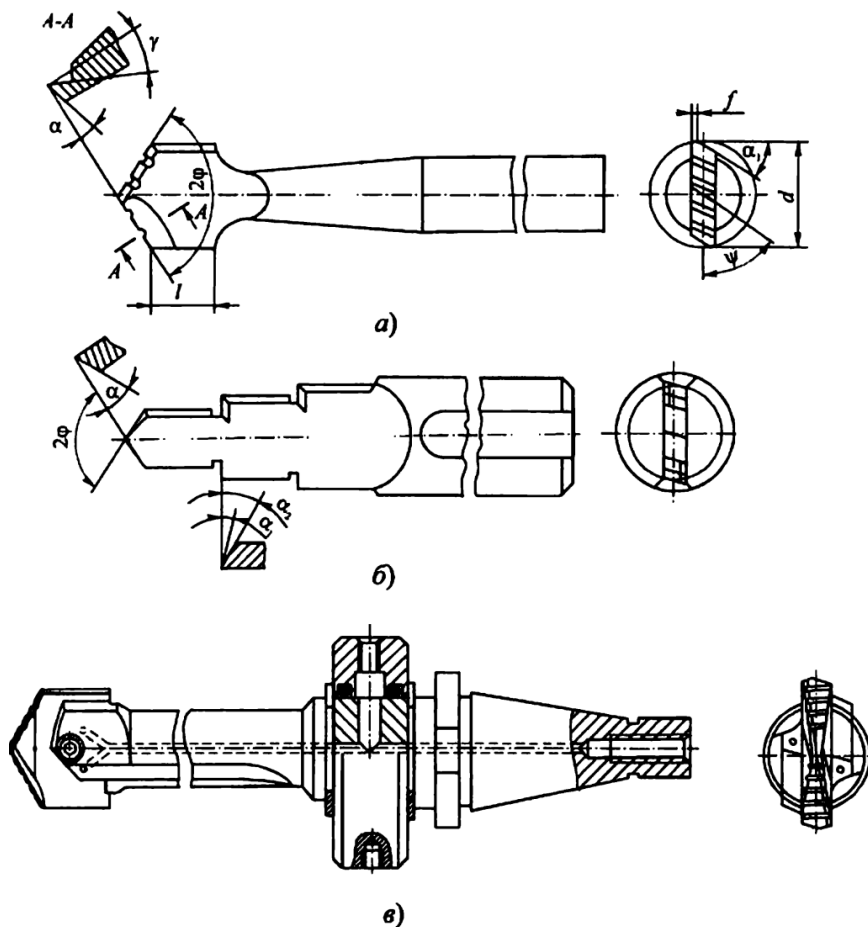


Рисунок 10.1 – Перьевые сверла: а – цельное; б – для сверления ступенчатых отверстий; в – сборное, с внутренним напорным охлаждением

**Цельные перьевые сверла** (рис. 10.1, а) изготавливают из проволоки путемковки или фрезерования режущей части в форме пластины, которая затачивается на конус под углом  $2\varphi = 118^\circ$ . При этом образуются две главные и две вспомогательные режущие кромки. Затачиванием двух плоских задних поверхностей создается задний угол  $\alpha = 10...12^\circ$ . При пересечении этих поверхностей образуется поперечная режущая кромка (перемычка). Если передние поверхности плоские, то передние углы на главных режущих кромках имеют отрицательные значения, что нежелательно из-за увеличения силовой нагрузки на сверло и появления вибраций.

Преимуществами перьевых сверл является простота конструкции, а также возможность изготовления их любого диаметра и длины даже в условиях ремонтных мастерских. К недостаткам следует отнести: усложненные условия отвода стружки; склонность к вибрациям из-за малой жесткости режущей части; небольшой запас на перетачивание и низкую производительность процесса сверления из-за малых значений подачи и в связи с необходимостью периодического вывода сверла из отверстия для освобождения от стружки.

Из всех известных конструкций спиральные сверла нашли наибольшее применение благодаря следующим преимуществам:

- хороший отвод стружки из обрабатываемого отверстия благодаря наличию винтовых канавок;
- положительный передний угол на большей длине главных режущих кромок;
- большой запас на перетачивание, которое проводится по задним поверхностям и может выполняться вручную или на специальных заточных станках, в том числе станках-автоматах;
- хорошее направление сверла в отверстии благодаря наличию калибровочных лент на внешней поверхности режущего инструмента.

Основные конструктивные элементы и геометрические параметры спиральных сверел показаны на рис. 10.2.

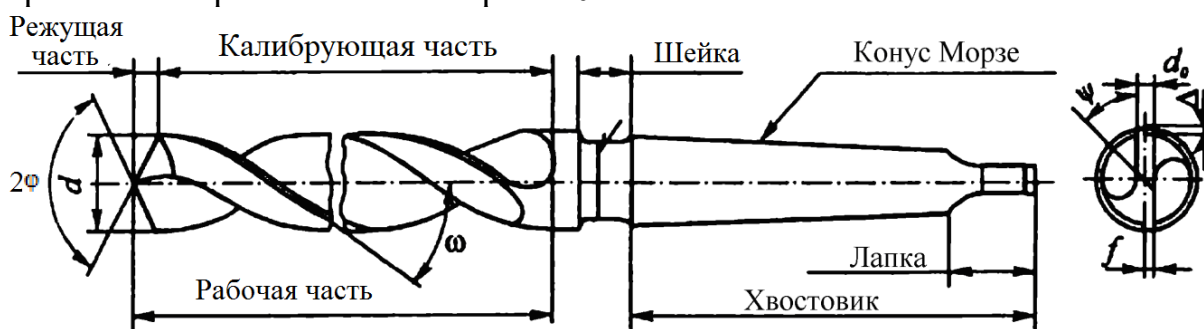


Рисунок 10.2 – Спиральные сверла

На конической режущей частях с углом  $2\varphi$  при вершине расположены две главные режущие кромки – линии пересечения винтовых передних и задних поверхностей. Форма данных поверхностей определяется методом заточки. В результате пересечения двух задних поверхностей образуется поперечная режущая кромка, наклоненная к главной режущей кромке под углом  $\psi$ . Эта кромка расположена на сердцевине сверла с условным диаметром

$$d_0 = (0,15 \dots 0,25) \cdot d,$$

где  $d$  – диаметр сверла, мм.

Две вспомогательные режущие кромки лежат на пересечении передних поверхностей и цилиндрических калибрующих лент, которые направляют сверло в отверстие и образуют калибрующую часть сверла. Угол наклона вспомогательных кромок оси сверла  $\omega$  определяет в основном величину передних углов  $\gamma$  на главных режущих кромках.

Для снижения трения калибрующих лент о стенки отверстия их ширину  $f$  в зависимости от диаметра сверла  $d$  принимают

$$f = (0,32 \dots 0,45) \cdot \sqrt{d},$$

а высоту  $\Delta = 0,1 \dots 0,3$  мм. Чтобы избежать защемления сверла в отверстии, предусмотрено уменьшение его диаметра к хвостовику – обратная конусность, равная  $0,03 \dots 0,12$  мм на 100 мм длины рабочей части.

В сердцевине сверла с целью повышения его прочности и жесткости предусмотрена прямая конусность, то есть увеличение ее диаметра в направлении хвостовика, равное  $1,4 \dots 1,7$  мм на 100 мм длины.

Спиральные сверла имеют сложную геометрию режущей части, что объясняется наличием большого количества кромок и сложных по конфигурации передних и задних поверхностей. Основными геометрическими параметрам спиральных сверел являются:

1. Угол при вершине  $2\varphi$ , который играет роль главного угла в плане. В стандартных сверлах  $2\varphi = 116 \dots 120^\circ$ . При этом главные режущие кромки строго прямолинейны и совпадают с линейчатой образующей винтовой передней поверхности. При заточке сверел угол заточки ( $2\varphi_{зат} \neq 2\varphi$ ) может быть изменен в пределах от  $70$  до  $135^\circ$ . При этом режущие кромки становятся криволинейными, меняются отношения ширины и толщины срезанной стружки и величины передних углов на главных режущих кромках. Соответственно, меняются степень деформации срезанного припуска, сила и температура резания и условия отвода стружки.

2. Угол наклона винтовой канавки  $\omega$ , измеренный на внешнем диаметре сверла и являющийся одним из важнейших параметров, определяющих величину передних углов в каждой точке главных режущих кромок. В стандартных сверлах этот угол назначается в зависимости от их диаметра:  $\omega = 25 \dots 28^\circ$  для  $d < 10$  мм и  $\omega = 28 \dots 32^\circ$  для  $d > 10$  мм. Так как этот угол имеет также большое влияние на отвод стружки из зоны резания, то в специальных спиральных сверлах его увеличивают до  $40 \dots 60^\circ$ .

3. Передний угол  $\gamma$  спиральных сверел имеет переменное значение по длине главных режущих кромок. Это объясняется тем, что передняя поверхность сверла является винтовой линейчатой конволютной, так как она образуется винтовым движением отрезка прямой, наклоненной к оси инструмента. В стандартных сверлах с прямолинейными режущими кромками образующая поверхности совпадает с режущей кромкой и составляет угол  $\varphi$  с осью сверла. При ее винтовом движении траектория каждой точки режущей

кромки является винтовой линией с одним и тем же шагом  $P$ , который можно измерить на внешнем диаметре сверла:

$$P = \frac{\pi d}{\operatorname{tg} \omega}.$$

4. Угол наклона главной режущей кромки  $\lambda$  – в стандартных сверлах с превышением главных режущих кромок над осевой плоскостью симметрии из-за поворота вектора скорости резания в каждой точке режущих кромок образуется угол наклона  $\lambda$ . Это угол между вектором скорости и нормалью к режущей кромке, который является переменным.

5. Задний угол  $\alpha$  на главных режущих кромках создается путем затачивания перьев сверл по задним поверхностям, которые могут быть оформлены как части плоской, конической или винтовой поверхности. В спиральных сверлах принято измерять задний угол в цилиндрическом сечении, соосном со сверлом, как угол зазора между касательной к задней поверхности и поверхностью резания. В качестве последней, с определенным приближением, принимают в статике плоскость, проходящую через главную режущую кромку перпендикулярно к осевой плоскости сверла, то есть без учета угла поворота координатных плоскостей на угол  $\eta$ .

К числу основных недостатков геометрии стандартных спиральных сверл, снижающих их устойчивость и продуктивность, можно отнести: наличие нулевых задних углов на вспомогательных режущих кромках; отрицательные значения передних углов на поперечной режущей кромке; большие передние углы на периферийных участках главных режущих кромок. Указанные недостатки требуют применения других типов инструмента для обработки отверстий.

Несмотря на то, что использование твердых сплавов обеспечивает повышение производительности в 2...4 раза, удельный вес *твердосплавных сверел* в общем объеме их применения составляет не более 10%. Это объясняется неблагоприятными условиями работы твердых сплавов при сверлении: нежестким (консольным) креплением сверл; большими осевыми нагрузками; переменной величиной скорости резания, которая уменьшается до нуля на поперечной режущей кромке; большой шириной проникновения режущего инструмента; опасностью появления вибраций и пакетирования стружки в канавках сверла; малыми числами оборотов и недостаточной мощностью, жесткостью и точностью сверлильных станков.

Значительное распространение твердосплавные сверла получили для сверления чугунов, цветных металлов и неметаллических материалов (мрамор, кирпич, пластмассы и т.п.). При сверлении сталей часто наблюдается выкрашивание режущих кромок, особенно в виде разрушения поперечной режущей кромки. Повышение жесткости сверел, использование внутреннего напорного охлаждения и другие усовершенствования позволяют получать хорошие результаты при сверлении труднообрабатываемых сталей и сплавов, то есть там, где быстрорежущие сверла имеют очень низкую стойкость. Для

оснащения сверел используют твердые сплавы марок ВК8, ВК10-М, ВК15-М, имеющих наибольшую прочность.

Мелкогабаритные сверла ( $d = 2...6$  мм) изготавливают твердосплавными цельными или сборными, когда хвостовик изготавливается из стали (рис. 10.3, а), а рабочая часть – из твердого сплава. Сверла  $d = 10...30$  мм оснащают напайными пластинами или коронками из твердого сплава (рис. 10.3, б–в). При этом корпус сверла изготавливается из стали 9ХС или Р6М5. На корпусах таких сверел направляющие ленты обычно не делают, так как при высоких скоростях резания, допускаемых твердым сплавом, они быстро выходят из строя и не выполняют роли направляющих сверла.

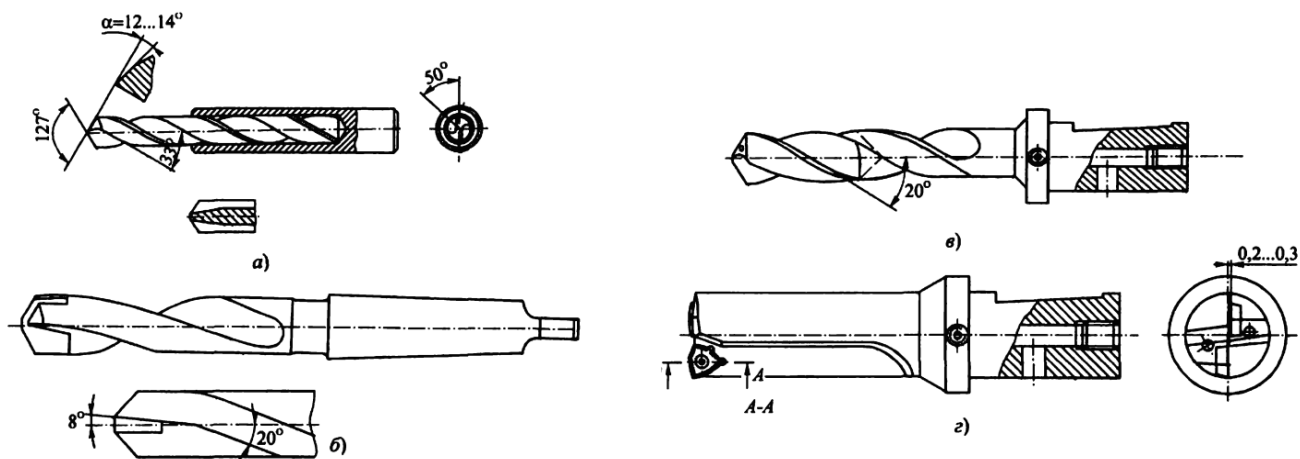


Рисунок 10.3 – Твердосплавные сверла: а – цельные; б – с напайными пластинами; в – с коронками; г – с механическим креплением СМП

## 10.2 Зенкеры и зенковки

Зенкеры – это осевые многолезвийные режущие инструменты, которые применяются для промежуточной или конечной обработки отверстий, полученных предварительно сверлением, литьем, ковкой или штамповкой, с целью повышения их точности до  $IT11...IT10$  и уменьшения шероховатости обработанной поверхности до  $Ra\ 40...10$ . Зенкеры широко используются в массовом и крупносерийном производствах. По сравнению с расточными резцами они, будучи мерными инструментами, не требуют настройки на размер, что обеспечивает сокращение вспомогательного времени и повышает точность отверстий.

Кинематика рабочих движений зенкеров подобна сверлам, однако зенкеры обеспечивают значительную производительность обработки отверстий и точность, так как снимают меньшие припуски ( $t = 1,5...4,0$  мм,  $d = 18...80$  мм), имеют большее число режущих кромок ( $z = 3...4$ ) и направляющих лент. Благодаря малой глубине стружечных канавок они имеют большую жесткость, чем сверла, а отсутствие поперечной кромки позволяет вести обработку с более высокими подачами.

Зенкеры классифицируют по следующим признакам:

- по виду обработки – цилиндрические зенкеры (применяются для увеличения диаметра отверстий (рис. 10.4, а), зенковки (применяются для обработки цилиндрических или конических углублений под головки болтов,

винтов, а также для снятия фасок (рис. 10.4, б–в), подрезки торцов бобышек и приливов в корпусных деталях (рис. 10.4, з);

– по способу крепления зенкера – хвостовые с цилиндрическими и коническими хвостовиками ( $d = 10 \dots 40$  мм,  $z = 3$ ) и насадные ( $d = 32 \dots 80$  мм,  $z = 4$ );

– по конструкции зенкера – цельные, сборные со вставными ножами диаметром  $d = 40 \dots 120$  мм и регулируемые по диаметру;

– по виду режущего материала – быстрорежущие и твердосплавные.

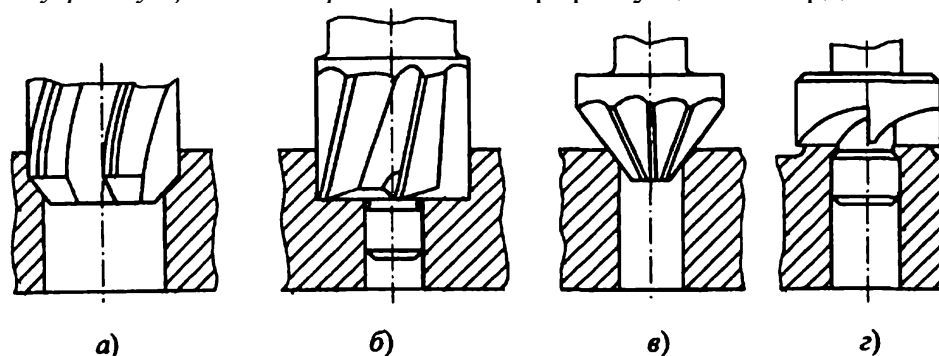


Рисунок 10.4 – Типы зенкеров: а – цилиндрический зенкер; б, в и з – зенковки

Цилиндрические зенкеры получили наибольшее распространение в механической обработке, они могут быть хвостовыми (рис. 10.5, а) и насадными (рис. 10.5, б). К основным конструктивным элементам зенкеров относятся: режущая часть (заборный конус), калибрующая часть, число канавок (зубьев), форма канавок и крепежная часть. К геометрическим параметрам относятся: угол при вершине  $2\varphi$ , передний  $\gamma$  и задний  $\alpha$  углы, углы наклона канавок  $\omega$  и главных режущих кромок  $\lambda$ .

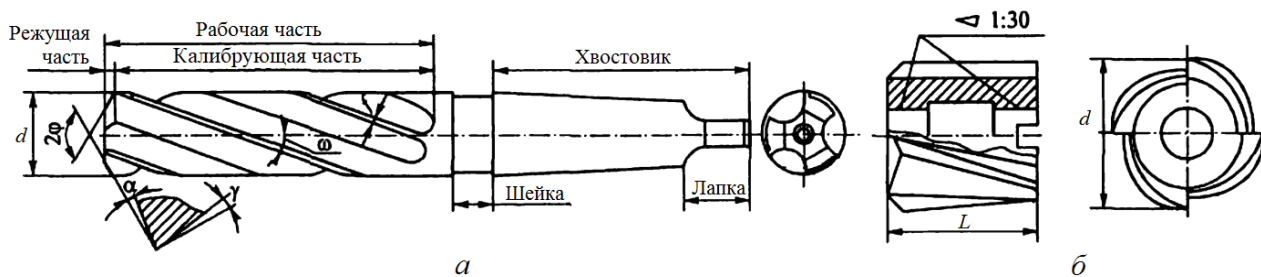


Рисунок 10.5 – Цилиндрические зенкеры: а – хвостовой; б – насадной

Режущая часть зенкера предназначена для удаления припуска. Ее длина

$$l_1 = (t + a) \cdot ctg\varphi = (1,5 \dots 2) \cdot t \cdot ctg\varphi,$$

где  $t$  – глубина резания;  $a$  – дополнительный размер, который облегчает вход зенкера в отверстие,  $a = (0,5 \dots 1,0) \cdot t$ ;  $\varphi$  – главный угол в плане (половина угла при вершине).

При обработке сталей угол  $\varphi = 60^\circ$ , а с целью повышения устойчивости зенкеров рекомендуется дополнительная заточка под углом  $\varphi_1 = 30^\circ$ . При обработке чугунов угол  $\varphi$  принимается  $60^\circ$  или  $45^\circ$ .

Калибрующая часть зенкера обеспечивает необходимую точность размера отверстия, направляет зенкер в процессе обработки отверстия и служит

запасом на его перетачивание. На ней расположены цилиндрические ленты шириной  $f = 0,8...2,0$  мм,  $d = 10...80$  мм, радиальное биение которых должно быть не более  $0,04...0,06$  мм.

Для снижения трения и исключения возможности защемления в отверстии, в зенкерах предусмотрена обратная конусность по лентам в пределах  $0,04...0,10$  мм на  $100$  мм длины в зависимости от диаметра инструмента. В твердосплавных зенкерах уменьшение диаметра задается в пределах  $0,05...0,08$  мм на длине режущей пластины, а диаметр корпуса инструмента снижается на  $0,01...0,02$  мм по отношению к размеру конца твердосплавных пластин.

Увеличение ширины лент твердосплавных зенкеров нецелесообразно, поскольку оно сопровождается налипанием на них мелкой стружки и приводит к снижению стойкости инструмента. При увеличении обратной конусности наблюдаются вибрации и происходит быстрая потеря размера зенкера при его перетачивании.

Сборные зенкеры с целью экономии инструментальных материалов оснащают ножами, закрепленными в корпусе из конструкционной стали, которые крепятся на оправке отверстием с конусностью  $1:30$  и торцевой шпонкой (рис. 10.6, *а-б*). Режущие ножи зенкеров изготавливают из быстрорежущей стали Р6М5 или напайными пластинами из твердых сплавов марок ВК8, Т15К6 и др. Корпус зенкера обеспечен клиновидными пазами с углом  $5...7^\circ$ , в которые устанавливаются ножи с рифлением на их опорных поверхностях (рис. 10.6, *а*). После износа зенкера возможна регулировка его диаметра за счет перестановки пластин по рифлениям. Недостатком такой конструкции является невозможность регулировки вылета пластин вдоль оси зенкера. Чтобы исправить данный недостаток, зенкеры с опорной стороны дополнительно оборудуют клиньями (рис. 10.6, *б*). При этом ножи и клинья вставляются в плоские пазы, благодаря чему оказывается возможным двойное регулирование: по диаметру и вдоль оси. Однако конструкция такого зенкера несколько усложняется.

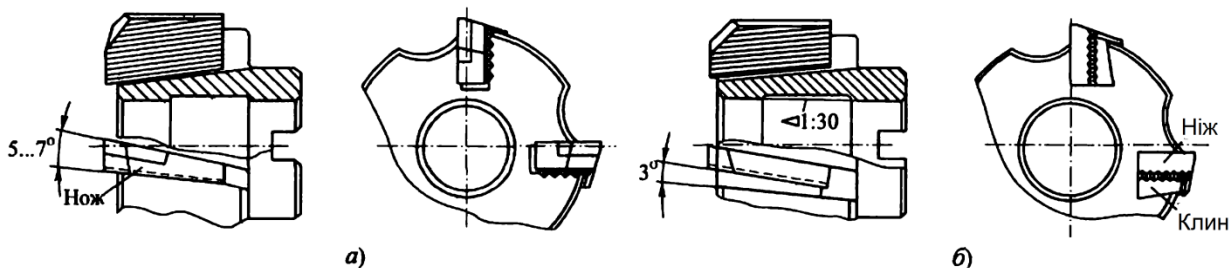


Рисунок 10.6 – Типы креплений ножей сборных зенкеров: *а* – клиновидные рифленые ножи; *б* – плоские ножи с клиньями

Зенковки (рис. 10.7), в отличие от обычных зенкеров, срезают стружки большей ширины и имеют менее устойчивое положение в радиальном направлении в момент врезки, и особенно – в случае расположения режущих кромок перпендикулярно оси инструмента. Этот процесс часто сопровождается вибрациями и, как следствие, выкрашиванием режущих кромок. Поэтому в

конструкциях зенковок для цилиндрических углублений и подрезки торцов предусмотрены направляющие цапфы, выполненные или за одно целое с корпусом в зенковках малых диаметров, или вставными, переменными, в зенковках больших диаметров, которые являются лучшими. При этом сначала цапфы входят в заранее просверленное отверстие, а затем начинается процесс обработки отверстия. По мере износа переменные цапфы заменяются.

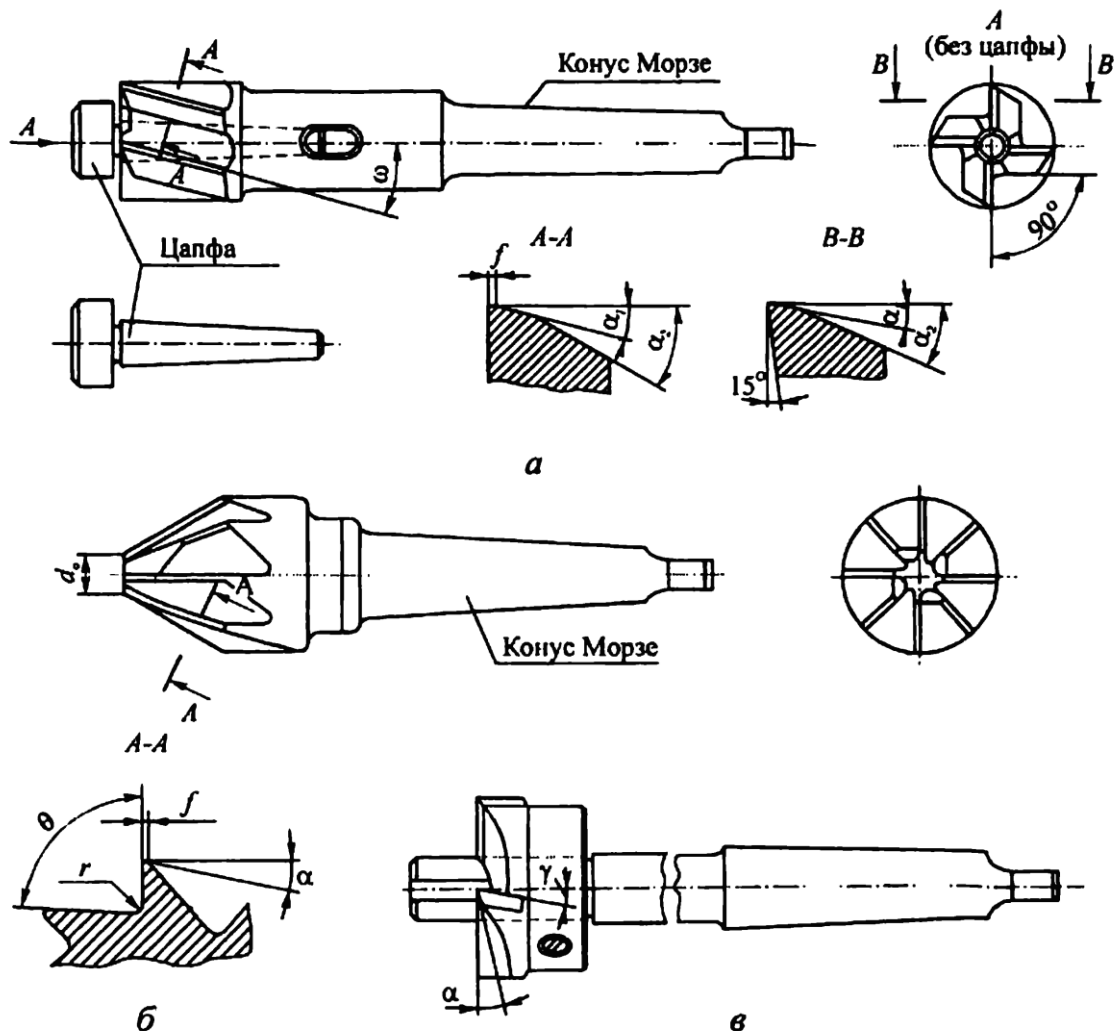


Рисунок 10.7 – Зенковки: *а* – для цилиндрических углублений; *б* – для подрезания торцов

Зенковки изготавливают из быстрорежущей стали, иногда оснащают напайными твердосплавными пластинами. Хвостовики зенковок соединяются с режущей частью сваркой, они могут быть цилиндрическими или коническими.

На рис. 10.7, *а* показана зенковка с переменной цапфой, имеющая винтовые стружечные канавки ( $z = 4$ ), применяемая для обработки цилиндрических углублений. Главные режущие кромки располагаются на торце, вспомогательные – на цилиндре. Задние поверхности – двухплоскостные с двойным задним углом  $\alpha_1 = 8^\circ$ ,  $\alpha_2 = 30^\circ$ , передний угол  $\gamma = \omega = 15^\circ$ . Зубцы затачиваются остро, на вспомогательных режущих кромках затачивается лента шириной  $f = 0,3$  мм и двойной задний угол  $\alpha_1 = 8^\circ$ ,  $\alpha_2 = 30^\circ$ .

У зенковок для конических углублений (рис. 10.7, б) главные режущие кромки расположены на конической поверхности, плоские передние поверхности расположены под углом  $\gamma = 0^\circ$ . В зависимости от диаметра ( $d = 12 \dots 60$  мм) число зубьев  $z = 4 \dots 12$ , а угол при вершине выбирается в соответствии с формой углубления и чаще всего берется равным  $2\varphi = 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  и  $120^\circ$ . Диаметр зенковки на торце  $d_0 = (0,15 \dots 0,18) \cdot d$ , угол впадины между зубьями  $\theta = 90 \dots 75^\circ$ . Режущая кромка затачивается остро или с оставлением узкой ленты шириной  $f = 0,03 \dots 0,05$  мм и заднего угла  $\alpha = 12^\circ$ .

Зенковки для подрезки торцевых поверхностей имеют режущие кромки только на торце, а вспомогательные кромки у них отсутствуют (рис. 10.7, в). Зенковки изготавливают хвостовыми или насадными, для обработки чугунов зубья зенковок оснащают напайными твердосплавными пластинами. Направляющие цапфы изготавливают сменными или за одно целое с корпусом инструмента, диаметры зенковок лежат в диапазоне  $d = 14 \dots 40$  мм.

Из-за тяжелых условий работы число зубьев в зенковках четное и равно  $2 \dots 4$ . Для отвода стружки предусмотрены канавки в форме углублений на торце цилиндрической части. С целью облегчения работы зенковок, имеющих значительную длину режущих кромок, рекомендуется на режущих кромках выполнять стружкоделительные канавки, расположенные на зубьях в шахматном порядке.

### 10.3 Развертки

*Развертки* – это осевые многолезвийные режущие инструменты, применяемые для чистовой обработки отверстий. Точность отверстий после развертывания составляет  $IT8 \dots IT6$ , а шероховатость поверхности – Ra  $1,25 \dots 0,32$ . При этом лучшие результаты достигаются при двукратном развертывании, когда первая развертка снимает  $2/3$  припуска, а вторая –  $1/3$  остатка. Такие же показатели можно получить и при шлифовании, однако после развертывания качество обработанной поверхности выше, так как на шлифованной поверхности остаются частички абразива, приводящие к ускоренному износу сопрягаемых деталей.

Кинематика рабочих движений при развертывании подобная сверлению и зенкерование. В отличие от зенкеров, развертки имеют большее число зубьев ( $z = 6 \dots 14$ ) и, как следствие, лучшее направление в отверстиях. Они снимают значительно меньший припуск ( $t = 0,15 \dots 0,50$  мм), чем при зенкерование. С целью достижения минимальной шероховатости поверхности развертки при обработке сталей работают на низких скоростях резания ( $v = 4 \dots 12$  м/мин), то есть до области появления нароста. Однако благодаря большому числу зубьев производительность при развертывании достаточно высока, так как машинное время уменьшается за счет увеличения числа зубьев:

$$t_1 = \frac{L_o}{S_z z n},$$

где  $L_o$  – длина обрабатываемого отверстия, мм;  $S_z$  – подача на зуб, мм;  $z$  – число зубьев;  $n$  – частота вращения развертки (заготовки), мин<sup>-1</sup>.

Для получения высокой точности отверстий развертки изготавливают с более жесткими допусками, чем зенкеры, а отверстия под развертывание получают сверлением, зенкерованием или растачиванием. Развертывание непосредственно после сверления используют только при обработке отверстий небольших диаметров (менее 3 мм). Развертки классифицируют:

- по виду привода – ручные и машинные;
- по способу крепления – хвостовые и насадные;
- по виду обрабатываемого отверстия – цилиндрические и конические;
- по виду режущего материала – быстрорежущие, твердосплавные и алмазные;
- по типу конструкции – цельные и сборные (со вставными ножами).

Ручными развертками (рис. 10.8, *a*) обрабатывают отверстия путем вращения инструмента вручную воротком, в который вставляется квадрат цилиндрического хвостовика. Эти развертки ( $d = 3 \dots 40$  мм) изготавливают из инструментальной стали марки 9ХС. Для лучшего направления развертки в отверстия у нее затачивают большой длины заборный конус и калибрующую часть. В остальном конструкция ручных разверток не отличается от машинных.

Машинные конечные и насадные развертки (цельные и сборные, рис. 10.8, *б–г*) применяют для обработки отверстий на сверлильных, токарных, револьверных, координатно-расточных и других станках.

Хвостовики машинных разверток бывают цилиндрические ( $d = 1 \dots 9$  мм) и конические ( $d = 10 \dots 32$  мм), с относительно длинной шеей и конусом Морзе. Хвостовики разверток изготавливают из конструкционных сталей 45 или 40Х и соединяют с рабочей частью из быстрорежущей стали сваркой. Насадные развертки крепятся на оправках, при этом коническое посадочное отверстие (конусность 1:30) обеспечивает центровку с высокой точностью. Для передачи крутящего момента на правом торце развертки делается паз под шпонку.

Рабочая часть цилиндрических разверток (рис. 10.8) состоит из режущей и калибрующей частей. На левом торце развертки снимается фаска под углом  $\varphi = 45^\circ$ , которая облегчает вхождение инструмента в отверстие и предохраняет режущие кромки от повреждения. Далее идет заборный конус с углом в плане  $\varphi$ , зубья на котором снимают припуск, заданный на обработку. Фаска и заборный конус составляют режущую часть развертки. Для улучшения условий работы развертки при врезке наименьший диаметр заборного конуса берется несколько меньше диаметра отверстия под развертывание.

Угол в плане  $\varphi$  заборного конуса оказывает сильное влияние на условия работы развертки, поскольку он определяет соотношение между шириной  $b$  и толщиной  $t$  слоя, срезаемого каждым зубом. Из рис. 10.9 видно, что

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}, \quad a = S_z \sin \varphi,$$

угол  $\varphi$  также определяет усилие подачи  $P_x$

$$P_x = R_{xy} \sin \varphi,$$

где  $R_{xy}$  – равнодействующая радиальной  $P_y$  и осевой  $P_x$  составляющих силы резания.

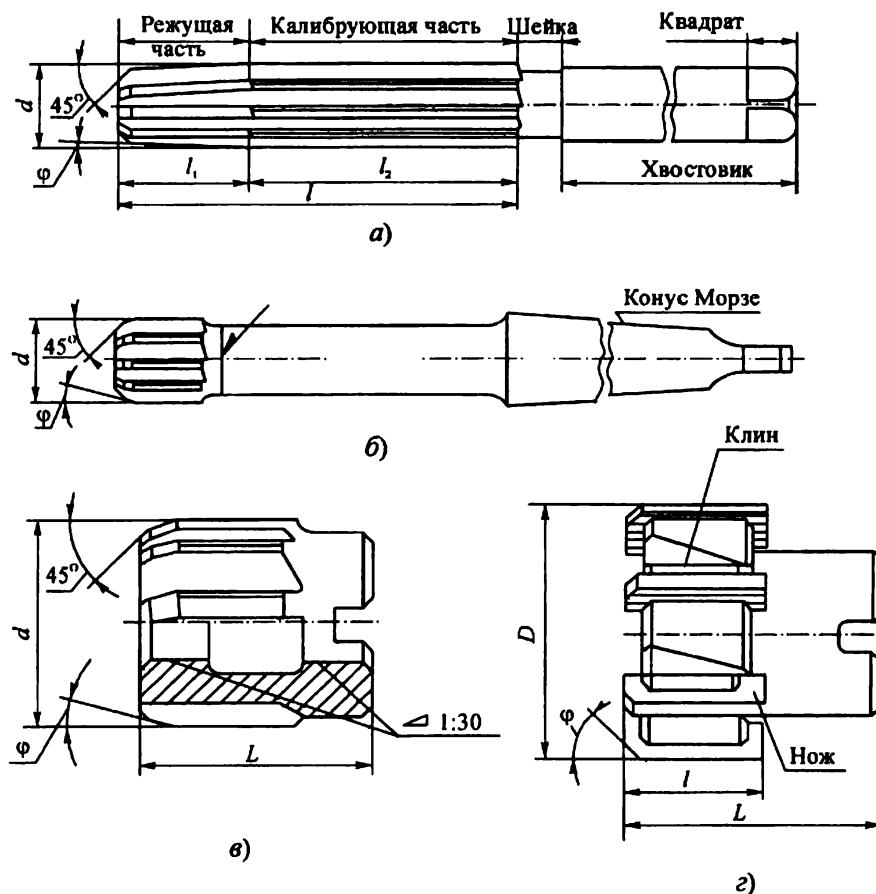


Рисунок 10.8 – Типы цилиндрических разверток: *a* – ручная; *б* – насадная; *в* – сборная

Калибрующая часть развертки примерно до половины ее длины  $l_2$  цилиндрическая, на остальной части развертка затачивается с небольшой обратной конусностью, то есть с уменьшением диаметра по направлению к хвостовику. В ручных развертках величина обратной конусности на 100 мм длины равна 0,01...0,05 мм, в машинных развертках при жестком креплении инструмента – 0,04...0,06 мм; при плавающем креплении в патроне – 0,08...0,015 мм. Обратная конусность необходима для уменьшения разбивки отверстия при выходе из него развертки. Так как ее величина мала, то при небольшой длине калибрующей части обратную конусность иногда делают сразу за сборными конусом, не оставляя цилиндрического участка. Общая длина рабочей части разверток: в ручных развертках  $l = (4...10) \cdot d$ , в машинных  $l = (0,75...2,0) \cdot d$ .

При обработке отверстий высокой точности необходимо обращать особое внимание на радиальное биение зубов разверток по их оси. Оно измеряется в начале калибровочной части и должно быть не более 0,01...0,02 мм.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Назовите типы сверел и их основные конструктивные элементы.
2. Проведите общее сравнение зенкеров и зенковок.
3. Опишите конструкцию разверток и условия их работы.

## ТЕМА 11. РЕЗЦЫ И ФРЕЗЫ. ИХ КОНСТРУКЦИЯ И ВЫБОР

### 11.1 Классификация резцов

Резцы являются одним из самых распространенных режущих инструментов и применяются при работе на токарных, расточных, долбежных и других станках при обработке наружных и внутренних поверхностей самых разнообразных форм. Резцы можно идентифицировать по следующим основным признакам:

– типу станка (рис. 11.1) – токарные, долбежные, автоматноревольверные, расточные для горизонтально-расточных станков, специальные;

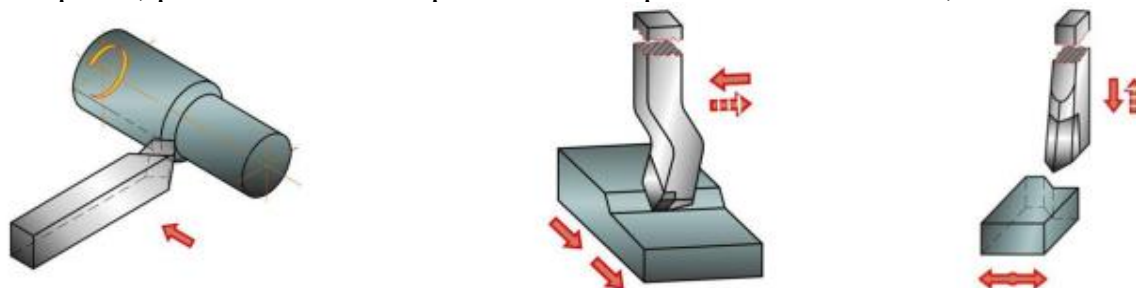


Рисунок 11.1 – Классификация резцов по виду станка

– виду операции (рис. 11.2) – проходные, подрезные, отрезные, фасонные, резбонарезные и т.д.;

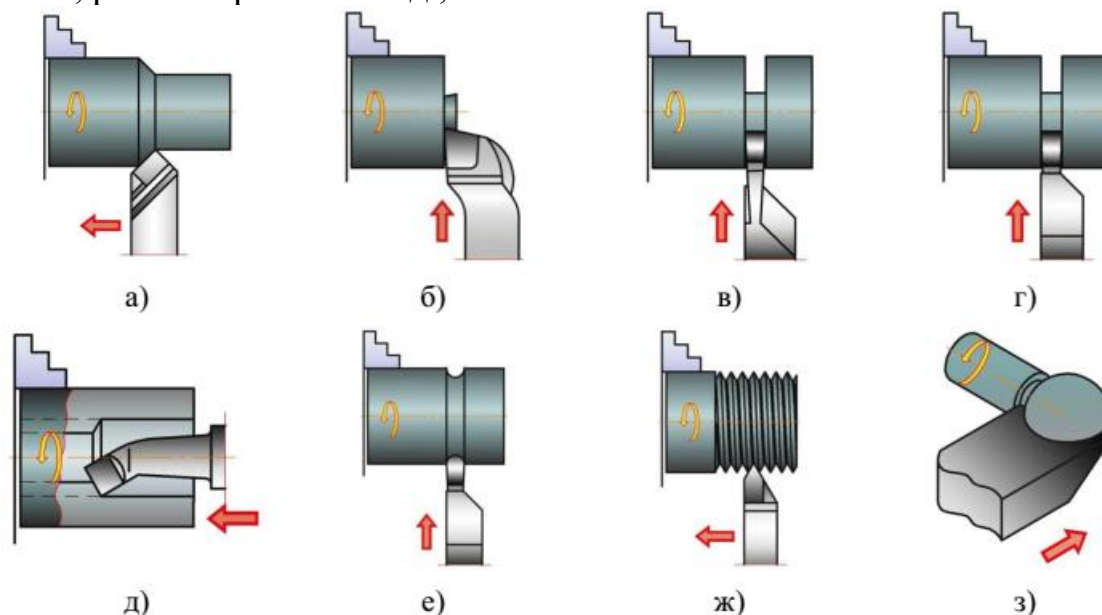


Рисунок 11.2 – Классификация резцов по виду обработки: а – проходные, б – подрезные, в – отрезные, г – прорезные, д – расточные, е – галтельные, ж – резьбовые, з – фасонные

– материалу режущей части – быстрорежущие, твердосплавные, с пластинами из керамики или сверхтвердых материалов (алмаз, эльбор и др.);

– форме сечения крепежной части – прямоугольные, квадратные, круглые;

– конструкции рабочей части (рис. 11.3) – прямые, отогнутые, изогнутые, с оттянутой головкой;

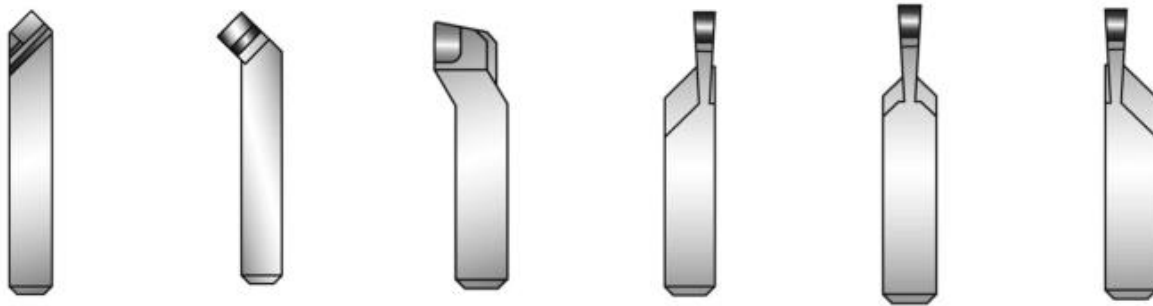


Рисунок 11.3 – Классификация резцов по конструкции рабочей части

- конструкции – резцы с рабочей частью, выполненной за одно целое с крепежной; с рабочей частью, приваренной в стык; с наплавленной, напаянных, наклеенной пластинкой; с механическим креплением пластинок или вставок;
- виду инструментального материала – из сверхтвердых материалов, с пластинками из твердого сплава, минерально-керамическими пластинками, из быстрорежущей, легированной или углеродистой стали;
- характеру обработки – обдирочные (черновые), чистовые, для тонкого точения.

По направлению подачи резцы бывают правые и левые (рис. 11.4).

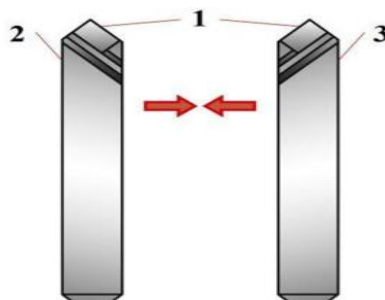


Рисунок 11.4 – Определение резцов по направлению подачи: 1 – главная режущая кромка; 2 – левый резец; 3 – правый резец

– по форме передней поверхности резца – плоская передняя поверхность (рис. 11.5, а) применяется при обработке хрупких материалов, а плоская поверхность с фаской (рис. 11.5, б) – для обработки любых материалов и при наличии ударной нагрузки ( $f = 0,2 \dots 0,5$  мм,  $\gamma = -3 \dots 5^\circ$ ). Радиусная поверхность (рис. 11.5, в) служит для завивки стружки ( $l = 2 \dots 2,5$  мм,  $R = 2l$ ), так же применяют радиусную поверхность с фаской (рис. 11.5, г).

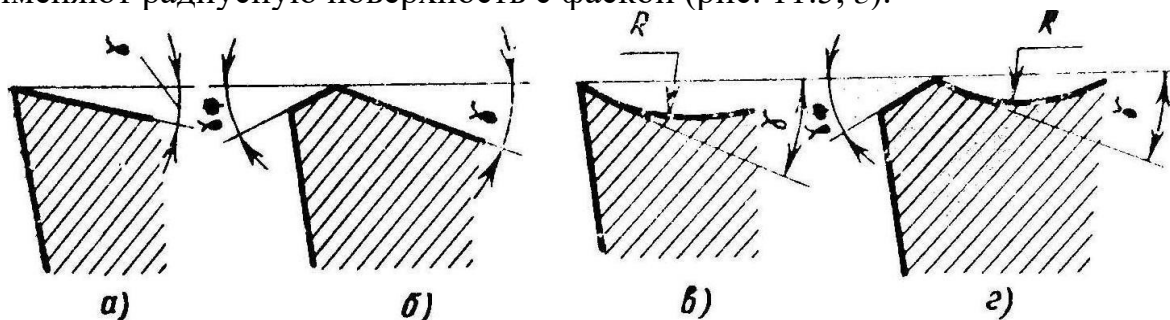


Рисунок 11.5 – Форма передней поверхности резца

Из всех видов токарных резцов наиболее распространены проходные, они предназначены для точения наружных поверхностей, подрезки торцов, уступов и т.п. Призматическое тело проходного резца (рис. 11.6), как и любого другого, состоит из режущей части (головки) и державки. Головка резца имеет переднюю поверхность 1, главную заднюю 2 и вспомогательную заднюю 3 поверхности (пересечения этих поверхностей образуют главную 4 и вспомогательную 5 режущие кромки).

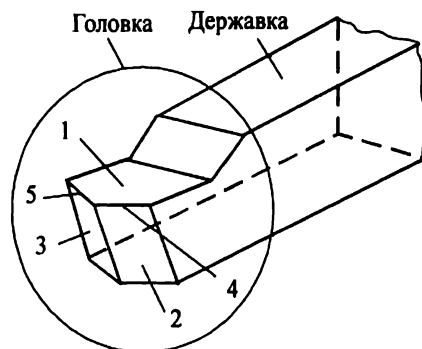


Рисунок 11.6 – Конструктивные элементы токарного резца: 1 – передняя поверхность; 2 – главная задняя поверхность; 3 – вспомогательная задняя поверхность; 4 – главная режущая кромка; 5 – вспомогательная режущая кромка

По передней поверхности сходит стружка, снимаемая резцом. Главная задняя поверхность повернута к поверхности резания, образованной главной режущей кромкой, а вспомогательная задняя поверхность – к обработанной поверхности детали. Указанные поверхности и режущие кромки после затачивания располагаются под определенными углами относительно двух координатных плоскостей и направления подачи, выбираемых с учетом кинематики станка.

В качестве координатных плоскостей принимают две взаимно перпендикулярные плоскости:

- плоскость резания, проходящую через главную режущую кромку и вектор скорости резания, касательный к поверхности резания;
- основную плоскость, проходящую через эту же кромку и нормаль к вектору скорости резания.

*Подрезные резцы* (рис. 11.7, а и б) изготавливают с отогнутой и прямой державками. Хотя отогнутая державка усложняет изготовление резцов, она обеспечивает следующие преимущества:

- универсальность, поскольку проходные резцы могут работать на проход (1) и на подрезание (2);
- возможность вести обработку в труднодоступных местах.

*Расточные резцы* (рис. 11.7, в и г) используют для отделки внутренних сквозных и глухих отверстий, а также внутренних канавок. Из-за большого вылета державки, уменьшенной площади ее сечения и осложненного отвода стружки расточные резцы работают в более тяжелых условиях, чем проходные. Державки расточных резцов выполняют круглыми, а в месте крепления они

имеют утолщение квадратного сечения. Диаметр державки зависит от диаметра обрабатываемого отверстия и равняется

$$d_d = (0,5 \dots 0,8) \cdot d_s,$$

где  $d_s$  – диаметр обрабатываемого отверстия, мм.

Расточные резцы имеют малую вибростойкость и жесткость, чтобы исключить врезку задней поверхности резца в поверхность резания, лезвие резца располагают несколько ниже оси отверстия, а заднюю поверхность выполняют криволинейной формы.

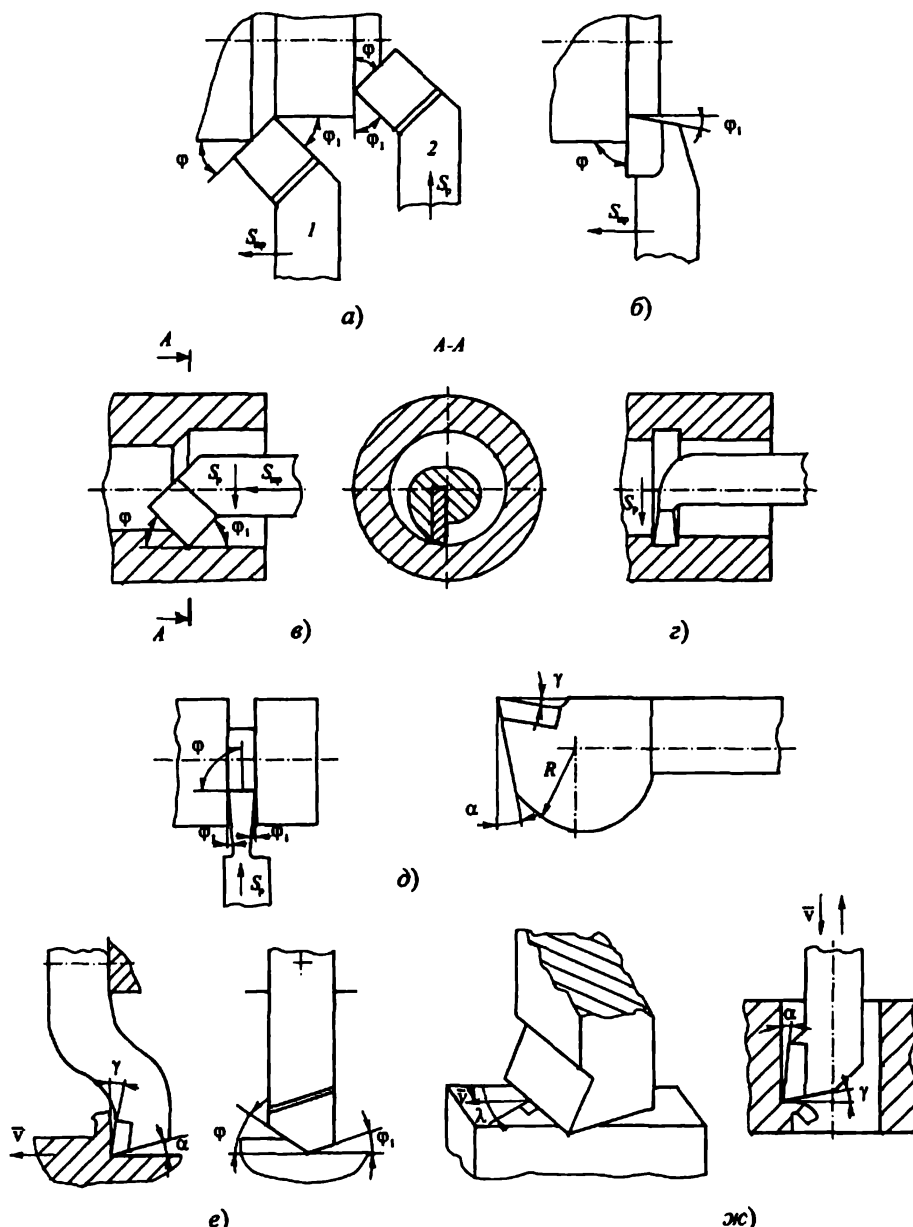


Рисунок 11.7 – Типы резцов: а – подрезной (проходной отогнутый правый); б – подрезной (проходной упорный правый); в – расточной для сквозных отверстий; г – расточной канавочный; д – отрезной; е – строгальный; ж – долбежный

Отрезные резцы (рис. 11.7, д) применяют для отрезки заготовок из прутка и проточки наружных канавок в заготовках на токарных и револьверных станках и станках-автоматах. Вследствие тяжелых условий работы (большой

вылет резца, усложненные условия деформирования металла при переходе в стружку, малая жесткость режущей части и, следовательно, низкая вибростойкость) отрезные резцы чаще всего изготавливают из быстрорежущей стали. Режущая часть имеет главную режущую кромку с углом  $\varphi = 90^\circ$  и две вспомогательные кромки с углами  $\varphi_1 = 1,5 \dots 3^\circ$ . Если нужно обработать торец заготовки без оставления стержня (бобышки) в ее центре, то главную режущую кромку затачивают под углом  $\varphi = 75 \dots 80^\circ$ .

При использовании напайных твердосплавных режущих пластин длина главной режущей кромки отрезного резца должна быть не менее 3 мм. Для повышения жесткости в вертикальной плоскости головка резца обычно делается утолщенной, а режущая кромка, во избежание отрыва твердосплавной пластины, устанавливается ниже оси центров станка на расстоянии 0,5...1,0 мм. Передний угол  $\gamma$  влияет на вибростойкость отрезных резцов, которая снижается с его уменьшением. Поэтому рекомендуется затачивать угол  $\gamma = 15 \dots 20^\circ$  с укрепляющим фаской шириной  $f = 0,2 \dots 0,3$  мм и под углом  $\gamma_f = 0 \dots -5^\circ$ , задний угол  $\alpha = 10 \dots 12^\circ$ .

*Фасонные резцы* применяются для обработки тел вращения, имеющих внешние или внутренние фасонные поверхности. Обработка ими обычно ведется на станках-автоматах и револьверных станках в условиях крупносерийного или массового типа производства. В качестве заготовок деталей чаще всего используют калиброванный прокат в виде прутка. По сравнению с другими типами резцов фасонные резцы имеют следующие *преимущества*:

- обеспечивают идентичность формы детали и высокую точность размеров, которая не зависит от квалификации рабочего;
- имеют высокую производительность за счет большой длины активной части режущей кромки;
- имеют большой запас на перетачивание;
- довольно простое перетачивание по плоскости передней грани;
- не требуют больших затрат времени на наладку станка.

К числу *недостатков* фасонных резцов можно отнести:

- сложность изготовления и высокая стоимость;
- специальные резцы пригодны для изготовления деталей только заданного профиля;
- большие радиальные нагрузки у резцов, работающих с радиальной подачей, вызывают вибрации и упругие деформации нежестких заготовок, что требует снижения подачи и уменьшает производительность;
- кинематические передние и задние углы фасонных резцов в процессе резания изменяются по длине режущих кромок в большом диапазоне, существенно отличаясь от оптимальных значений.

Основные типы фасонных резцов: стержневые (рис. 11.8, *а*), круглые (рис. 11.8, *б*), призматические радиальные (рис. 11.8, *в*) призматические тангенциальные (рис. 11.8, *г*). Из них наибольшее применение нашли круглые и призматические резцы, работающие с радиальной подачей.

Стержневые резцы подобны призматическим, но имеют малый запас на перетачивание, они применяются в основном для затылования фрез, а также для нарезания резьбы. Крепление этих резцов в суппорте станка аналогично креплению токарных резцов.

Призматические тангенциальные резцы позволяют обрабатывать детали малой жесткости, но требуют специальных станков и поэтому на практике применяются очень редко. Их недостатком также является непостоянство передних и задних углов в процессе снятия припуска.

Сравнение круглых и призматических резцов с радиальной подачей показывает, что круглые резцы более технологичны и могут быть изготовлены с большей точностью. Однако они имеют меньший запас на перетачивание и меньшую жесткость крепления, так как у насадных резцов диаметр оправки зависит от диаметра резца. Последний рекомендуется брать не более 100 мм из-за ухудшения качества быстрорежущей стали, используемой для изготовления таких резцов. Призматические резцы имеют большую жесткость и крепятся с помощью ласточкиного хвоста в державках стержневого типа, имеют большой запас на перетачивание и обеспечивают большую точность обработки.

Для обработки внутренних фасонных поверхностей используются только круглые фасонные резцы с креплением на станке с помощью хвостовика, выполненного за одно целое с резцом. Особенностью фасонных резцов, работающих с радиальной подачей, является переменное значение передних и задних углов по длине режущей кромки.

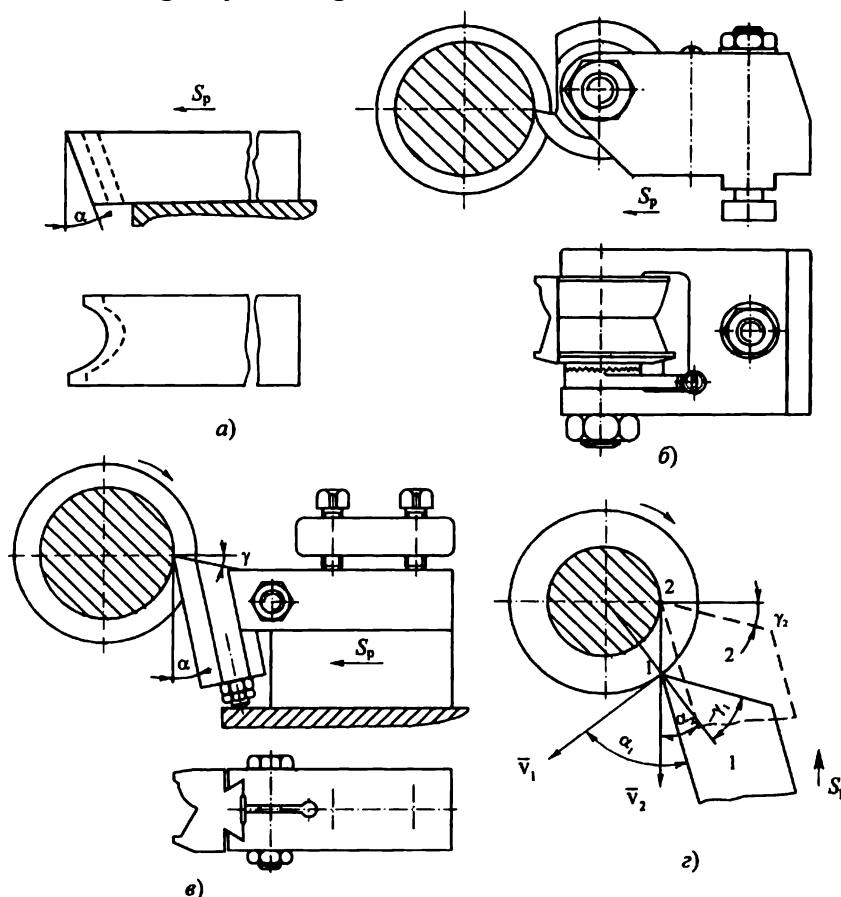


Рисунок 11.8 – Типы фасонных резцов: *a* – стержневой; *б* – круглый; *в* – призматический радиальный; *г* – призматический тангенциальный

## 11.2 Сменные многогранные пластины, их крепление

Повысить производительность работ, выполняемых на металлообрабатывающем оборудовании, позволяют сменные твердосплавные пластины, используемые для токарных резцов. Такие пластины делают использование резца удобнее, так как являются съемными и позволяют быстро заменить их в случае износа или поломки. Для использования сменных элементов не подойдут резцы цельной конструкции, в которых режущая часть выполнена за одно с державкой (рис. 11.9).



Рисунок 11.9 – Сменные твердосплавные пластины для токарных резцов

Пластины для расточных или отрезных резцов могут быть выполнены из различных марок твердых сплавов, что очень удобно, так как это позволяет иметь целый набор режущих элементов для обработки заготовок из различных материалов.

Использование сменных пластин для режущего инструмента – это экономически выгодное решение, так как в случае поломки или износа нет необходимости заменять весь резец новым инструментом, а достаточно поменять только его режущую часть. Целесообразно использовать инструмент со сменными твердосплавными пластинами и в том случае, если стоит задача автоматизации технологических процессов, что особенно актуально в условиях мелко- и среднесерийного производства, где номенклатура изделий может меняться достаточно часто.

Среди преимуществ твердосплавных пластин, устанавливаемых на токарные резцы, следует выделить следующие:

- в сравнении с резцами цельного типа, пластины отличаются невысокой стоимостью;
- замена твердосплавного режущего элемента не занимает много времени;
- обеспечивается высокая надежность в условиях интенсивной эксплуатации;
- при необходимости сменные режущие элементы можно перенастраивать.

Все современные модели сменных режущих элементов для токарных резцов унифицированы, что позволяет легко подобрать оптимальный вариант для определенного типа обработки и марки металла заготовки. Благодаря применению сменных твердосплавных пластин с механическим креплением значительно увеличивается срок службы державки токарного резца, отпадает необходимость в осуществлении таких вспомогательных операций, как заточка режущей части и ее пайка. Важно, что при использовании такого режущего инструмента снижение температуры и силы резания может составить 40%. Благодаря характеристикам твердых сплавов, используемых для изготовления пластин, с помощью последних можно выполнять обработку металла, изменяя режимы резания.

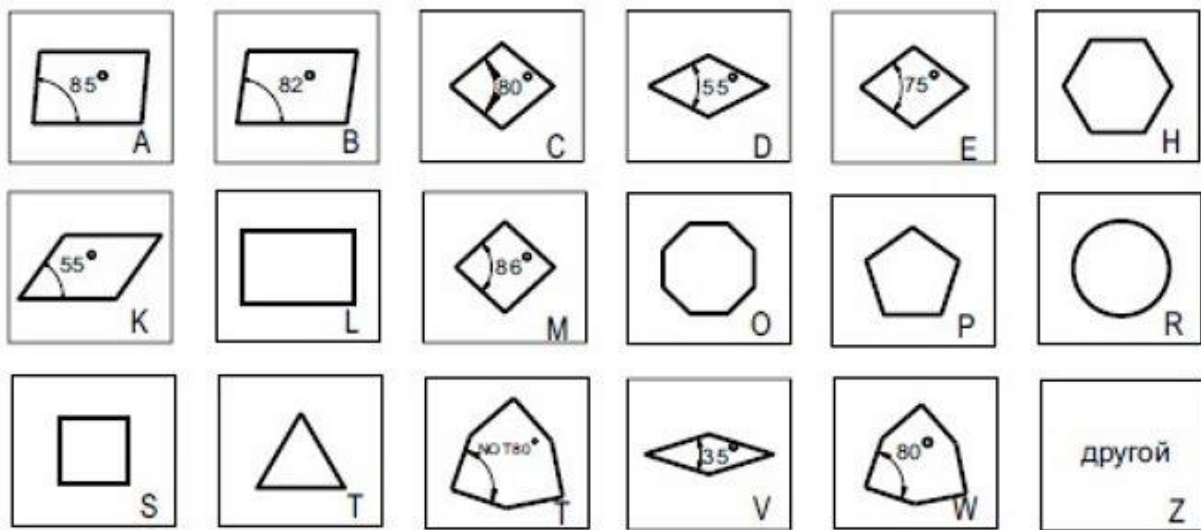


Рисунок 11.10 – Формы твердосплавных пластин для резцов

Механическое крепление СМП из разных инструментальных материалов, чаще из твердого сплава, получает все большее распространение в конструкциях режущего инструмента, так как не требует пайки и заточки, исключает появление микротрещин, создает благоприятные предпосылки для унификации, использования стандартных узлов и элементов. С механическим креплением СМП изготавливают резцы, фрезы, сверла, протяжки и другие инструменты. В автоматизированном производстве более 60% твердосплавного инструмента оснащаются СМП.

Механическое крепление СМП обеспечивает возможность легкой замены на инструменте или восстановления ее режущей способности путем поворота пластины, что особенно важно на станках-автоматах и автоматических линиях. Время, затрачиваемое на замену или поворот СМП, в 2–4 раза меньше, чем на замену резца. Существуют стандартные значения основных размеров СМП: диаметр вписанной в многоугольник окружности  $d$ , толщина пластины  $S$  и расстояние от вершины к вписанной окружности по диагонали  $m$ . Каждый из этих размеров (параметров) имеет предельные отклонения (допуск), в зависимости от которых СМП делятся на одиннадцать классов точности.

Для обеспечения безналадочной замены СМП на инструменте необходимо применять пластины точного выполнения классов точности А либо

Ф по ГОСТ 19042-80, и способы крепления пластин обеспечивают их точную установку в гнезде корпуса с базированием по боковым и опорным поверхностям. Конструкция узла крепления СМП во многом определяет работоспособность резцов и точность установки пластины на державке резца. Схемы наиболее применяемых способов крепления СМП на державке резца (корпусе инструмента) показаны на рис. 11.11. Способы крепления СМП определяют надежность крепления пластин в корпусе резца, ее быструю сменяемость и точность позиционирования (точность позиционирования – это разница расстояний между крайними положениями вершины резца в измеряемом направлении).

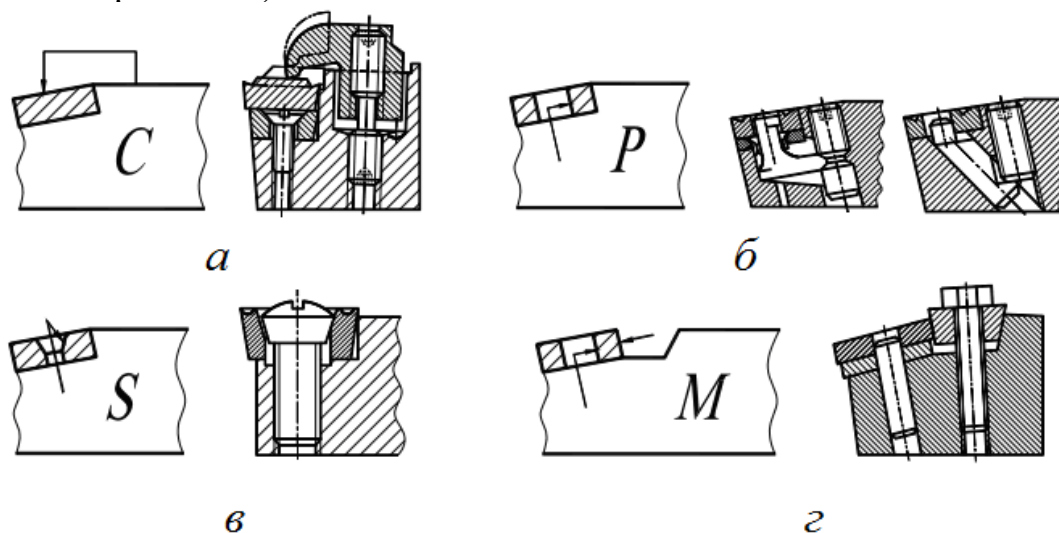


Рисунок 11.11 – Условные обозначения способов и схемы конструкций устройств механического крепления СМП на державке резца (корпусе инструмента)

Способ крепления СМП прихватом сверху (рис. 11.11, а) применяют для пластин без отверстия, в том числе металлокерамических. Пластины устанавливают в закрытый паз и базируют его по опорной и боковой поверхностям, при этом обеспечивается достаточная точность базирования пластин и высокая надежность их крепления. На ножах для обработки материалов, дающих сливную стружку (например, сталей), может применяться стружколом.

Способ крепления СМП L-образным рычагом или кривой тягой (рис. 11.11, б) применяют для пластин с цилиндрическим отверстием. Пластины устанавливают в закрытый паз и базируют его по опорной и боковой поверхностям. При этом обеспечивается высокая точность базирования пластин и достаточная надежность их крепления.

Способ крепления СМП с коническим отверстием (рис. 11.11, в) обеспечивает прижатие к опорной и боковым сторонам закрытого паза. Крепление осуществляется винтом с конической головкой, ось которого смещена на 0,15 мм относительно оси отверстия СМП, установленной на корпусе инструмента. К недостаткам этого способа крепления СМП относится

необходимость полностью выворачивать и заворачивать винт крепления СМП при ее замене.

Достаточно распространенным является способ крепления СМП с цилиндрическим отверстием с помощью клина (рис. 11.11, з), который подгоняет СМП к штифту, жестко закрепленному в корпусе инструмента. В этом случае сила зажима противоположна по направлению силе резания, что не исключает возможности ослабления крепления СМП и, как следствие, появления вибраций. Этот способ крепления не обеспечивает точного базирования СМП и не может использоваться для бесподналадочной замены. Надежность такого крепления повышает наличие на клине «козырька», который поджимает СМП к опорной поверхности.

### 11.3 Общие сведения о фрезях

*Фрезы* – это многозубые режущие инструменты, применяемые для обработки плоскостей, пазов, фасонных поверхностей, тел вращения, а также для разрезания материалов.

В процессе фрезерования в контакте с заготовкой, как правило, находится несколько зубьев, снимающих стружку переменной толщины. При этом благодаря большой суммарной активной длине режущих кромок обеспечивается высокая производительность процесса фрезерования. Повышению производительности также способствует высокая скорость фрезерования, которая достигается за счет периодического выхода зубьев из зоны резания, обеспечивающего охлаждение и снятие теплового напряжения в режущем клине.

Фреза получает вращение от главного привода, а заготовка, закрепленная на столе станка, движение подачи от отдельного привода станка, кинематически не связанного с вращением фрезы. Движение подачи может быть прямолинейным, вращательным или винтовым, а режущие кромки фрезы – прямолинейными, наклонными к оси, винтовыми или фасонными. Это обусловило появление значительного разнообразия конструкций фрез и широкую сферу их применения.

Фрезы можно классифицировать по следующим основным признакам:

1. Конструкция режущих зубьев и способ их заточки – фрезы с остrokонечными зубьями, которые перетачивают по задней поверхности и с затылованными зубьями, которые перетачивают по передней грани.

2. Форма и расположение режущих кромок относительно оси вращения инструмента – фрезы цилиндрические, дисковые, торцевые, концевые, угловые и фасонные (рис. 11.12).

3. Направление зубьев к оси фрезы – фрезы прямозубые, винтовые, с наклонными зубьями.

4. Способ крепления на станке – фрезы насадные с отверстием под оправку и концевые с цилиндрическим или коническим хвостовиком.

5. Конструкция фрезы – цельные и сборные со вставными зубьями, в том числе с напаянными или механически закрепленными режущими пластинами из твердого сплава.

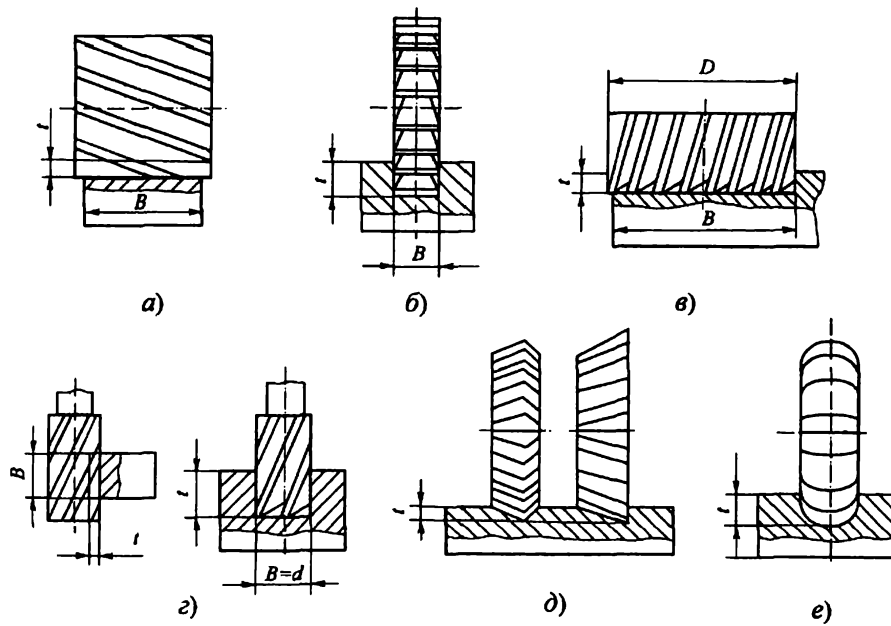


Рисунок 11.12 – Типы фрез: *a* – цилиндрическая; *б* – дисковая; *в* – торцевая; *г* – концевая; *д* – угловая; *е* – фасонный

По конструкции зубьев фрезы делятся на две большие группы: с заостренными и затылованными зубьями (рис. 11.13). Принципиальные различия этих фрез заключаются в способе заточки, форме и количестве зубьев, трудоемкости изготовления, устойчивости, производительности и качестве обработанной поверхности.

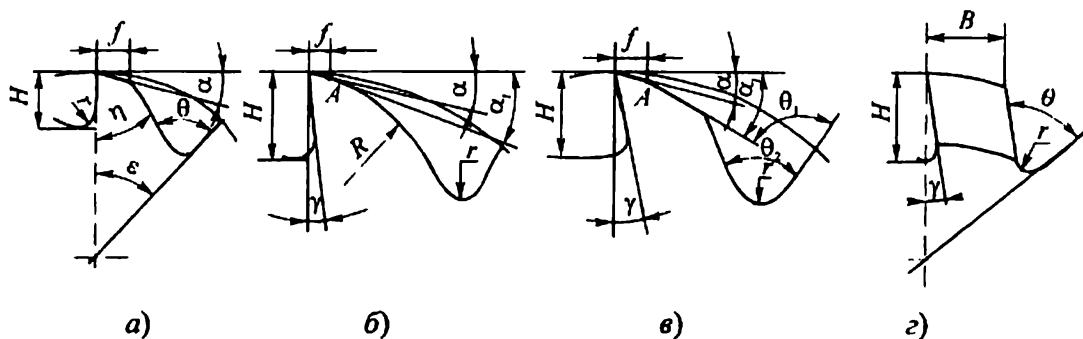


Рисунок 11.13 – Формы зубьев фрез: *a* – трапецевидные; *б* – параболические; *в* – усиленные; *г* – затылованный зубец

Процесс фрезерования характеризуется снятием тонких стружек переменной толщины. При этом для цилиндрических фрез толщина стружки начинается с нуля. Перетачивание острых зубьев по задней поверхности, где в основном сосредоточен износ при фрезеровании, позволяет уменьшить припуск на перетачивание, увеличить срок службы фрезы, уменьшить объем зубьев и главное – увеличить их число  $z$ , от которого пропорционально зависит производительность процесса фрезерования. Последняя определяется минутной подачей, которая равняется

$$S_{\text{мин}} = S_z z n,$$

где  $S_z$  – подача на один зуб;  $z$  – количество зубьев;  $n$  – частота вращения фрезы, об/мин.

При увеличении числа зубьев фрезы уменьшается шероховатость обрабатываемой поверхности и уменьшается неравномерность процесса резанья. Форма зубьев должна быть такой, чтобы обеспечивалась необходимую прочность зуба, допускать как можно больше перетачиваний, объем канавок между зубьями должен был достаточным для размещения стружки. На практике применяют три формы остроконечных зубьев: трапециевидную, параболическую и усиленную.

*Трапециевидная форма* (рис. 11.13, а) наиболее проста в изготовлении, но зуб немного ослаблен, поэтому имеет небольшую высоту и малый объем стружечной канавки. По мере перетачивания зуба по задней грани (фаска  $f = 1 \dots 2$  мм) его высота уменьшается и он становится более прочным. Однако такая форма зуба допускает небольшое число перетачиваний и применяется на фрезях для чистовой обработки. При этом число зубьев из-за их малого объема должно быть максимальным. Канавки в таких фрезях изготавливают либо фрезерованием, либо шлифовкой эльборовыми или алмазными кругами в цельных заготовках на станках с ЧПУ.

Угол впадин между зубьями

$$\theta = \eta + \varepsilon,$$

где  $\eta = 45 \dots 50^\circ$  – угол остроты зуба;  $\varepsilon = 360^\circ/z$  – угловой шаг зубьев.

*Параболическая форма зуба* (рис. 11.13, б) характеризуется наибольшей прочностью на изгиб, так как его спинка, оформленная по параболе, обеспечивает равную прочность во всех сечениях по высоте зуба. Недостатком этой формы является необходимость для каждой высоты зуба иметь свою сложную фасонную канавочную фрезу. Поэтому в целях упрощения профиля спинки таких фрез параболу часто заменяют дугой круга радиусом

$$R = (0,3 \dots 0,4) \cdot d.$$

На передней поверхности зубьев параболической формы предусмотрен прямолинейный участок, от длины которого зависит количество перетачиваний фрезы. Причем перетачивания допускаются только по задней поверхности (фаска  $f$ ), при этом задний угол  $\alpha$  должен быть меньше угла  $\alpha_1$  на  $10 \dots 15^\circ$  ( $\alpha_1$  – угол между касательной к параболе в точке  $A$ ). При несоблюдении этого условия в процессе перетачивания ширина ленты будет сильно меняться.

*Усиленная форма зуба* (рис. 11.13, в) применяется для тяжелых работ вместо параболической формы. Такой зуб имеет ломаную спинку, а также увеличенную толщину и высоту. Получают эти зубья двойным фрезерованием угловыми фрезами с углами  $\theta_1 = 28 \dots 30^\circ$ . Хотя при этом число операций увеличивается вдвое, такие зубья проще в изготовлении, чем параболические. Они имеют большой запас на перетачивание и высокую прочность. При этом используются стандартные канавочные фрезы с прямолинейными режущими кромками. При перетачивании зубья затачиваются по задней поверхности под углом  $\alpha$ , чтобы избежать биения режущих кромок. Иногда оставляют небольшие цилиндрические ленты шириной  $f_n = 0,02 \dots 0,03$  мм, которые упрощают контроль биения зубьев фрезы.

*Затылованный зуб* (рис. 11.13, з) внешне отличается большей толщиной, а главное – формой задней поверхности, и выполняется при специальной операции, называемой затыловыванием, с целью создания задних углов во всех точках режущих кромок. Достигается это за счет того, что радиальное сечение зубца с фасонным профилем по мере поворота фрезы вокруг оси смещается по направлению к центру с помощью фасонного резца или шлифовального круга. Благодаря затыловыванию профиль режущей кромки зуба при перетачиваниях по передней грани во всех радиальных сечениях остается неизменным независимо от его сложности. Это является основным преимуществом таких фрез наряду с весьма простой и нетрудоемкой по выполнению операцией перетачивания. Кроме того, зубья такой формы имеют высокую прочность, а по мере перетачивания объем канавок для размещения стружки увеличивается, что положительно сказывается на работе фрезы. В то же время, фрезы с затылованными зубьями имеют ряд существенных недостатков, главные из которых:

- число зубьев в затылованных фрезах значительно меньше, чем в фрезах с острыми зубьями. Это объясняется тем, что затылованный зуб имеет большую толщину, так как при перетачивании по передней поверхности приходится снимать больший припуск, чтобы избавиться от износа, который сосредоточен на задней поверхности зуба;

- при перетачивании наблюдается большее радиальное биение зубьев, приводящее к увеличению шероховатости обработанной поверхности и снижению стойкости фрез;

- в фрезах с нешлифованным профилем зубьев после термообработки остаются обезуглероженные участки на задней поверхности, которые уменьшают их стойкость;

- остаточные термические напряжения могут вызвать искажение профиля режущих кромок фрезы.

Из-за указанных недостатков фрезы с затылованными зубьями уступают по производительности и качеству обработанной поверхности фрезам с острыми зубьями. Однако из-за простоты переточки они широко используются при обработке фасонных поверхностей.

#### **11.4 Цилиндрические и дисковые фрезы**

Особенностью конструкций этих фрез является расположение главных режущих кромок на цилиндре, ось которого совпадает с осью вращения инструмента и параллельна обрабатываемой поверхности. В цилиндрических фрезах отсутствуют вспомогательные режущие кромки, и они работают в условиях свободного резания. Зубья же дисковых фрез, на одном или обоих торцах обеспечены вспомогательными режущими кромками. Причем, в отличие от цилиндрических фрез, их диаметр значительно больше длины фрезы. Оба типа фрез, как правило, насадные, с отверстием и шпоночными пазами для крепления на оправках.

Для снижения колебаний сил резания и вибраций зубья цилиндрических фрез часто делают винтовыми. При этом возникает нежелательная осевая

составляющая силы резания. Однако условия отвода стружки из зоны резания фрез с винтовыми зубьями значительно лучше, чем фрез с прямыми зубьями. При выборе фрезы желательно принимать такую конструкцию, в которой число зубьев будет

$$z = m\sqrt{d},$$

где  $m$  – коэффициент, зависящий от конструкции фрезы и условий ее работы ( $m = 2$  – для чистовых фрез с мелким зубом и  $\omega = 15...20^\circ$ ,  $m = 1,5$  – для фрез с большим зубцом и  $\omega$  до  $30^\circ$ ).

Фрезы с мелким зубом изготавливают диаметром 40...90 мм, при малом угле  $\omega$  осевые усилия небольшие, форма зуба трапециидальная, углы  $\gamma = 15^\circ$ ,  $\alpha = 16^\circ$ . Фрезы с большим зубом имеют меньшее число зубьев, угол  $\gamma$  в них может достигать до  $45^\circ$ , форма зуба усиленная или параболическая с высотой

$$H = (0,3...0,4) \cdot \frac{\pi d}{z}.$$

При обработке сталей средней твердости углы  $\gamma = 15...16^\circ$ ,  $\alpha = 10...14^\circ$ . Из-за больших осевых усилий необходимо принимать меры для их устранения, например, путем крепления на одной оправке двойных составных фрез разнонаправленными зубьями. В этом случае осевые усилия правой и левой фрез при работе уравниваются.

Цилиндрические фрезы с крупным зубом предназначены для снятия больших припусков и особенно эффективны при обработке поверхностей большой площади. С целью экономии быстрорежущей стали фрезы больших диаметров делают сборными со вставными режущими зубьями, а корпуса фрез изготавливают из конструкционной стали. Большое значение при конструировании фрез любого типа имеет правильное определение их внешнего диаметра. С увеличением этого диаметра можно увеличить число зубьев, а следовательно, и производительность процесса фрезерования, повысить жесткость крепления. Однако при этом возрастает крутящий момент и расход мощности при той же скорости резанья, увеличивается время на врезку и ход фрезы. Поэтому необходимо выбирать оптимальное значение диаметра фрезы.

Для сокращения номенклатуры фрез их внешние диаметры выбирают из ряда стандартных значений, числовая последовательность которых является геометрической прогрессией со знаменателями  $\varphi = 1,26$  и  $1,58$ , равными знаменателям частоты вращения шпинделей фрезерных станков.

**Дисковые фрезы**, в отличие от цилиндрических, предназначенные для обработки узких поверхностей, прорезания пазов, подрезки уступов, отрезки заготовок и т.п. Они работают в более тяжелых условиях несвободного резания, которое часто сопровождается вибрациями из-за низкой поперечной жесткости корпусов фрез и неблагоприятных условий отвода стружки из зоны резания. Различают следующие виды дисковых фрез: двух- и трехстороннего резанья, пазовые, прорезные и отрезные (пилы).

В дисковых *двусторонних фрезах* режущие кромки зубьев имеются на цилиндрической и одной торцевой поверхностях (рис. 11.14, а), а у

трехсторонних – на обоих торцах (рис. 11.14, б). Эти фрезы могут обрабатывать соответственно две или три взаимно перпендикулярные поверхности в пазах и уступах. Они изготавливаются с мелкими зубьями для чистовой обработки и с большими зубьями – для черновой обработки. Последние характеризуются удалением больших объемов металла из глубоких пазов, выемок, поэтому они имеют большой объем стружечных канавок. Зубья этих фрез при малой ширине режущих кромок или прямые, или наклонные к оси. Последние обеспечивают более равномерное фрезерование, имеют оптимальную геометрию торцевых зубьев и лучшие условия удаления стружки.

Трехсторонние фрезы изготавливают с разнонаправленными зубьями (фрезы «зигзаг»), что позволяет создать на торцевых режущих кромках положительные передние углы  $\gamma_m > 0$  (рис. 11.14, в). При перетачиваниях ширина такой фрезы уменьшается, поэтому используют также сдвоенные фрезы из двух половинок, между которыми закладывают мерное кольцо. Сплошные фрезы изготавливают диаметром  $d = 63 \dots 125$  мм и шириной  $B = 6 \dots 28$  мм, а сборные со вставными ножами – диаметром  $d = 75 \dots 200$  мм и шириной  $B = 12 \dots 60$  мм. Такие ножи изготавливают из быстрорежущей стали с креплением в клиновидных пазах с помощью рифлений (рис. 11.14, б).

Пазовые фрезы (рис. 11.14, г) предназначены для фрезерования точных по ширине пазов. Внешне они похожи на дисковые трехсторонние фрезы, но имеют меньшую длину главных режущих кромок с геометрическими параметрами зубьев:  $\gamma = 10 \dots 15^\circ$  и  $\alpha = 20^\circ$ . Вспомогательные режущие кромки на торцах получают затачиванием с углом в плане  $\varphi_1 = 1 \dots 2^\circ$ , стружечные канавки в них нарезают только на цилиндрической части. Пазовые фрезы изготавливают диаметром  $50 \dots 100$  мм и шириной  $3 \dots 16$  мм. Иногда, чтобы при перетачиваниях сохранить постоянную ширину паза  $B$ , их изготавливают с затылованными зубьями.

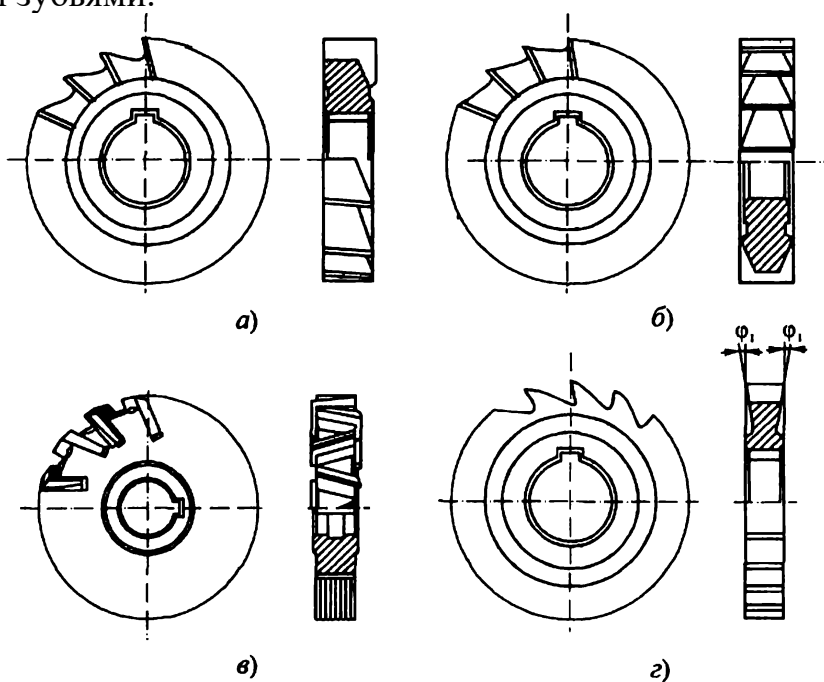


Рисунок 11.14 – Виды дисковых фрез: а – двусторонняя; б – трехсторонняя; в – трехсторонняя с разнонаправленными вставными зубцами; г – пазовая

## 11.5 Прорезные и отрезные фрезы

По форме зуба прорезные и отрезные фрезы подобны пазовым и используются для прорезания неглубоких и узких пазов, например шлицевых, шириной  $B = 0,2 \dots 6,0$  мм, а также для разрезания заготовок любого профиля и толщины. Цельные фрезы диаметром  $20 \dots 315$  мм изготавливают с мелкими, средними и крупными зубьями, в которых углы  $\gamma = 0 \dots 10^\circ$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\varphi_1 = 0,5 \dots 1^\circ$  (рис. 11.15, а). Сборные фрезы диаметром  $250 \dots 2000$  мм оснащают вставными ножами (рис. 11.15, б) или сегментами из быстрорежущей стали, содержащими  $4 \dots 8$  зубьев и закрепленными заклепками на диске пилы, изготовленном из конструкционной стали (рис. 11.15, в).

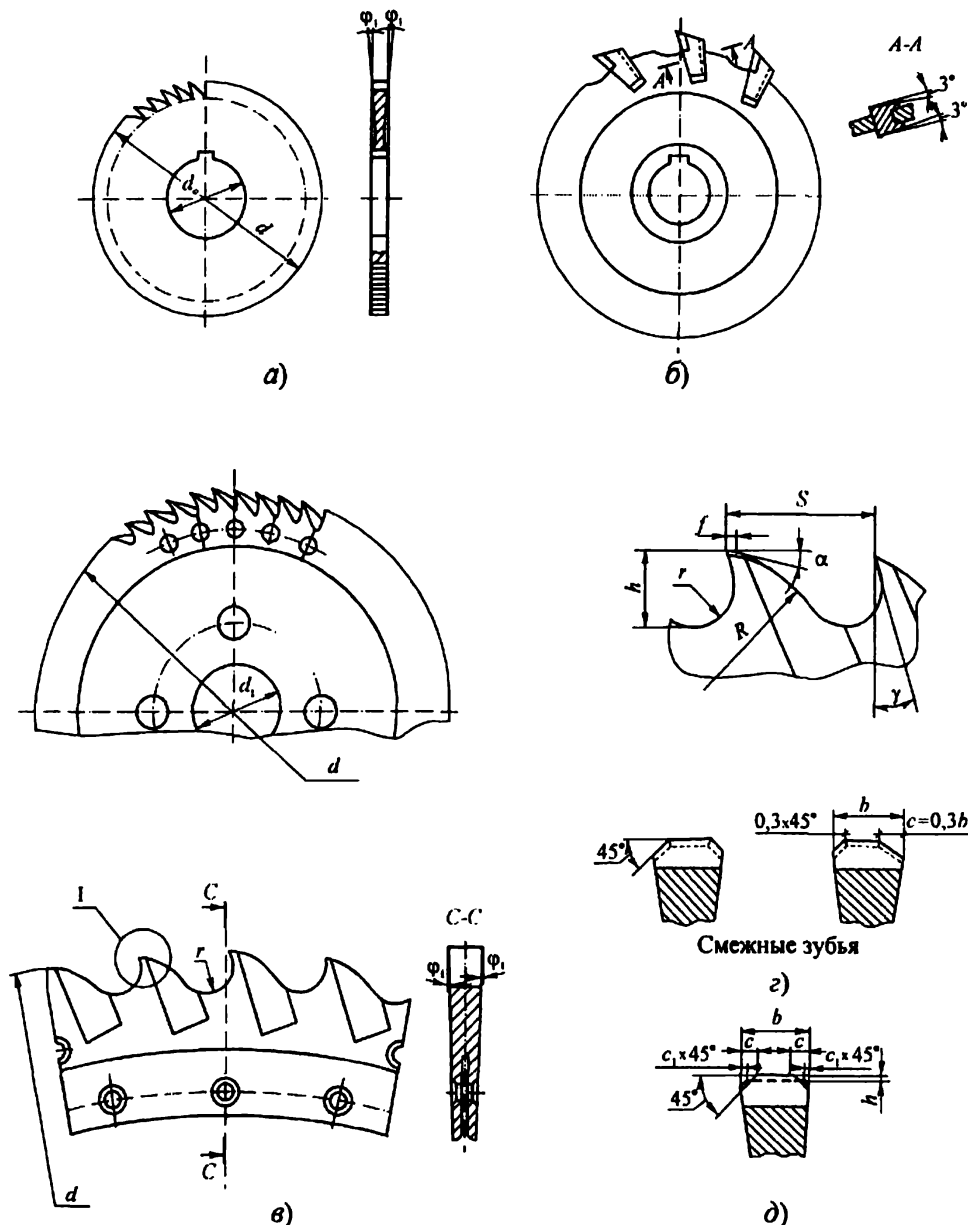


Рисунок 11.15 – Фрезы прорезные и отрезные: а – цельная; б – отрезная сборная; в – сегментная; з, д – схемы резанья

Для уменьшения трения и улучшения проникновения СОЖ в зону резания в зубьях с боковых сторон имеются выемки глубиной  $0,5$  мм. В

отличие от других конструкций отрезных фрез, у сегментных спинка зубьев выполнена по дуге окружности, а перетачивание производится по передней поверхности на специальных станках, работающих в полуавтоматическом режиме. При этом передний угол, в зависимости от твердости обрабатываемого материала, принимается равным  $\gamma = 0 \dots 25^\circ$ . По мере износа пил предполагается замена изношенных частей на новые.

С целью улучшения отвода стружки и повышения устойчивости зубьев в отрезных фрезах при ширине резанья более 2 мм используют различные схемы группового резания с распределением среза по ширине и толщине между смежными зубьями. На практике используются различные схемы, две из которых приведены на рис. 11.15,  $\varepsilon$  и  $\delta$ . В первой схеме предусмотрена заточка фасок шириной  $c = 0,3 b$  с разных сторон двух смежных зубьев, во второй – все зубья делятся на группы из двух (иногда из трех) зубьев, один из которых (прорезной) располагается с завышением по высоте на величину  $h = 0,15 \dots 0,50$  мм и имеет по углам фаски шириной  $c = 0,5 \dots 1,8$  мм, а другой – зачистной, изготавливается сплошным. Вторая схема используется, например, в сегментных пилах, а также в шлицевых протяжках.

У торцевых и концевых фрез (рис. 11.14,  $\nu$  и  $\zeta$ ) ось вращения расположена перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. При этом, кроме главных режущих кромок, находящихся на цилиндрической поверхности, на торце фрезы имеются вспомогательные режущие кромки, расположенные под углом  $\varphi_1$ . Торцевые фрезы, как правило, изготавливают насадными, если их диаметр становится значительно меньше длины, то они переходят в группу концевых фрез. Торцевые фрезы широко используют при обработке плоских поверхностей, в том числе ступенчатых, которые невозможно обработать цилиндрическими фрезами. По сравнению с цилиндрическими, они имеют следующие преимущества:

- конструкция торцевых фрез позволяет разместить большее количество зубьев на той же длине контакта с заготовкой, что обеспечивает большую производительность и более равномерное фрезерования (при этом угол контакта не зависит от толщины срезаемого слоя);

- торцевые фрезы можно изготавливать с жесткими и массивными корпусами, с надежным механическим креплением режущих элементов, например, в виде СМП из твердого сплава и СТМ;

- при фрезеровании плоскостей можно получать меньшую шероховатость за счет большего числа вспомогательных режущих кромок на торце фрезы и при наличии зачистных зубьев с  $\varphi_1 = 0$ .

Благодаря этим преимуществам торцевые фрезы по сравнению с другими типами фрез нашли наибольшее применение в металлообработке. Главные режущие кромки торцевых и концевых фрез могут быть прямолинейными, но чаще всего они наклонные или винтовые ( $\omega = 10 \dots 15^\circ$  в торцевых фрезах и  $20 \dots 45^\circ$  в концевых). Благодаря этому обеспечивается лучший отвод стружки из зоны резания и более равномерная работа фрезы. Кроме того, из-за угла  $\omega$  наклона зубьев к оси фрезы создаются положительные передние углы на торцевых режущих кромках.

Главный угол в плане  $\varphi$  у торцевых фрез можно изменять в широких пределах от  $90^\circ$  и ниже. Для повышения стойкости и производительности обработки угол  $\varphi$  уменьшают до  $45...60^\circ$  и даже до  $10...20^\circ$ . Такие фрезы называют торцово-коническими, так как главные режущие кромки у них находятся на конической поверхности (рис. 11.16). Стойкость и производительность таких фрез повышается за счет уменьшения толщины среза при заданной подаче на зуб. Однако при уменьшении угла  $\varphi$  до  $10^\circ$  резко возрастает осевая составляющая силы резания, отталкивающая фрезу от заготовки, в результате чего фрезерование становится возможным только на очень жестких станках.

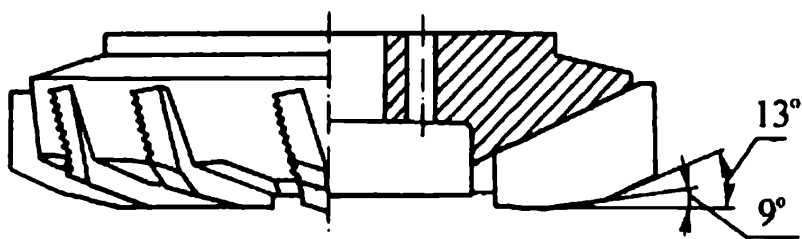


Рисунок 11.16 – Торцово-коническая сборная фреза

*Концевые фрезы* применяются для обработки пазов, уступов и взаимно перпендикулярных поверхностей, а также для контурной обработки заготовок. Главные режущие кромки, которые выполняют основную работу по удалению припуска, как и в торцевых фрезах, расположены на цилиндрической поверхности, а вспомогательные (зачищающие) – на торце. Зубья изготавливают обычно винтовыми, с углом наклона к оси, достигающим до  $\omega = 30...45^\circ$ . Такое большое значение угла  $\omega$  при наличии большого объемом стружечных канавок обеспечивает надежный отвод стружки из зоны резания даже при очень ограниченных условиях резания. По этой причине число режущих зубьев у концевых фрез значительно меньше, чем у торцевых фрез. Однако при этом снижение производительности компенсируется за счет увеличения подачи на зуб.

На рис. 11.17, *а* показана трехзубая стандартная концевая фреза и ее геометрические параметры. Хвостовики таких фрез цилиндрические ( $d$  от 3 до 20 мм), либо конические с конусом Морзе ( $d = 14...63$  мм), у фрез больших диаметров используются хвостовики с конусом 7:24. Крепления фрез в шпинделе станка при цилиндрическом хвостовике выполняется с помощью цанговых патронов, а при коническом хвостовике, имеющем внутреннюю резьбу, – натяжным болтом, проходящим через полый шпиндель станка.

Разновидностью концевых фрез являются шпоночные фрезы и фрезы для обработки Т-образных пазов, которые нашли широкое применение в столах станков и корпусах станочных приспособлений.

*Шпоночные фрезы* (рис. 11.17, *б–в*) имеют два зуба с глубокими прямыми или наклонными ( $\omega = 12...15^\circ$ ) стружечными канавками и длиной рабочей части, равной примерно трем диаметрам фрезы. При этом диаметр сердцевины фрезы увеличен до  $0,35d$  для максимальной жесткости инструмента.



## ТЕМА 12. ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЗЬБЫ

### 12.1 Резьбовые резцы и гребенки

Инструменты для обработки резьб весьма разнообразны, по конструкции их можно разделить на три группы:

- лезвийные инструменты, формирующие резьбу путем снятия припуска режущими кромками;
- безстружечные элементы, формирующие резьбу методом холодного пластического деформирования;
- абразивные инструменты, работающие методом вышлифовывания профиля резьбы.

На практике наибольшее распространение получили инструменты двух первых групп, к которым относятся резцы, гребенки, метчики, плашки и резьбонарезные головки.

*Резьбовые резцы* используют для нарезания резьб всех видов. Их преимуществами являются простота конструкции, технологичность и универсальность, одним резцом можно нарезать внешнюю и внутреннюю резьбу разного диаметра и шага. Резьбовые резцы работают по методу копирования, поэтому профиль их режущих кромок должен соответствовать профилю впадин нарезаемой резьбы.

Удаление припуска в процессе нарезания резьбы выполняется в условиях несвободного резания при значительной деформации снимаемого материала. Формирование резьбы чаще всего выполняется за несколько проходов при малых сечениях срезаемой стружки, из-за чего производительность процесса нарезания резьбы низкая, а резьбовые резцы используются в единичном и мелкосерийном производстве.

Резьбовые резцы являются фасонным инструментом, изготавливаются трех типов: стержневые, призматические и круглые. На рис. 13.1 представлены типовые конструкции резьбовых резцов *стержневого типа*.

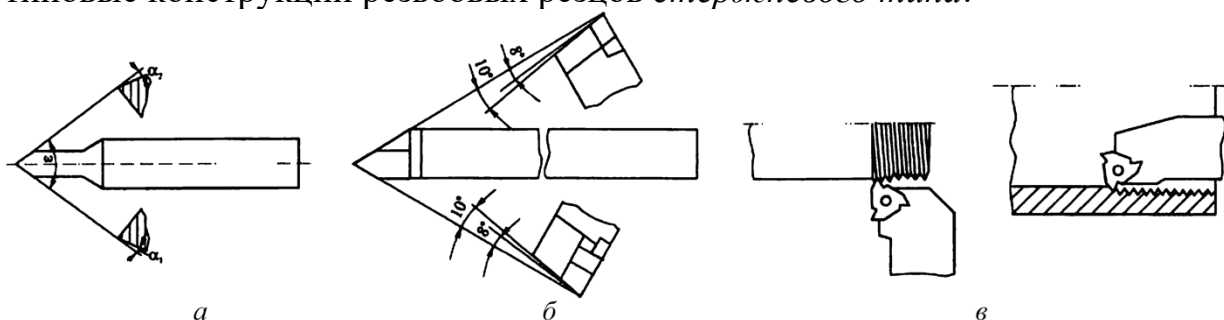


Рисунок 12.1 – Типы стержневых резьбовых резцов: *а* – цельный из быстрорежущей стали; *б* – с напаянной твердосплавной пластиной; *в* – с механическим креплением твердосплавной пластины

От обычных токарных резцов резьбовые отличаются формой головки и профилем режущих кромок. Передний угол для простоты перетачивания берут  $\gamma = 0^\circ$ . При черновом нарезании резьбы задние углы  $4...6^\circ$ , при чистовом –  $8...10^\circ$ , на вершине резца угол  $\alpha_e = 15...20^\circ$ . При нарезании резьб малого

диаметра с большой глубиной профиля или многозаходных резьб с большим углом подъема резьбы ( $3...4^\circ$ ) следует учитывать влияние этого угла на величину фактических передних и задних углов, измеренных в статическом состоянии. При многопроходном нарезании остроугольной резьбы образование профиля резьбы может осуществляться по трем схемам (рис. 12.2, а–в):

- *профильная* – с радиальной подачей резца;
- *генераторная* – с подачей резца под углом к оси заготовки;
- *комбинированная* – подача под углом при черновой обработке и радиальная подача при чистовой.

При нарезании резьб с глубоким профилем (трапецеидальных) формирование резьбы на предыдущих операциях осуществляется резцами с различным профилем режущих кромок (рис. 12.2, г).

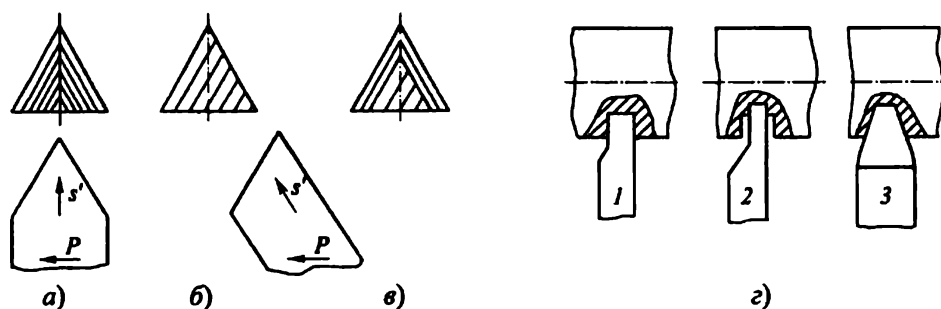


Рисунок 12.2 – Схемы, используемые при нарезании резьбы: а – профильная; б – генераторная; в – комбинированная; г – для трапецеидальной резьбы

Стержневые резцы обычно имеют небольшой запас на перетачивание и их установка относительно заготовки связана с определенными сложностями, которые не возникают при использовании фасонных призматических и круглых резьбонарезных резцов.

*Призматические резцы* (рис. 12.3, а) крепятся в стержневой державке с наклоном под углом  $\alpha$ , который доходит до  $15^\circ$ . С целью снижения сил резания передний угол  $\gamma$  устанавливают в зависимости от свойств обрабатываемого материала. Если  $\gamma > 0$ , то при расчете профиля режущей части в сечении, перпендикулярном к задней грани, производят коррекцию на винтовое положение обрабатываемых поверхностей канавки резьбы.

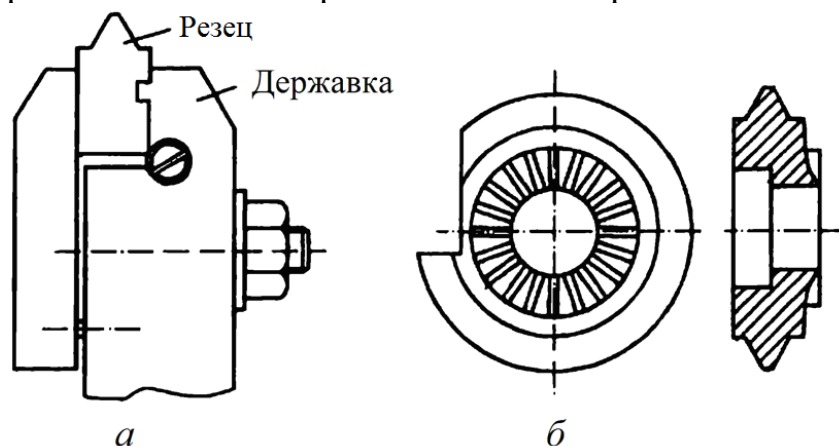


Рисунок 12.3 – Фасонные резьбовые резцы: а – призматический; б – круглый

*Круглые резцы* (рис. 12.3, б) более технологичны в изготовлении, чем призматические, но они имеют меньший запас на перетачивание и менее жесткое крепление. Для создания задних углов центр резца устанавливают выше центра заготовки.

*Гребенки* (рис. 12.4) – это многониточные фасонные резцы, которые могут быть стержневыми, призматическими или круглыми. Главным образом их используют для нарезки крепежных резьб с мелким шагом, то есть с малой высотой профиля. Режущая часть гребенки состоит из заборной части длины  $l_1$ , заточенной под углом  $\varphi$  к оси и калибрующей части  $l_2$ :

$$l_1 = (1,5...2,0) \cdot P; \quad l_2 = (3...6) \cdot P,$$

где  $P$  – шаг резьбы, мм.

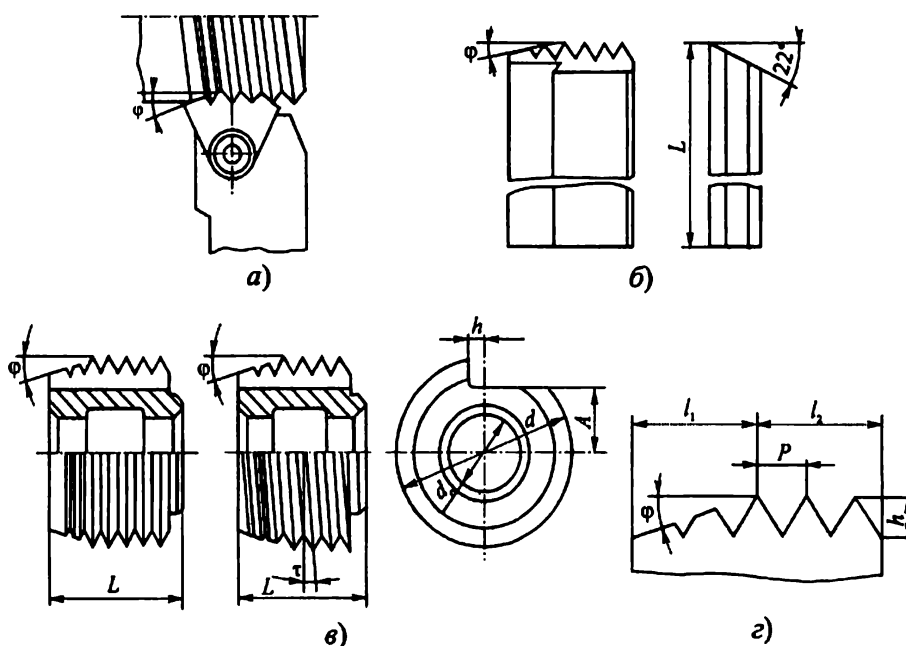


Рисунок 12.4 – Резьбонарезные гребенки: а – стержневая с механическим креплением твердосплавной части; б – призматическая; в – круглая; г – рабочая часть гребенки

Угол заборной части  $\varphi = 25...30^\circ$ , благодаря чему нагрузка распределяется между несколькими режущими кромками зубьев. Поэтому число рабочих ходов уменьшается в несколько раз по сравнению с резьбовыми резцами. При нарезании резьбы за один проход длину заборной части увеличивают до  $l_1 = 4P$ . В начале рабочего хода гребенка имеет радиальную подачу на врезку, а затем перемещается вдоль оси заготовки вращающейся с подачей на один оборот, равный шагу.

*Стержневые гребенки* изготавливают цельными или с механически закрепленными специальными твердосплавными пластинами. У *призматических гребенок* задний угол образуется за счет наклона гребенки в державке, аналогично призматическим резцам. *Круглые гребенки* бывают с кольцевыми или винтовыми резцами, они используются для нарезания как внешней, так и внутренней резьбы. Для уменьшения искажения профиля

нарезаемой резьбы передний угол равен  $\gamma = 0^\circ$ , а задний образуется за счет превышения центром гребенки центра заготовки.

## 12.2 Резьбонарезные фрезы

Использование фрезерования вместо точения при нарезании внешней и внутренней резьбой обеспечивает значительное повышение производительности за счет:

- использования многозубого инструмента с большой суммарной активной длиной режущих кромок, одновременно снимающих стружку (гребенчатые фрезы);
- увеличения толщины среза на один зуб (дисковые фрезы);
- увеличения скорости резания за счет оснащения резцов твердым сплавом (головки для вихревого нарезания).

*Гребенчатые фрезы* (рис. 12.5) используются для нарезания остроугольных внешних и внутренних резьб с малым шагом на цилиндрических и конических поверхностях заготовок. По сути, они являются набором дисковых фрез, выполненных за одно целое на одном корпусе с профилем зубьев, соответствующих профилю резьбы.

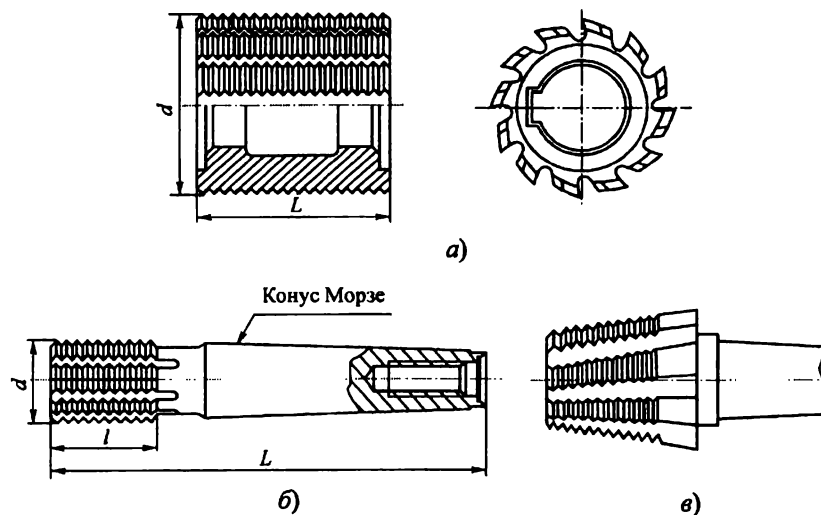


Рисунок 12.5 – Гребенчатые резьбонарезные фрезы: *а* – цилиндрическая насадная; *б* – цилиндрическая концевая; *в* – для нарезания конических резьб

Ось фрезы устанавливается параллельно оси заготовки, фреза вращается вокруг собственной оси со скоростью  $v_f$ , которая определяется стойкостью инструмента и в начальный момент врезается с радиальной подачей

$$S_p = S_z z n_f,$$

после чего смещается на один шаг резьбы  $P$  вдоль оси заготовки с подачей

$$S_{np} = P,$$

при этом заготовка медленно поворачивается на  $1 \dots 1,25$  оборота. Переход в  $0,25$  оборота осуществляется для компенсации пути врезки инструмента на заданную глубину профиля резьбы.

Соотношение между числом оборотов детали  $n_d$  и фрезы  $n_f$  определяют по следующим формулам

$$n_{\partial} = \frac{S_z z n_{\phi}}{\pi d_2}, \quad n_{\phi} = \frac{100 v_{\phi}}{\pi d_{\phi}},$$

где  $S_z$  – подача на один зуб фрезы;  $z$  – число зубьев на торце фрезы;  $d_2$  – средний диаметр резьбы, мм;  $d_{\phi}$  – диаметр фрезы, мм.

Для фрез из быстрорежущей стали  $v_{\phi} = 25 \dots 30$  м/мин, для твердосплавных фрез  $v_{\phi} = 60 \dots 120$  м/мин. Подачу на зуб  $S_z$  выбирают в зависимости от твердости обрабатываемого материала в пределах от 0,03 до 0,15 мм/зуб.

Недостатком гребенчатых фрез является искажение угла профиля нарезаемой резьбы из-за несовпадения траектории точек режущих кромок фрезы с кривой резьбы в сечении, перпендикулярном оси заготовки: у фрезы этот круг, а в нарезаемой резьбе – архимедова спираль. Однако величина искажения небольшая и достигает 3...4' для внешней и 7...9' – для внутренней. Обычно она укладывается в рамки допуска на угол профиля крепежной резьбы с мелким шагом.

Дисковые фрезы используются при нарезании резьб больших глубин, диаметров и длин (рис. 12.6, а). Их часто используют во время нарезания резьб червяков, ходовых винтов и т.д. Благодаря тому, что фрезы являются многозубным инструментом, который работает с большими подачами и нарезает резьбу за один проход, их производительность значительно выше, чем у резцов.

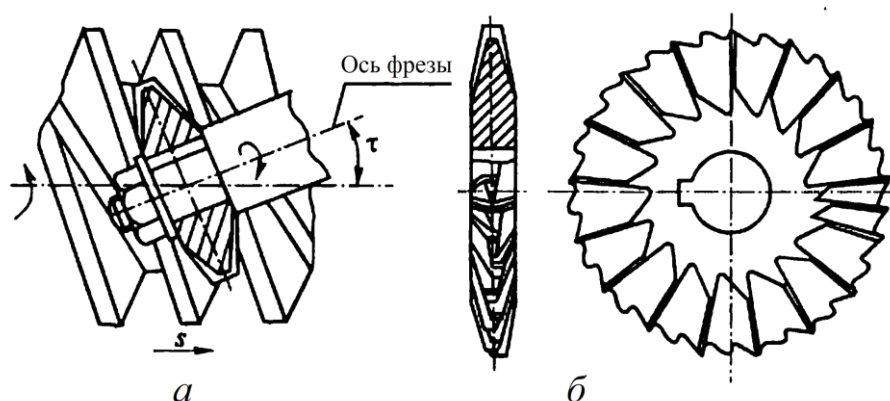


Рисунок 12.6 – Дисковые фрезы: а – схема установки фрезы относительно заготовки; б – фреза для нарезания трапецеидальной резьбы

Дисковые фрезы изготавливают диаметром 60...180 мм, они имеют большое количество ( $z = 34 \dots 40$ ) остrokонечных зубьев. Благодаря этому обеспечивается высокая производительность и качество обработанной поверхности. При нарезании трапецеидальных резьб с целью снижения сил резания и повышения стойкости фрез широкое распространение получили фрезы, у которых на каждой боковой стороне в шахматном порядке через один зуб удалены режущие кромки (рис. 12.6, б). Таким образом, каждый зуб работает только одной боковой режущей кромкой, но с увеличенной в два раза толщиной среза. При этом кромки при вершине остаются неизменными, поскольку на них приходится толщина среза в два раза большая, чем на

боковые кромки. Для контроля профиля зубьев у таких фрез после перетачивания один зуб оставляют с полным профилем.

С учетом наклона оси фрезы к оси заготовки и прямолинейности режущих кромок при фрезеровании трапецеидальной резьбы на червяках угол профиля резьбы  $\varepsilon_n$  и толщину зуба  $b_n$  на круге среднего диаметра инструмента определяют по формулам:

$$\operatorname{tg} \frac{\varepsilon_n}{2} = \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} \cdot \cos \tau; \quad b = b_n \cos \tau.$$

### 12.3 Метчики и плашки

Метчики широко используют для нарезания резьбы в отверстиях заготовок. *Метчик* – это винт, преобразованный в инструмент путем прорезания стружечных канавок и создания на режущих зубьях передних, задних и других углов. Для крепления на станке или вороте он имеет хвостовик, его режущая часть чаще всего изготавливается из быстрорежущей стали, реже – из твердого сплава.

Условия резания при снятии стружки метчиком очень тяжелые вследствие значительных сил резания и трения, а также усложненных условий удаления стружки. Кроме того, метчики имеют пониженную прочность благодаря ослабленному поперечному сечению. Наиболее негативно это проявляется при нарезании резьб в вязких материалах метчиками малых диаметров, которые часто выходят из строя из-за пакетирования стружки.

Преимуществами метчиков является простота и технологичность конструкции, возможность нарезания резьбы за счет самоподачи, высокая точность резьбы, которая определяется точностью изготовления метчиков. По конструкции и сферам применения метчики делятся на следующие типы:

– *ручные* – с ручным приводом, изготавливаются комплектами из двух или трех номеров;

– *машинно-ручные* одинарные или в комплекте из двух номеров с ручным или станочным приводом;

– *машинные одинарные* – со станочным приводом;

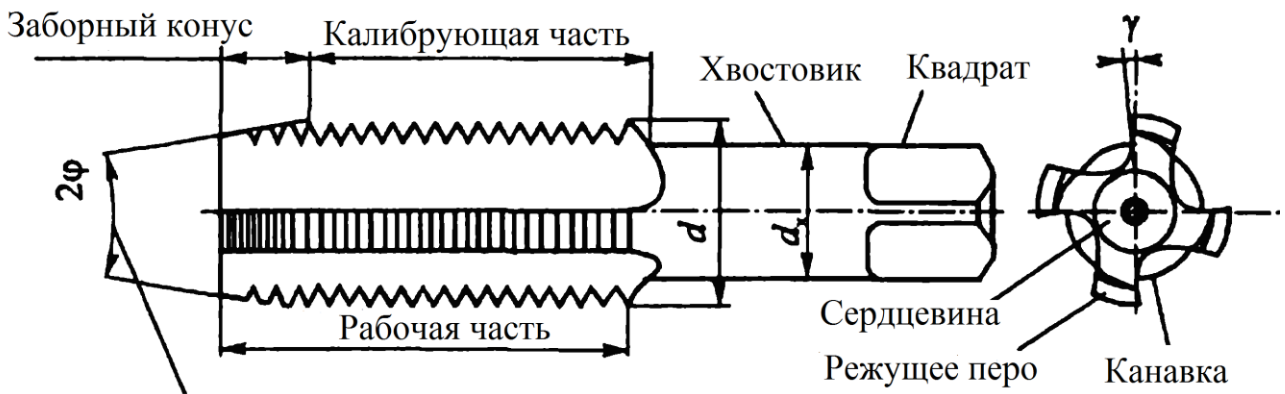
– *гаечные* – для нарезания резьбы в гайках на специальных станках;

– *плашковые и маточные* – для нарезания и калибровки резьбы в резьбонарезных плашках;

– *специальные* – для нарезания резьбы различных профилей.

Несмотря на значительное многообразие типов метчиков, они имеют общие основные части, конструктивные элементы и геометрию режущей части. Основными частями метчика (рис. 12.7) являются: режущая (заборная) и калибрующая части, зубцы и хвостовик с элементами креплений.

К геометрическим параметрам относятся:  $\varphi$  – угол заборного конуса, который играет роль угла в плане;  $\gamma$  и  $\alpha$  – передний и задний углы на режущих кромках;  $\omega$  – угол наклона винтовых стружечных канавок;  $\lambda$  – осевой угол подточки передней поверхности.



Угол конуса заборной части

Рисунок 12.7 – Основные элементы метчика

Машинные и машинно-ручные метчики используют на сверлильных и токарных станках для нарезания метрической резьбы от М2 до М24 в заготовках из стали с прочностью  $\sigma_s < 800$  МПа, из латуни, чугуна, в сквозных и глухих отверстиях. Материал режущей части – сталь Р6М5.

Метчики с шахматным расположением зубцов (рис. 12.8, б) используются для нарезания резьбы в вязких материалах, поскольку они исключают заклинивание витков инструмента.

Метчики с укороченной стружечной канавкой (рис. 12.8, в) имеют короткие канавки переменной глубины с углом наклона дна канавки оси  $\psi = 5...10^\circ$  и осевым углом  $\lambda = 9...12^\circ$ , они более прочные, чем обычные метчики.

Метчики с винтовыми канавками (рис. 12.8, г) рекомендованы для надежного удаления стружки из глухих отверстий. Ступенчатые метчики (рис. 12.8, д) имеют двойную режущую часть и позволяют реализовать в одном метчике любую комбинацию схем нарезания.

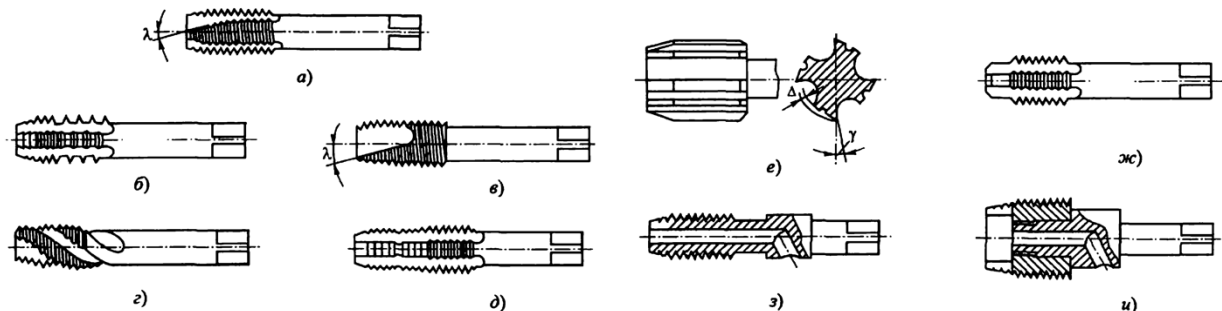


Рисунок 12.8 – Конструкции отдельных типов метчиков: а – ручной; б – с шахматным расположением зубьев; в – безканавочный; г – с винтовыми канавками; д – ступенчатый; е – с режуще-выглаживающими зубцами, ж – с направляющей частью; з – с внутренним подводом охлаждающей жидкости; и – колокольного типа

**Резьбонарезная плашка** – гайка, которая превращена в режущий инструмент путем сверления стружечных отверстий и формирования на зубьях режущих перьев передних и задних углов. Плашки используют для нарезания наружной резьбы на болтах, винтах, шпильках и других крепежных деталях. По

форме наружной поверхности плашки бывают круглые, квадратные, шестигранные, трубные.

Конструктивными параметрами плашек (рис. 12.9) являются внешний диаметр  $D$ , толщина  $B$ , диаметры стружечных отверстий  $d_c$ , ширина просвета  $c$ , ширина пера  $b$ , минимальная толщина  $e$ . Геометрические параметры – передний угол  $\gamma$ , задний угол  $\alpha$  и угол заборного конуса  $\varphi$ . На наружной поверхности плашки есть 3 или 4 конических углубления с углом при вершине  $90^\circ$  для крепления. На этой же поверхности выполняется трапецевидный паз с углом  $60^\circ$ , который образует перемычку толщиной  $m = 0,4 \dots 1,5$  мм, срезаемую после двух-трех перетачиваний.

Плашки устанавливают в воротке (при работе вручную) или в кольце (при работе на станке) с подвижной посадкой по наружному диаметру. Во избежание перекоса плашки оси крепежных винтов смещены относительно осей конических углублений так, чтобы надежно прижимать торец плашки к торцу посадочного гнезда

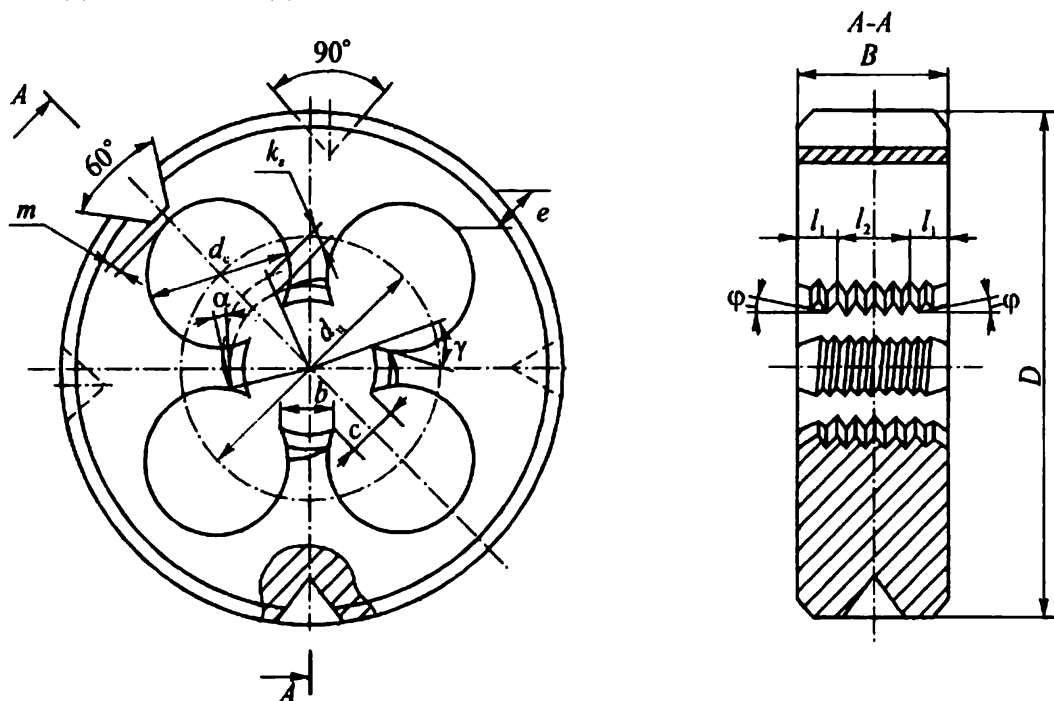


Рисунок 12.9 – Конструктивные элементы круглой плашки

#### 12.4 Резьбонарезные головки

*Резьбонарезные головки* достаточно широко используются при нарезании внешних (реже внутренних) резьб на винтах, болтах, трубах и других деталях. Такие головки являются достаточно сложными сборными конструкциями с режущими элементами в виде круглых гребенок или плоских плашек, установленных в корпусе головки (рис. 12.10).

Резьбонарезные головки делятся на две основные группы: самооткрывающиеся и регулируемые. В первых выполняется отвод гребенок от заготовки в конце операции нарезания резьбы, из-за чего отпадает необходимость в обратном скручивании, как следствие – сокращается вспомогательное время и повышается производительность. Поэтому такие

головки получили большее распространение, чем регулируемые, хотя последние более простые по конструкции.

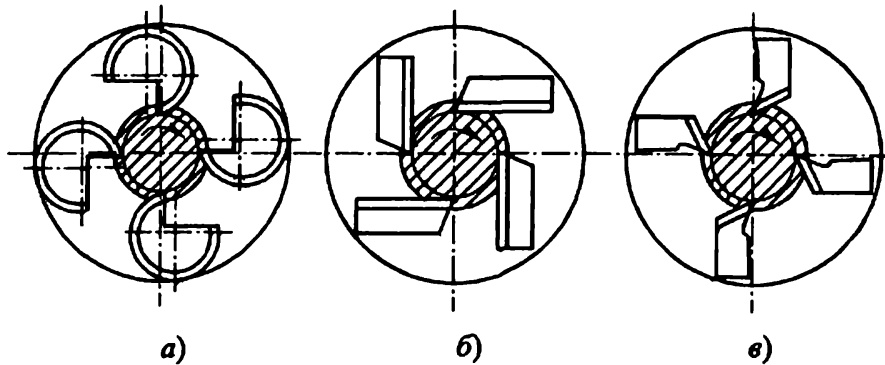


Рисунок 12.10 – Типы резбонарезных головок: *а* – с круглыми гребенками; *б* – с тангенциальными плашками; *в* – с радиальными плашками

Резбонарезные головки бывают вращающимися (модели 1КА...5КА), применяемых на токарных автоматических и полуавтоматических станках, а также невращающимися, которые используются на токарных и револьверных станках.

#### Вопросы для самоконтроля:

1. Назовите основные технологии формирования резьбы. На каких поверхностях нарезается резьба?
2. Выполните сравнение преимуществ и недостатков призматических и круглых резцов для нарезания резьб.
3. Какие типы фрез используются для нарезания резьб? Какими преимуществами они обладают?
4. Приведите классификацию метчиков, опишите условия их работы. Какую резьбу невозможно нарезать метчиками?
5. Назовите области применения резбонарезных плашек и головок. Для нарезания каких резьб они используются?

## ТЕМА 13. РЕЗАНИЕ ДРЕВЕСИНЫ

### 13.1 Общие сведения о резании древесины

*Резанием* называется процесс обработки древесины с нарушением связи между частицами по заданной траектории резца. Относительное движение резца в обрабатываемом материале называется *движением резания*, а его скорость – *скоростью резания*. При резании используется либо механическая энергия твердого резца, либо кинетическая энергия струи воды, либо лучевая энергия лазера.

Физически *резание* – процесс превращения носителя энергии в другие ее виды: тепловую, химическую, электрическую, механическую в связи с образованием новой поверхности.

При внедрении твердого резца по стрелке  $v$  нормальное давление  $N$  на поверхности резца постепенно растет (рис. 13.1, а). При этом горизонтальная составляющая  $P_2$  отделяет древесину, а вертикальная составляющая  $P_0$  стремится оторвать отделяемый объем от остальной массы древесины. Под влиянием нарастающего момента происходит надлом элемента стружки длиной, которая затем отгибается. При этом давление падает до нуля и резец проходит некоторый путь, не производя почти никакой работы (рис. 13.1, б). Затем процесс периодически повторяется; это значит, что процесс образования стружки – периодический. При срезании тонкой стружки элементы ее не наблюдаются, она сливная (рис. 13.1, в).

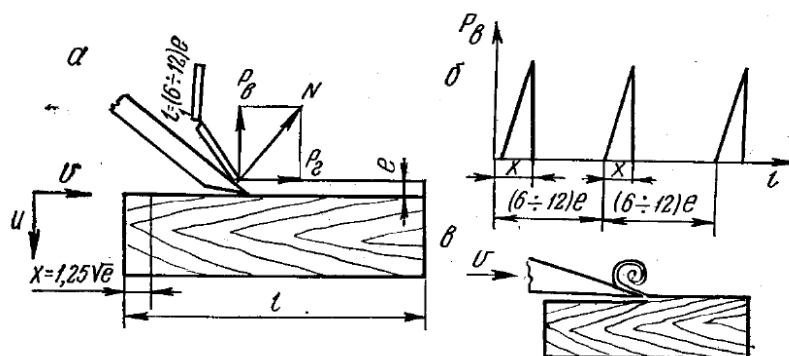


Рисунок 13.1 – Схема резания вдоль волокон: а – образование элементной стружки; б – график изменения сил резания; в – образование сливной стружки

Различают две разновидности резания:

– резание без стружкообразования характеризуется тем, что длина резания (хода резца) очень мала по сравнению с толщиной. Сюда относятся такие виды обработки, как разрезание тонкого листа шпона на ножницах и штамповка-высечка листового материала пуансоном и матрицей. Полученные таким способом заготовки почти не деформированы. Резание без стружкообразования происходит без деформации объема отделяемой древесины;

– резание со стружкообразованием характерно тем, что резец при проходе объемно деформирует отделяемый объем древесины в различных

направлениях. Эти деформации вызывают значительные изменения объема стружки и почти всегда приводят к ее разрушению.

Всякий процесс обработки резанием в основном определяет три составляющие:

- материал – то, что обрабатывается;
- резец – то, чем обрабатывают;
- рабочие движения, которые создают необходимые относительные перемещения режущего инструмента в древесине, обеспечивая процесс обработки, т. е. изменение формы и объема заготовки.

Каждая из трех составляющих процессов резания включает значительное количество переменных факторов, влияющих на результаты обработки.

### 13.2 Элементы и геометрия резца по дереву

При обработке материалов твердым инструментом резание выполняется резцом – клиновидным телом на инструменте, предназначенным для обработки древесины резанием (рис. 13.2).

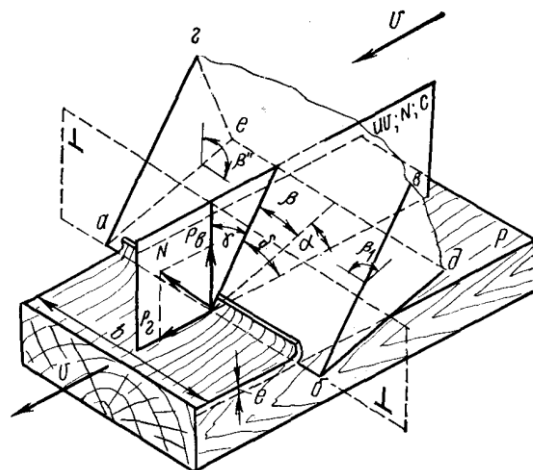


Рисунок 13.2 – Элементарный резец

Тело резца в зависимости от его формы может быть ограничено несколькими (тремя-четырьмя и более) плоскими или криволинейными поверхностями (гранями). На рис. 13.2 резец ограничен четырьмя поверхностями (гранями): передней (*abvg*), задней (*abde*) и двумя боковыми (*aeg* и *bdv*).

*Передней* называется поверхность резца, активно воздействующая на стружку, по передней поверхности сходит стружка. Противоположная передней поверхности резца, обращенная к плоскости резания, называется *задней*. Поверхности, примыкающие к передней и задней, называются *боковыми*. Эти поверхности при взаимном пересечении образуют пять кромок: *ag*, *bv* – передние боковые; *ae*, *bd* – задние боковые. Кромка *ab*, расположенная в плоскости резания и имеющая сопряжение (в точках *a* и *b* попарно) с боковыми кромками, называется *главной режущей кромкой* или *лезвием*.

*Лезвие реального резца* – переходная кривая поверхность между передней и задней поверхностями резца. Только у идеального резца лезвие – прямая

линия. При расчетах истинную кривую контура лезвия принимают за дугу окружности радиусом  $\rho$ , вписанную в эту кривую. Этот радиус называется *радиусом кривизны лезвия*. По длине лезвие может быть прямолинейным или криволинейным в зависимости от расположения и формы пересекающихся поверхностей резца.

**Лезвие** – наиболее активная часть резца и выполняет главную работу при образовании стружки. Кромки резца подразделяются на стружкообразующие и подрезающие. *Стружкообразующей* называется кромка, прилегающая к передней поверхности резца и отделяющая стружку по всей ширине. При открытом резании образуется одна поверхность и имеет место свободное стружкообразование. При полузакрытом резании образуются две поверхности, причем главная кромка – стружкообразующая, а боковая – подрезающая, подчищающая. При закрытом резании образуются три поверхности, причем главная кромка – стружкообразующая, а боковые подрезающие – подчищающие. Боковые кромки у передней поверхности (передние) – подрезающие, а у задней поверхности (задние) в процессе отделения стружки не участвуют.

**Углы резания** существенно влияют на процесс стружкообразования и выбираются в зависимости от условий резания. Контур режущих элементов резца в поперечном сечении определяется в основной секущей плоскости движения  $uv$  (рис. 13.3). Плоскость движения  $uv$  параллельна скорости резания  $v$  и скорости подачи  $u$ . Для резцов с вращательным движением инструмента она перпендикулярна к оси вращения инструмента. Углы, замеренные в плоскости движения, называются *контурными* и указываются на рабочих чертежах.

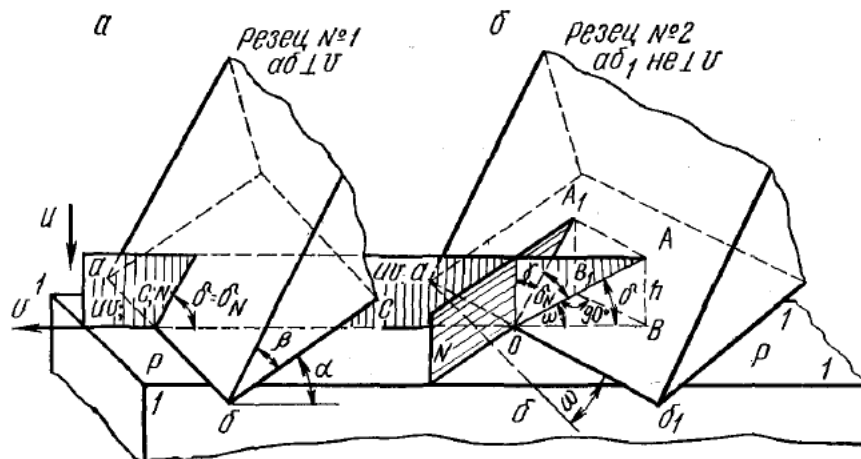


Рисунок 13.3 – Углы резания:  $a$  – режущая кромка  $ab$ , перпендикулярная к скорости резания;  $b$  – режущая кромка  $ab$  повернута под углом  $\psi$  в плане;  $uv$  – плоскость движения;  $N$  – нормальная плоскость;  $C$  – плоскость схода стружки;  $P$  – плоскость резания

В процессе резания давление стружки на переднюю поверхность резца и обработанной поверхности древесины на заднюю поверхность резца направлено нормально к контактным площадкам резца и лежит в плоскости  $N$ , нормальной к лезвию. Нормальная плоскость  $N$  перпендикулярна к плоскости

резания  $P$  и к главной режущей кромке. В ней измеряются линейные углы соответствующих двугранных углов.

Угол заострения (угол заточки)  $\beta$  – угол между передней и задней поверхностями резца у главной кромки  $ab$ . При пересечении боковых поверхностей резца с его передней и задней поверхностями образуются углы боковой заточки  $\beta'$  и  $\beta''$ .

Угол заточки  $\beta$  предопределяет режущие свойства резца и является его паспортной характеристикой. Угол заострения резцов, применяемых при резании древесины, колеблется от 12 до 85°.

Угол между задней поверхностью резца и плоскостью резания называется *задним углом*  $\alpha$ .

Угол резания – угол между передней поверхностью резца и плоскостью резания  $\delta$ :

$$\delta = \beta + \alpha. \quad (13.1)$$

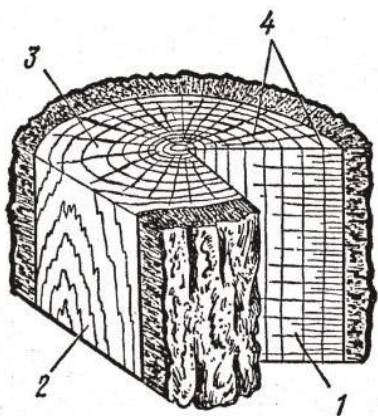
Угол между передней поверхностью резца и плоскостью, нормальной к плоскости резания у лезвия, называется *передним*  $\gamma$ :

$$\gamma = 90^\circ - \delta = 90^\circ - (\beta + \alpha). \quad (13.2)$$

Сумма углов  $\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$ .

### 13.3 Свойства древесины, учитываемые при резании

*Древесина* – материал неоднородного строения в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 13.4): торцевой  $TT$ , перпендикулярной к оси ствола; радиальной  $RR$ , проходящей через ось и радиус ствола; тангенциальной  $ТТ$ , перпендикулярной к первым двум плоскостям. Эта неоднородность строения является результатом роста дерева как сложного органического вещества клеточного строения с ежегодным нарастанием нового кольца клеток в виде годичных слоев поздней и ранней древесины, сердцевинных лучей  $a-a$ , отражающих влияние бесконечно большого разнообразия факторов.



Трем взаимно перпендикулярным плоскостям соответствуют три главных направления: осевое  $I$ , нормальное к торцевой плоскости; радиальное  $II$ , нормальное к тангенциальной плоскости и тангенциальное  $III$ , нормальное к радиальной плоскости.

Рисунок 13.4 – Разрезы ствола дерева: 1 – радиальный; 2 – тангенциальный; 3 – торцовый; 4 – сердцевинные лучи

Древесина – материал ортотропный, то есть имеющий три главных взаимно перпендикулярных направления ( $I$ ,  $II$ ,  $III$ ), в которых физико-механические свойства резко различны (рис. 3.1, в).

*Древесина* – анизотропный материал, то есть обладающий различными свойствами и разной сопротивляемостью в разных направлениях. Например, модуль упругости  $E$  при растяжении воздушносухой сосны составит: вдоль волокон 11 000 МПа, в тангенциальном направлении – 1 320 МПа; в радиальном направлении 360 МПа.

Таким образом, древесина – анизотропно-ортотропный материал волокнисто-слоистого разноклеточного строения. Эти свойства вносят значительные затруднения при решении вопросов, связанных с резанием древесины. Положение еще более усложняется большим разнообразием свойств древесины разных пород, изменением механических свойств породы в зависимости от условий произрастания, структурных особенностей ее (крупнослойная, мелкослойная, сучковатая, свилеватая и т. п.), положением в стволе (комель или вершина, заболонь или ядро), влажности, температурных условий (мерзлая, пропаренная, сухая, влажная). Значительная изменчивость физико-механических свойств древесины приводит к колебаниям в затрате работы резания на 25–30% для одних и тех же режимов обработки.

Прочность древесины уменьшается с увеличением влажности от абсолютно сухого состояния до точки насыщения волокон, тогда как прочность более влажной древесины изменяется незначительно (рис. 13.5). Уменьшение временного сопротивления  $\sigma$  еще не означает соответствующего снижения работы, затрачиваемой на обработку, так как помимо изменения напряжения деформации, надо учитывать еще и изменение деформации.

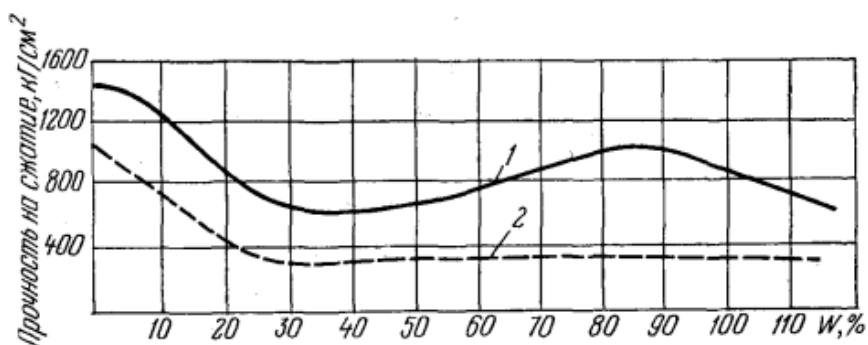


Рисунок 13.5 – Предел прочности древесины вдоль волокон: 1 – мерзлой; 2 – влажной

Древесина обрабатывается резанием при скоростях до 100 м/с, что еще более усложняет определение соотношения между напряжением и деформацией, а эти зависимости крайне необходимы для оценки затраченной работы при обработке. С увеличением скорости нагружения образцов их временное сопротивление деформации растет.

Влияние волокнисто-слоистого строения древесины сказывается на разрушающих нагрузках в зависимости от направления действующей силы к направлению ее волокон (рис. 13.6, а–б). Испытания на сжатие образцов под разными углами к направлению волокон показывают значительное снижение временного сопротивления сжатию с увеличением угла  $\psi$ .

При резании древесины необходимо учитывать один из самых значительных факторов процесса – угол перерезания волокон  $\psi$ , образуемый направлением вектора действующей силы и направлением волокон древесины.

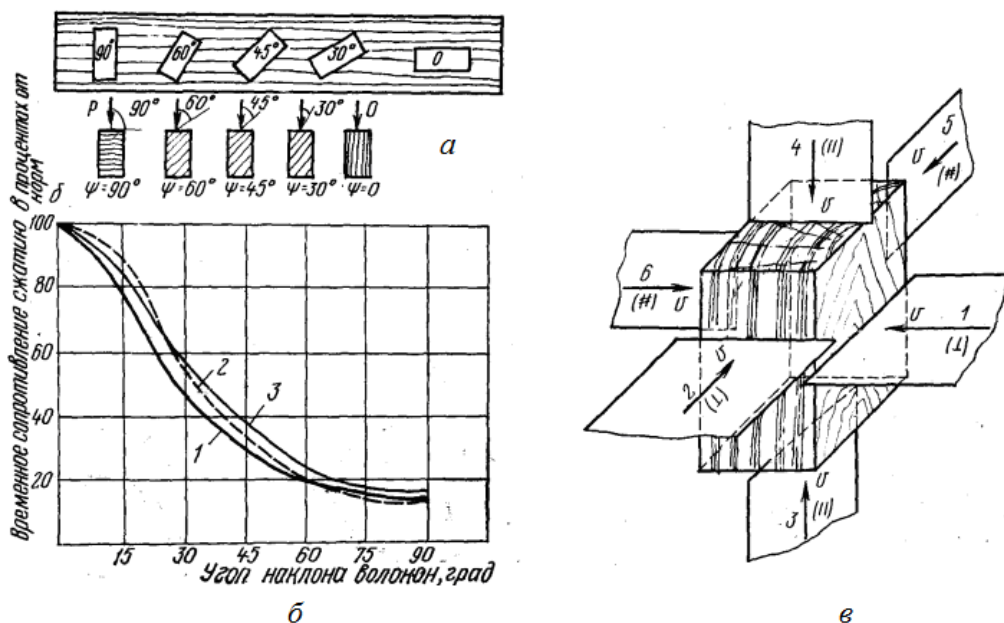


Рисунок 13.6 – Угол перерезания волокон  $\psi$ : а – схема вырезания образцов для испытания на сжатие под разными углами  $\psi$ ; б – график изменения временного сопротивления сжатию в зависимости от угла  $\psi$ ; в – неоднородность строения древесины в трех взаимно перпендикулярных плоскостях

При резании следует, учитывать еще один важнейший фактор – слоистость. С учетом слоистости (рис. 13.6, в) надо различать по два случая торцевого (1 и 2), продольного (3 и 4) и поперечного резания (5 и 6) в радиальной и тангенциальной плоскостях. На производстве слоистость практически учесть нельзя, поэтому в расчетах принимают среднее значение между этими направлениями. Резание древесины редко происходит по основным направлениям, чаще всего имеют место переходные случаи, наиболее общим из которых является продольно-торцово-поперечное резание.

### 13.4 Рабочие движения и геометрия стружки

Для осуществления процесса резания необходимо создать контакт между резцом и древесиной и поддерживать его при отделении стружки. Соответствующие перемещения резца и материала относительно неподвижных осей координат называются *рабочими движениями*.

Для отделения ряда стружек за несколько проходов необходимо не менее двух рабочих движений (рис. 13.7), которые выполняются с разной скоростью одновременно или разновременно. Рабочее движение, обладающее большей средней скоростью  $v$ , называется *главным*, а обладающее меньшей средней скоростью  $u$  – *движением подачи*.

Главное движение обеспечивает каждому резцу отделение номинальной стружки с древесины, подаваемой за оборот, на длине контакта  $L$ . Движение подачи со скоростью  $u$  – подведение к резцам новых номинальных объемов.

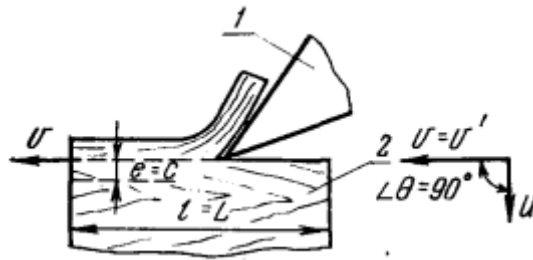


Рисунок 13.7 – Схема строгания: 1 – резец; 2 – заготовка

Главное движение и движение подачи, происходящие одновременно, геометрически суммируются в движение резания по траектории относительно перемещения лезвия резца в древесине. Скорость этого движения называется *скоростью резания*.

Скорость резания  $v'$  в каждый рассматриваемый момент по величине и направлению равна геометрической сумме скорости главного движения  $v$  и движения подачи  $u$ :

$$v' = v + \dot{e}. \quad (13.3)$$

Главное движение может принадлежать инструменту или заготовке. Есть случаи, когда оба рабочих движения осуществляются инструментом. Острый угол (или  $90^\circ$ ) между векторами  $v'$  и  $u$  называется кинематическим углом встречи  $\theta$ .

*Подачей на резец  $s$*  называется отрезок между смежными траекториями резца в древесине по направлению вектора скорости подачи  $u$ . Подача на один оборот или ход (посылка)

$$\Delta = \dot{\eta}z. \quad (13.4)$$

При равномерном вращательном движении в процессах фрезерования, пиления дисковыми и ленточными пилами скорость главного движения  $v$  примерно равна скорости резания  $v'$ , м/с

$$v = \frac{\pi D n}{60\,000} = \frac{z t n}{60\,000}. \quad (13.5)$$

где  $D$  – диаметр окружности резания пилы, фрезы или шкива ленточнопильного станка, мм;  $n$  – частота вращения вала, об/мин.

Шаг  $t$  (в мм) может быть найден по формуле

$$t = \frac{\pi D}{z}. \quad (13.6)$$

При сверлении надо отличать максимальную скорость, определяемую по (13.5), от ее среднего значения

$$v_{cp} = \frac{v_{max}}{2},$$

так как при разных радиусах вращения точек лезвия скорость резания меняется от 0 до  $v_{max}$ .

При возвратно-поступательном движении пил в лесопильных рамах различают фактическую и среднюю скорость резания. Фактическая скорость резания зависит от угла поворота кривошипа:

$$v_{\delta} = v_0 \cdot \sin \alpha. \quad (13.7)$$

где  $v_0$  – постоянная окружная скорость пальца кривошипа, м/с

$$v_0 = \frac{\pi \dot{H}}{60 \cdot 000},$$

где  $H$  – ход пильной рамки:  $H = 2R$ , мм;  $R$  – радиус кривошипа, мм.

Средняя скорость резания главного движения за двойной ход лесопильной рамы, соответствующая одному обороту кривошипа,

$$v = \frac{2\dot{H}}{60 \cdot 000}. \quad (13.8)$$

Скорость подачи при равномерном поступательном движении материала зависит от подачи на резец  $s$  или на один оборот  $\Delta$ , от числа зубьев  $z$ , срезающих древесину за рабочий ход, то есть за ту часть цикла, на протяжении которой совершается резание, и числа оборотов вала в минуту

$$\dot{e} = \frac{\dot{n}zn}{1 \cdot 000} = \frac{\Delta n}{1 \cdot 000}. \quad (13.9)$$

Скорости рабочих движений и их направление характеризуют разновидности процесса резания, их кинематику и динамику.

Разновидности главного движения и подачи и их взаимные сочетания чрезвычайно многообразны. В зависимости от сочетания скоростей главного движения и подачи по величине и направлению получаются разные траектории резания, определяющие форму и размеры – геометрию стружки. При прямолинейном движении резания (строгании) срезается плоская равномерной толщины стружка.

Ряд параллельных стружек 1, 2, 3, ... срезается за рабочий ход при подаче заготовки  $u_z$  за период холостого хода инструмента. При круговом резании (продольном пилении дисковыми пилами) срезается циклоидальная стружка, ограниченная отрезками циклоидальной траектории резания.

При сверлении, если режущие кромки сверла расположены нормально к оси вращения, толщина стружки равна подаче на резец

$$\dot{a} = \dot{n} = \frac{60\dot{e}}{zn}. \quad (13.9)$$

Чтобы рассчитать режимы, силу и мощность резания, надо знать среднюю номинальную стружку в поперечном сечении (ее толщину  $e$ , ширину  $b$  и площадь поперечного сечения).

### 13.5 Шероховатость поверхности древесины

Качество деталей из древесины определяется точностью механической обработки, а также шероховатостью поверхности. На обработанной поверхности различают погрешности обработки и структурные неровности. Структурные неровности (пористость древесины, вскрытые полости клеток, сердцевинных лучей), не зависящие от обработки, при оценке шероховатости поверхности не учитываются. Погрешности обработки бывают трех видов:

макронеровности, неровности с нерегулярным шагом, неровности с регулярным шагом.

*Макронеровность* – отклонение поверхности от заданной правильной геометрической формы на относительно больших участках (выпуклость, вогнутость плоскостей, эллипсность, отклонение от формы для цилиндров и т.д.). Появление макронеровностей связано с проявлением внутренних напряжений древесины, которые создают коробление материала, и с неточностью базирования заготовки, нарушения геометрической точности станка и инструмента, неточности установки и наладки станка. Поэтому макронеровности относятся не к шероховатости обработки, а к погрешности формы детали.

*Неровности с нерегулярным и регулярным шагом* – погрешности обработки древесины, характеризующие обработанную поверхность. Неровности с нерегулярным шагом характеризуются размерными показателями в виде неровностей разрушения, наличием или отсутствием ворсистости и мшистости на обработанной поверхности. Неровности разрушения в виде вырывов пучков древесины и заколов образуются при неправильно выбранном режиме резания или нарушении технологии.

*Вырыв* – неровность, образующаяся в результате отрыва от поверхности изделия частиц древесины. *Закол* – углубление на обработанной поверхности по границам годичного слоя в местах его выхода на обработанную поверхность. Неровности разрушения по величине иногда превышают размеры других неровностей, их главные разновидности – ворсистость и мшистость.

*Ворсистость* – частично отделенные единичные волокна древесины на поверхности деталей. При мшистости от поверхности детали неполностью отделены пучки волокон и частицы древесины.

Неровности с регулярным шагом часто встречаются в виде волнистости или риски, равномерно чередующиеся, близкие по размерам возвышения и впадины кинематического и вибрационного происхождения или в виде неровностей упругого восстановления. Обработочные риски – глубокие следы режущего инструмента, направление, форма и размеры которых определяются кинематикой процесса и геометрической формой режущей кромки резца.

Волнистость кинематическая – неровности на поверхности изделия в виде закономерно чередующихся волн, шаг и высота которых обусловлены кинематикой резания (волнистость фрезерованной поверхности и др.). Неровности упругого восстановления образуются на участках разной плотности и твердости древесины вследствие неодинаковой величины упругой и вязкой деформации.

Шероховатость поверхности зависит от вида обработки и режимов резания. При одном и том же виде обработки в зависимости от режима резания можно получить разные классы шероховатости. Шероховатость пиломатериалов рамного распила с поперечными рисками ступенчатого профиля с шагом, равным посылке, – результат дефектов подготовки рамных пил и настройки лесопильных рам. При нормальных условиях распиловки глубина рисок на поверхности сосновых и еловых досок 400–600 мкм.

Доминирующими неровностями при рамной распиловке с большой подачей на резец являются вырывы глубиной до 2 500 мкм. Неровности разрушения образуются за счет отрыва от поверхности целых пучков волокон по годичным слоям; при этом зубьями пилы вырывается древесина ранней, менее прочной зоны годичного слоя и обнажается поверхность более плотной поздней древесины.

Ворсистость и мшистость на поверхности пиломатериалов возникают при распиловке с большей подачей на резец или при недостаточном уклоне пил. Шероховатость поверхности древесины, обработанной строгальными пилами, характеризуется высотой микронеровностей 40–60 мкм, главным образом в виде рисок. Высокий класс шероховатости обеспечивают дисковые пилы без развода и плющения с ориентированным осевым биением не более 0,6 мм. Такое биение достигается установкой диска перпендикулярно к оси вала.

При поперечном пилении на шероховатость поверхности влияют подача на резец, объемный вес древесины, радиус кривизны лезвия и высота пропила. Влияние подачи на резец самое значительное, оно почти в три раза больше, чем другие факторы.

На поверхности фрезерования в зависимости от состояния системы станок-инструмент-деталь, а также режимов резания могут иметь место неровности разрушения и упругого восстановления, ворс и мшистость, кинематические и вибрационные неровности и даже макронеровности в виде заколов и вырывов.

Особо важное значение имеет подача на резец, она влияет не только на волнообразование, но и на высоту неровностей разрушения. От подачи на резец зависит производительность станка. При подаче на резец до 0,08–0,15 мм при фрезеровании образуется сливная стружка, при которой неровностей разрушения на фрезерованной поверхности не наблюдается даже при затупленном резце.

При *шлифовании* абразивные зерна царапают, разрушают клетки древесины и отделяют ее частицы. Шероховатость поверхности древесины зависит от номера зернистости абразивного материала, объемного веса древесины (породы), степени затупления шлифовальной шкурки. Глубина неровностей увеличивается пропорционально повышению номера зернистости шлифовальной шкурки и несколько уменьшается при затуплении ее. С увеличением объемного веса и скорости шлифования также улучшается обработанная поверхность древесины. Удельное давление не оказывает существенного влияния на шероховатость поверхности.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Назовите основные особенности строения древесины.
2. Какие виды резания используются при обработке древесины? С какими специфическими сложностями сопряжена данная обработка?
3. Какие типы стружки образуются при лезвийной обработке древесины?
4. Какие погрешности обработки рассматриваются на поверхности древесного материала?

## РАЗДЕЛ 14. ОСОБЕННОСТИ РЕЗАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### 14.1 Резание полимерных материалов

Изготавливаемые из полимерных материалов изделия чаще всего имеют сложную геометрическую форму, которая задается на стадии формования и, как правило, не требует механической доработки. Механическая обработка пластмасс часто приводит к трещинообразованию в поверхностном слое материала и появлению в нем остаточных напряжений. Поэтому ее принято рассматривать как возможный, но нежелательный способ изготовления изделий из полимеров.

Тем не менее, можно не только обрабатывать детали из полимеров, но и изготавливать их из заготовок различной формы механическими способами, поскольку почти все полимерные материалы легко поддаются резанию на обычном металлорежущем оборудовании. Особенно часто такие способы используют при отработке новой конструкции и при изготовлении опытной партии изделий. В этих случаях изготовление сложной и дорогой технологической оснастки для формования изделий из полимеров описанными выше способами нецелесообразно, так как она окупается только при производстве большой партии однотипных изделий.

При изготовлении изделий из полимеров способом механической обработки используют заготовки в виде прутков, листов, труб и специальных профилей. К основным операциям, используемым при механической обработке полимеров, относятся: снятие облоя, резка, точение, фрезерование, сверление, нарезание резьбы, шлифование и полирование.

Полимеры имеют ряд свойств, отличающих их от других материалов, которые необходимо учитывать при выборе режимов механической обработки. Они обладают пластичностью, способностью к упругому восстановлению формы; их механические свойства зависят от температуры и скорости приложения нагрузки. Кроме того, у них низкие удельная теплоемкость и теплопроводность и большой температурный коэффициент линейного расширения.

При изготовлении изделий из полимеров в разъемной форме способом прессования или литья под давлением на них образуется *облой* в месте стыка деталей формы. Удаление облоя на деталях из пластмасс производят остро заточенным режущим инструментом, а снятие облоя с изделий из резины осуществляют с помощью высокоскоростного абразивного инструмента.

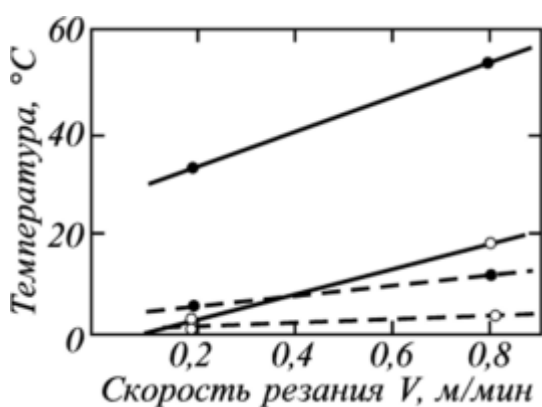
*Резание* полимерных материалов при раскраивании листа или при изготовлении заготовок необходимой длины из прутка, трубы, профиля можно производить любым доступным способом с использованием ленточных и дисковых пил, абразивных кругов, закрепленных в ручном инструменте, отрезных фрез, гильотинных ножниц и даже слесарной ножовки. Пенопласты на основе полистирола можно разрезать раскаленной проволокой из нихрома, натянутой в специальных захватах.

Скорость резания листов термопластов большой толщины на станках с механической подачей составляет 600–750 м/мин. При использовании дисковых пил скорость резания термопластов достигает 2 500 м/мин. При использовании гильотинных ножниц зазор между лезвиями не должен превышать 0,1–0,2 мм, а заданный угол режущей кромки лезвия должен составлять 30°.

*Точением* на токарном станке из полимерных материалов изготавливают изделия высокой точности для ремонта оборудования и в других случаях, когда потребность в таких изделиях незначительна. Для механической обработки полимеров используют стандартное оборудование и инструмент, которые применяют для обработки металлов. Режущий инструмент изготавливают из быстрорежущей стали, твердых сплавов, а в некоторых случаях (для обработки ненаполненных термопластов) – из углеродистой стали.

Механическую обработку изделий из полимеров необходимо проводить, учитывая специфические условия разрушения этих материалов и регулируя глубину и скорость резания, изменяя форму резца и скорость подачи инструмента. Поскольку температурный коэффициент линейного расширения полимеров в несколько раз выше, чем металлов, то при изготовлении высокоточных деталей из пластмасс способом механообработки их измерение необходимо производить после полного охлаждения и стабилизации размеров и формы.

Очень важно при механообработке полимерных материалов не допускать их перегрева, так как в этом случае термопласты оплавляются, а реактопласты подвергаются деструкции. Кроме того, при температуре 60–80°С стружка многих полимеров размягчается и прилипает к режущему инструменту. На рис. 11.15 показано изменение температуры обрабатываемого материала при увеличении скорости резания.



их перегрева, так как в этом случае термопласты оплавляются, а реактопласты подвергаются деструкции. Кроме того, при температуре 60–80°С стружка многих полимеров размягчается и прилипает к режущему инструменту. На рис. 11.15 показано изменение температуры обрабатываемого материала при увеличении скорости резания.

Рисунок 14.1 – Влияние скорости резания  $V$  на температуру заготовки в плоскости сдвига (сплошные линии) и на границе стружки и передней поверхности резца (пунктирные линии): • – ПММА; о – ПС

Изделия из полимеров при механообработке должны эффективно охлаждаться, а скорость резания должна быть ниже, чем при обработке металлов. Отличительной особенностью процесса является недопустимость использования для охлаждения маслосодержащих жидкостей, в том числе смазывающе-охлаждающих эмульсий, поскольку масла могут оказывать пластифицирующее действие на полимер, изменяя его структуру и свойства. Как правило, для охлаждения используют воду, но в некоторых случаях ее применение также нежелательно, поскольку отдельные полимеры набухают в

воде, изменяя свои механические, диэлектрические и оптические свойства. В этих случаях охлаждение производят интенсивным обдувом воздухом.

Режимы резания (скорость и глубина резания, подача режущего инструмента, толщина снимаемой стружки), а также конструкция инструмента зависят от типа полимера и вида механической обработки. Обрабатываемость полимерного материала точением оценивают по глубине резания, при которой образуется непрерывная стружка. Отличной обрабатываемостью обладают полиэтилен, фторопласт-4, АБС-пластики, полиамид, поликарбонат, винипласт, полипропилен, полиметилметакрилат и др. Удовлетворительно обрабатываются гетинакс и текстолит, плохо обрабатываются реактопласты.

Качество поверхности при резании пластмасс зависит от вида образующейся стружки, виды которой показаны на рис. 14.2. Высокого качества обработки удастся достичь при получении «сливной» стружки и стружки скалывания. Удовлетворительное качество поверхности получается при образовании элементной стружки и совсем плохое — при образовании стружки надлома и неоднородной элементной стружки.

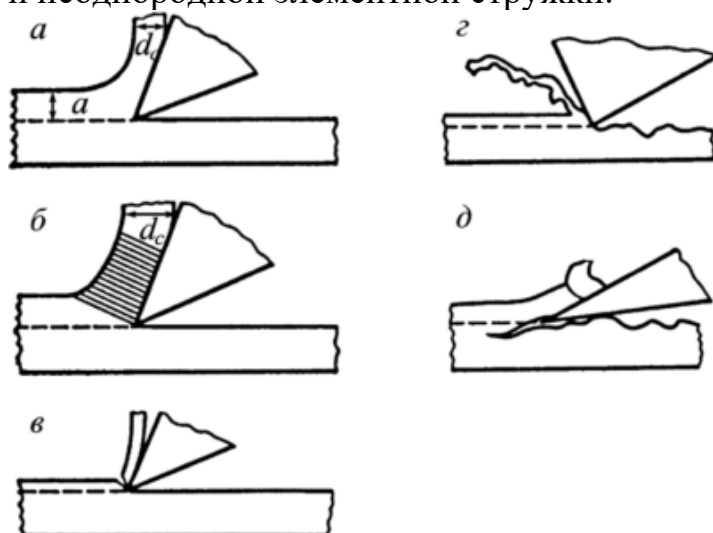


Рисунок 14.2 – Виды стружки, образующейся при резании пластмасс: *a* – сливная; *б* – скалывания (штриховкой указаны плоскости скалывания); *в* – элементная; *г* – надлома; *д* – неоднородная элементная: *a* – толщина срезаемого слоя;  $d_c$  – толщина стружки

Характеристики стружки, образующейся при резании полимеров, зависят от вязкоупругих свойств материала и условий резания. Величина скорости резания, при которой образуется непрерывная стружка, для разных полимерных материалов различна. При низкой скорости резания образуется непрерывная стружка, однако вследствие высокой эластичности материала четкая плоскость среза у стружки не образуется. С увеличением скорости резания стружка начинает прерываться, причем, чем выше скорость резания, тем больше дискретность стружки. При очень высокой скорости резания полимерных материалов (более 200 м/мин) характер полимерной стружки не отличается от характера металлической стружки, так как высокоэластические свойства полимеров не успевают проявиться.

Поскольку в высокоэластическом состоянии полимер находится в определенном температурном диапазоне (между  $T_c$  и  $T_m$ ), то механизм резания и характер образующейся стружки изменяются при изменении температуры для разных полимеров по-разному. При обработке одного и того же материала можно получить стружку любого типа, изменяя геометрию режущего инструмента и режимы резания. В табл. 14.1 приведены данные о режимах резания некоторых пластмасс, которые показывают, что они зависят не только от свойств полимерного материала, но и от свойств режущего инструмента.

Таблица 14.1 – Режимы резания при точении изделий из пластмасс

Обрабатываемый материал	Материал резца	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм
<i>Термопласты</i>				
Полиэтилен	Быстрорежущая сталь	90–135	0,04–0,1	–
Полипропилен	ВК8	100–400	0,05–0,4	0,5–1,0
Поливинилхлорид	Быстрорежущая сталь	30–1000	0,1–0,2	До 10
Полиамид	Быстрорежущая сталь	100–300	0,1–0,3	0,5–1,0
Полиметилметакрилат	Быстрорежущая сталь	300–1000	0,08–0,12	0,5–1,0
<i>Реактопласты</i>				
Фенопласт	P18	200–400	0,1–0,6	1,0–4,0
Волокнит	P18	50–300	0,1–0,4	0,5–2,0
Гетинакс	P18	100–200	0,05–0,2	0,5–4,0
Стекловолокнит АГ-4В	ВК6М	130–200	0,1–0,5	0,5–4,0
Стеклотекстолит	ВК2	200–250	0,1–0,5	0,5–3,0
Текстолит	В К6	200–400	0,1–0,5	1,0–3,0

Обработка пластмасс многолезвийными инструментами (фрезерование, сверление) сопровождается значительным разогревом инструмента и материала. Такую обработку целесообразно выполнять на быстроходных металлообрабатывающих станках и использовать многолезвийные фрезы и сверла из углеродистой инструментальной стали для обработки термопластов и из быстрорежущей стали для обработки реактопластов.

Для получения отверстий с высоким качеством поверхности необходимо удалять из них образующуюся при сверлении стружку, а обработку отверстия выполнять за несколько проходов. Использование фрез со спиральными зубьями позволяет исключить ударные нагрузки при резании материала.

При изготовлении пластмассовых деталей может производиться *нарезание резьбы*. Для этого при нарезании наружной резьбы используют плашки, фрезы, резцы, а при нарезании внутренней резьбы – азотированные или хромированные метчики. Геометрия резьбонарезного инструмента для полимеров отличается от геометрии инструмента, используемого для нарезания резьбы на металлических изделиях. У резца должен быть большой задний и отрицательный ( $-5...-10^\circ$ ) передний углы. Скорость резания при нарезании резьбы может составлять 12–20 м/мин. Диаметр метчиков должен быть больше диаметра требуемой резьбы, поскольку при ее нарезании происходит усадка отверстий. При нарезании резьбы большого диаметра целесообразно использовать синтетические масла, например, кремнийорганические жидкости, в которых обрабатываемый полимер не набухает.

*Шлифование* поверхности изделий из пластмасс производится с помощью абразивных материалов с использованием ленточных и дисковых инструментов. Наиболее удобны высокопористые карборундовые круги средней твердости с различным размером зерен в зависимости от требуемого качества поверхности. Как и при других видах механической обработки, детали из пластмасс при шлифовании следует оберегать от перегрева.

Для получения поверхностей особо высокого качества используют *полирование* мягкими кругами из фетра или хлопчатобумажных тканей. Очень удобны меховые полировальные чехлы, надеваемые на вращающиеся круги ручных полировальных машин. При полировании используют специальные полировальные пасты.

## **14.2 Особенности резания композиционных материалов**

Механическая обработка композиционных материалов значительно отличается от обработки металлов. Кроме того, композиционные материалы также различаются между собой по своим свойствам и должны обрабатываться с учетом индивидуальных особенностей. Различия свойств, влияющих на обрабатываемость, внутри группы композитов гораздо более значительны, чем, например, между металлами, что создает определенные трудности при их обработке. Зачастую начало изготовления изделий из этих материалов требует полного переосмысления методов обработки, перечня используемого

инструмента, способа закрепления заготовки, а в некоторых случаях – даже применения специализированного оборудования и оснастки.

Процесс резания композиционных материалов также существенно отличается от резания металлов. Во время механической обработки резанием композиционных материалов на основе эпоксидных смол режущая кромка вызывает *отслаивание волокон*.

Непременным условием при резании композитов является острота режущей кромки инструмента, призванная предотвратить любое трение между инструментом и заготовкой. Вероятность износа инструмента также должна быть сведена к минимуму, поскольку любые изменения геометрической формы режущей кромки приведут к мгновенному росту температур в зоне резания и критическому износу кромки.

Геометрию инструментов следует подбирать таким образом, чтобы обеспечить легкое ненагруженное резание с минимальными силами резания. Только индивидуальный подход к каждой отдельной операции при обработке композиционных материалов сможет обеспечить в итоге производительный и надежный процесс производства изделий из этого непростого материала. Сравнение и оценка любого из предлагаемых методов должна сопровождаться экономическими расчетами. Однако следует помнить, что по отношению к этому материалу главным показателем целесообразности применения того или иного способа обработки не всегда служит скорость съема материала.

Например, достижение требуемого качества на отдельной операции сверления и одновременно приемлемой себестоимости ее выполнения может значительно повлиять на производительность. Обеспечение требуемого качества на первой операции исключает необходимость в осуществлении доводочных манипуляций, что приведет к сокращению времени обработки. Наибольшую трудность при изготовлении деталей из КМ составляют операции сверления отверстий, торцевое фрезерование, обработка плоскости и кромок. Ниже, на конкретных примерах приведены эти операции с указанием конструкции инструмента и режимов резания.

Специфическая структура и характерные физико-механические свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ) определяют существенные особенности обработки их резанием, отражаются на всех результирующих технологических показателях, а также вызывают необходимость рассматривать ПКМ как особую группу труднообрабатываемых материалов [4, 8–9].

В свою очередь, процесс резания и его результаты (точность обработки и качество поверхностного слоя, производительность, себестоимость, период стойкости режущего инструмента, скорость резания, способность к стружкодроблению и др.) находятся в прямой зависимости от процесса стружкообразования.

Процесс удаления срезаемого слоя в полимерных композиционных материалах отличается дискретностью и может быть представлен стадиями деформирования и разрушения, показанными на рис. 14.3. В начальный момент внедрения инструмента происходит сжатие обрабатываемого материала, сопровождающееся смятием контактных слоев (рис. 14.3, а) и увеличением

площади контакта инструмента с заготовкой. При этом в области режущей кромки образуется сетка микротрещин, которые вызывают локальное разрыхление связующего и создают условия для разрушения срезаемого слоя в целом. По мере увеличения сопротивления деформированию в определенный момент наступает хрупкое разрушение матрицы (рис. 14.3, б) с образованием зоны сдвига (плоскости скалывания).

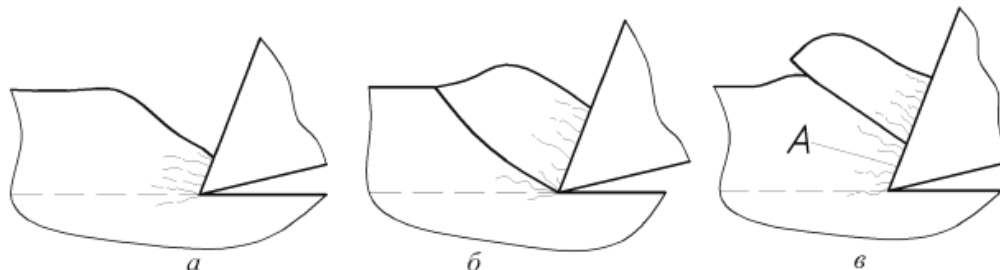


Рисунок 14.3 – Процесса образования стружки при точении органопластиков: а, б, в – последовательные стадии стружкообразования

Разрушение матрицы вызывает перераспределение нагрузки, которая воспринимается армирующими волокнами. Дальнейшее перемещение инструмента приводит к смещению образовавшегося элемента стружки вдоль плоскости скалывания, что обуславливает дополнительное нагружение волокон, пересекающих зону сдвига, нарушение адгезионных связей с матрицей одних волокон и разрушение (разрыв) других, длина которых в образующемся элементе стружки превышает критическую «длину включения» для конкретного материала.

В процессе смещения элемента стружки одновременно происходит смятие материала срезаемого слоя в области А (рис. 14.3, в), что является началом образования нового элемента стружки. Рассмотренный процесс в дальнейшем периодически повторяется. При обработке композитов с арматурой из малопластичных материалов сетка микротрещин в области режущей кромки в некоторых случаях приводит к практически одновременному образованию сразу двух плоскостей скалывания, по которым отделяется последовательно два элемента стружки.

Все стадии удаления срезаемого слоя сопровождаются диспергированием материала, образованием мелких фрагментов связующего с обрывками волокон и пыли. Сравнивая описанный процесс со стружкообразованием при резании металлов, можно отметить, что во многом он несет в себе признаки образования элементной стружки и одновременно стружки надлома. Вместе с тем отдельные элементы и частицы удаляемого материала остаются связанными между собой обрывками волокон наполнителя, то есть стружка сходит в виде непрерывной ленты (рис. 14.4, а). Формированию стружки сопутствует образование мелких частиц материала и пыли (рис. 14.4, б).

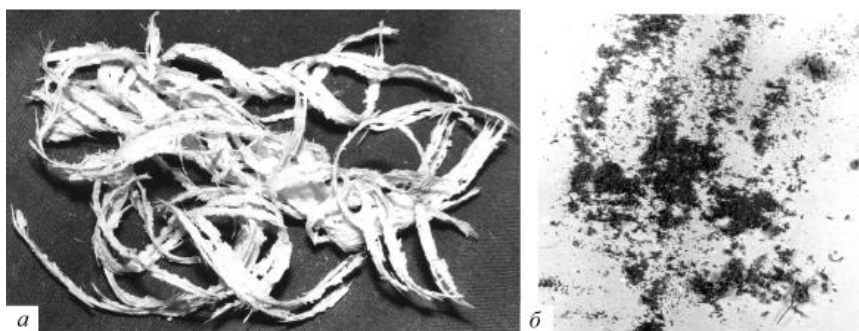


Рисунок 3 – Вид стружки при лезвийной обработке ПКМ (а), и образующиеся в процессе стружкообразования мелкие фрагменты композита и пыль (б)

По мере увеличения ширины площадки износа по задней поверхности инструмента связь между отдельными элементами стружки становится менее прочной. При достижении определенной степени износа стружка начинает распадаться на отдельные мелкие кусочки разной величины. Такой тип стружки характерен для точения, сверления и фрезерования (на длине рабочего участка от точки входа до выхода лезвия инструмента).

Вид стружки, ее геометрические характеристики, степень диспергирования материала срезаемого слоя, микромеханические и динамические и процессы в зоне стружкообразования зависят от многих факторов: физико-механических свойств и геометрических характеристик наполнителя, свойств связующего, строения композита, технологического метода и режимных параметров первичного формообразования, расположения волокон относительно направления движения режущего инструмента, режима резания и других условий обработки.

Процесс стружкообразования непосредственно связан с формированием поверхностного слоя обработанной поверхности, от состояния которого зависят качество изделия и его служебные характеристики в целом.

Полимерные композиционные материалы, кроме всего прочего, характеризуются низкой теплостойкостью, что при повышенных температурах, сопровождающих обработку резанием, вызывает явление термохимической деструкции полимерного связующего. Термохимическая деструкция материала заключается в нарушении устойчивости и разрушении химических связей молекулярных цепей полимера, появлении прижогов с образованием коксового слоя, выделением газообразных продуктов распада связующего и сопровождается при этом потемнением поверхности материала. Для ответственных изделий машиностроения возникновение термохимической деструкции является недопустимым дефектом.

Термическая деструкция полимерной матрицы начинается уже при температурах 250–350°С, поэтому обработку ПКМ следует вести на таких режимах, при которых температура в зоне резания не превышает 300°С.

Вместе с тем, температура резания не является однозначным показателем наличия или отсутствия термохимической деструкции. Интенсивность протекания деструкционных процессов в материале зависит не только от величины температуры, но и от времени воздействия этой температуры на

поверхность. Этим объясняются результаты обеспечения высокого качества поверхностного слоя ПКМ при высокоскоростной обработке, когда температура резания может превышать теплостойкость материала в несколько раз.

При нестационарных условиях обработки время контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью изменяется в широких пределах. При стационарном резании длительность контакта изменяется непрерывно по мере износа инструмента по задней поверхности. Таким образом, рекомендуемое ограничение по температуре резания 300°C не отражает всех возможных условий обработки и во многих случаях приводит к занижению параметров режима резания, значительному снижению (до нескольких раз) производительности процесса обработки, увеличению себестоимости изделия.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. На какие классы принято разделять полимерные материалы? Чем вызвано такое разделение?
2. Опишите сложности, возникающие при обработке материалов резанием.
3. В каких случаях используют лезвийную обработку полимерных материалов?
4. Дайте понятие композиционных материалов. Почему они получили такое название?
5. Опишите структуру композиционных материалов. Как она влияет на обрабатываемость композитов?
6. Опишите технологию обработки полимерных композиционных материалов резанием.

## САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ»

### 1 Рекомендации к выполнению заданий самостоятельной работы

*Цель самостоятельной работы* – систематизация и закрепление знаний, полученных на лекционных и лабораторных занятиях по резанию материалов, формирование у студентов навыков выполнения типовых расчетов.

Отчет по самостоятельной работе должен иметь следующую структуру:

- титульный лист;
- содержание;
- введение;
- основная часть (решение типовых задач по номеру варианта, указанному преподавателем);
- заключение;
- список использованной литературы.

Самостоятельная работа оформляется на одной стороне стандартного листа А4. Текст следует печатать через полтора интервала, соблюдая следующие размеры полей: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее – 15 мм, нижнее – 20 мм. Шрифт TimesNewRoman 14 пт.

Страницы отчета по самостоятельной работе нумеруются арабскими цифрами. Титульный лист включается в общую нумерацию работы. Номер страницы проставляется в правом углу верхнего поля листа, на титульном листе и оглавлении номер страницы не ставится.

Помимо расчетной части контрольная работа содержит конспектирование 2–3 теоретических вопросов (их номера и количество определяются преподавателем). Контрольная работа сопровождается презентацией по теоретической части, содержащей не менее 15 слайдов, включая титульный и заключительный. Титульный лист контрольной работы оформляется в соответствии с *Приложением* и подписывается обучающимся и преподавателем.

В структуру индивидуальной работы необходимо включить:

1. Оглавление с указанием названий разделов. Кроме этого в оглавлении включают структурные компоненты: введение, заключение и список использованных источников. Введению, заключению и списку использованной литературы номера не присваиваются.

2. Введение, которое является третьей страницей контрольной работы. Введение должно содержать следующую информацию: обоснование актуальности изучаемого материала, цель и задачи контрольной работы. Введение не следует перегружать общими рассуждениями, в нем должны содержаться сведения, непосредственно относящиеся к теме работы.

3. Основной текст, включающий выполнение расчетных заданий, указанных преподавателем.

4. Библиографическое описание источников, использовавшихся в процессе конспектирования теоретических вопросов и разработки мультимедийной презентации.

При оформлении заголовков работы следует учитывать следующие требования:

– заголовки разделов печатаются в центре симметрично тексту жирными заглавными буквами. Переносы слов в заголовках не допускаются и точка в конце не ставится;

– расстояние между текстом и заголовком должно составлять один интервал;

– заголовки введения, разделов, заключения, списка литературы начинаются с нового листа, заголовки подразделов – на том же листе, где заканчивается предыдущий подраздел. Заголовки подразделов выделяются жирным шрифтом, нумеруются арабскими цифрами, через точку в порядке раздела (например, п. 2.1).

В качестве источников могут быть использованы учебники, учебные пособия, статьи в специальных изданиях, научные публикации, материалы ИНТЕРНЕТ. Все используемые источники тщательно прорабатываются и конспектируются студентом в соответствии с указанным вариантом работы.

Окончательно оформленную работу необходимо предоставить для проверки и оценивания не позднее, чем за неделю до официально установленного срока сдачи зачета. Успешно сданная работа является допуском к текущему контролю.

## **2 Примеры выполнения заданий самостоятельной работы**

### **Задание № 1**

#### **МАРКИРОВКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ И КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

1. Расшифруйте состав сталей 50, У9 и 40Х13 и классифицируйте их по назначению. В какой из этих сталей малое содержание углерода? Укажите, какие из приведенных сталей относятся к низколегированным.

2. Расшифруйте марку чугуна КЧ 33-8 и укажите вид графита.

3. Расшифруйте марочный состав цветных сплавов ЛАЖМц66-6-3-2 и БрО16С5. Укажите области применения указанных марок.

#### **Решение**

##### *1. Расшифровка маркировки сталей 50, У9 и 40Х13*

Все стали делятся на углеродистые и легированные: первые имеют в своем составе только железо и углерод (двухфазная система Fe-C), а вторые еще и дополнительные легирующие элементы. Перечень основных легирующих элементов: названия легирующих элементов: Г – марганец, С – кремний, Х – хром, Н – никель, М – молибден, В – вольфрам, Ф – ванадий, Ю – алюминий, Т – титан, Р – бор, Д – медь Б – ниобий.

Из сталей 50, У9 и 40Х13 легирующий элемент (хром) указан только в маркировке последней, поэтому первые две относятся к углеродистым.

**Сталь 50** – относится к качественным углеродистым сталям, в которых содержание вредных примесей (серы S и фосфора P) не может превышать 0,03% для каждой. Такие стали идут на изготовление деталей ответственного назначения и маркируются двумя цифрами, которые обозначают содержание углерода в сотых долях процента.

Таким образом, химический состав стали 50:

- железо Fe – 99,44%;
- углерод C – 0,50%;
- сера S и фосфор P – 0,06% (в сумме).

**Сталь У9** – сталь инструментальная углеродистая высококачественная. Применяется при производстве инструмента, работающий в условиях, не вызывающих разогрева кромки: инструмента для обработки дерева, слесарно-монтажный инструмента, калибров простой формы и пониженных классов точности. Химический состав определяется по марочнику сталей:

Химический состав в % материала У9							
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,86–0,93	0,17–0,33	0,17-0,33	до 0,25	до 0,028	до 0,03	до 0,2	до 0,25

**Сталь 40X13** – относится к легированным сталям, в состав которых специально введены один или несколько элементов (хром, никель, вольфрам) с целью улучшения эксплуатационных качеств.

Первая цифра в маркировке обозначает содержание углерода в сотых доля процента, а цифры после легирующих элементов – их содержание в процентах. Таким образом, химический состав стали 40X13:

- железо Fe – 86,54%;
- углерод C – 0,40%;
- хром Cr – 13%;
- сера S и фосфор P – 0,06% (в сумме).

К низколегированным относят стали, содержащие менее 5% легирующих элементов, поэтому сталь 40X13 не является низколегированной.

## 2. Расшифровка маркировки чугуна КЧ 33-8

Буквы КЧ в маркировке обозначают, что это ковкий чугун. Данный материал имеет повышенную прочность, износостойкость и пластичность по сравнению с серыми чугунами благодаря хлопьевидной форме графита, но и большую трудоемкость при изготовлении. Маркируется буквами КЧ и двумя цифрами. Первая цифра, умноженная на 10, дает предел прочности при растяжении в МПа, вторая – относительное удлинение в процентах. Из ковкого чугуна изготавливают отливки для корпусов редукторов, задних мостов автомобилей, ступиц зубчатых колес.

Химический состав КЧ 33-8 определяется по марочнику чугунов:

Химический состав в % материала КЧ 33-8						
Fe	C	Si	Mn	S	P	Cr
94,4	2,5–2,9	1–1.6	0,4-0,6	до 0,2	до 0,18	до 0,08

Предел прочности при растяжении составляет 330 МПа, а относительное удлинение на момент разрыва – 8%. Данная марка чугуна используется для изготовления деталей, работающих при средних статических и динамических нагрузках.

3. *Расшифровка маркировки цветных сплавов ЛАЖМц66-6-3-2 и БрО16С5.*

Буква Л в марке сплава ЛАЖМц66-6-3-2 указывает на то, что это латунь – сплав меди с цинком (от 5 до 45%), а наличие легирующих элементов – что латунь сложного состава. Марку этих латуней составляют следующим образом:

- первой, как в простых латунях, ставится буква Л;
- вслед за ней – ряд букв, указывающих, какие легирующие элементы, кроме цинка, входят в эту латунь;
- затем через дефисы следуют цифры, первая из которых характеризует среднее содержание меди в процентах, а последующие – каждого из легирующих элементов в той же последовательности, как и в буквенной части марки.

Значит марка ЛАЖМц66-6-3-2 расшифровывается так: латунь, в которой содержится 66% меди, 6% алюминия, 3% железа и 2% марганца. Содержание цинка в ней:  $100\% - (66 + 6 + 3 + 2) = 23\%$ .

Буква Бр в марке сплава БрО16С5 указывают на то, что это бронза – металлический сплав на основе меди. Порядок расшифровки тот следующий: легирующие элементы и их содержание в процентах идут в порядке убывания.

Марка БрО16С5 расшифровывается таким образом: бронза, в которой содержится 16% олова и 5% свинца. Содержание меди в ней:

$$100\% - (16 + 5) = 79\%.$$

Задание выполнено.

## Задание 2

### ПРИМЕР РАСЧЕТА РЕЖИМА РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

Определить фактическую скорость точения заготовки из стали 40Х (штамповка) с пределом прочности  $\sigma = 1\,000$  МПа твердостью 200НВ. Общий припуск на обработку (на диаметр)  $h = 8$  мм, диаметр заготовки  $D = 95$  мм, диаметр детали (после обработки)  $d = 89$  мм, длина обрабатываемой поверхности  $l = 140$  мм. Требуемая шероховатость поверхности  $Ra = 2,5$  мкм, станок – 1К62.

### Решение

Исходя из общего припуска на обработку и требований к шероховатости поверхности обработку проводим в два прохода (черновое и чистовое точение). По табл. 2.1 выбираем материал пластинки из твердого сплава: для чернового точения – Т5К10, для чистового точения – Т15К6.

Для станка 1К62 с высотой центров 200 мм размеры сечения державки резца принимаем:  $H \times B = 25 \times 16$  мм. Для обработки выбираем проходной прямой отогнутый резец с пластинкой из твердого сплава, размеры которого приведены в табл. 2.2: резец 2102 – 0055 ГОСТ 18877-73.

Таблица 2.1 – Выбор марки твердого сплава

Характер обработки	Марка сплава при обработке			
	стали		чугуна	
	углеродистой и легированной	закаленной	НВ240	НВ 400-700
Черновое точение по корке и окалине при неравномерном сечении среза и прерывистом резании с ударами	Т5КШ, Т5К12В, ВК8, ВК83		ВК8, ВК8В, ВК4	ВК8, ВК8В
Черновое точение по корке при неравномерном сечении среза и непрерывном резании	Т14К8, Т5К10		ВК4, ВК8, ВК6	ВК6М, ВК4
Получистовое и чистовое точение при прерывистом резании	Т15К6, Т14В8, Т5К10, ВСК-60, ВСК-63, В3	Т5К10, ВК4 ВК8 ТНМ-20, В3	ВК4, ВК6, ВК8	ВК6М
Точное точение при прерывистом резании	Т30К4 Т15К6	Т14К8, Т5К10, ВК4	ВК3, ВК3, ВК4	ВК6М, ВК3
Точное точение при непрерывном резании	Т30К4	Т30К4, Т15К6, ВК6М, ВК3М	ВК3, ВК3М	ВК6М, ВК3М, ВК3
Отрезка и прорезка канавок	Т15К6, Т14К8, Т5К10	ВК6М, ВК4	ВК3, ВК3М	ВК6М, ВК3М

В зависимости от материала режущей части резца и условий обработки выбираем одинаковую форму передней поверхности резцов (для чернового и чистового точения) по табл. 2.2: номер Пб – плоская, с отрицательной фаской.

Таблица 2.2 – Проходные отогнутые резцы с твердосплавной пластинкой

Обозначение	Сечение резца $H \times B$ , мм	Длина резца, мм	$m$ , мм	Форма пластинки ГОСТ 2209-69
2102-0071	16×10	100	6	01Б
2102-0073	16×12	100	7	01Б
2102-0075	20×12	120	7	01Б
2102-0077	20×16	120	10	02Б
2102-0055	25×16	140	10	02Б
2102-0079	25×20	140	13	02Б
2102-0059	32×20	170	13	02Б
2102-0081	32×25	170	16	02Б
2102-0063	40×25	200	16	02Б

Согласно ГОСТ выбираем геометрические параметры резцов:  $\gamma_\phi = -10^\circ$ ,  $\gamma = 15^\circ$ ,  $\alpha_{черн} = 8^\circ$ ,  $\alpha_{чист} = 12^\circ$ ,  $\phi = 45^\circ$ ,  $\phi_1 = 45^\circ$ ,  $\lambda = 0^\circ$ .

При чистовом точении глубину резания принимаем  $t_2 = 1$  мм, тогда глубина резания при черновом точении определяется по формуле

$$t_1 = \frac{h}{2} - t_2 = \frac{8}{2} - 1 = 3.$$

При черновой обработке подачу выбираем по табл. 2.3 в зависимости от обрабатываемого материала, диаметра заготовки и глубины резания в пределах 0,6–1,2 мм/об. Принимаем  $S_1 = 0,8$  мм/об.

Таблица 2.3 – Подачи при черновом наружном точении

Диаметр детали, мм	Державка резца, мм	Сталь					Чугун					
		Подача, мм/об при глубине резания $t$ , мм										
		до 3	3-5	5-8	8-12	от 12	до 3	3-5	5-8	8-12	от 12	
До 20	От 16×25 до 25×25	0,3-0,4										
От 20 до 40	От 16×25 до 25×25	0,4-0,5	0,3-0,4				0,4-0,5					
От 40 до 60	От 16×25 до 25×40	0,5-0,9	0,4-0,8	0,3-0,7			0,6-0,9	0,5-0,8	0,4-0,7			
От 60 до 100	От 16×25 до 25×40	0,6-1,2	0,5-1,1	0,5-0,9	0,4-0,8		0,8-1,4	0,7-1,2	0,6-1,0	0,5-0,9		
От 100 до 400	От 16×25 до 25×40	0,8-1,3	0,7-1,2	0,6-1,0	0,5-0,9		1,0-1,5	0,9-1,4	0,8-1,1	0,6-0,9		
От 400 до 500	От 20×30 до 40×60	1,1-1,4	1,0-1,4	0,7-1,2	0,6-1,2	0,4-1,1	1,3-1,6	1,2-1,5	1,1-1,3	0,8-1,0	0,7-0,9	
От 500 до 600	От 20×30	1,2-1,5	1,0-1,4	0,8-1,3	0,6-1,3	0,4-3,2	1,5-1,8	1,2-1,6	1,0-1,4	0,9-1,2	0,8-1,0	

При чистовой обработке подачу выбираем по табл. 2.3 в зависимости от шероховатости поверхности и радиуса при вершине резца, который принимаем равным 1,2 мм,  $S_2 = 0,2$  мм/об.

Определяем скорость резания  $v$ , м/мин. по формуле:

$$v = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_v,$$

где  $C_v$  – коэффициент, зависящий от условий обработки (для черновой обработки  $C_{v1} = 340$ ; для чистовой –  $C_{v2} = 420$ );  $T$  – стойкость резца, мин (принимаем  $T_1 = T_2 = 60$  мин);  $x$ ,  $y$  и  $m$  – показатели степени;  $K_v$  – общий поправочный коэффициент, представляющий собой произведение отдельных коэффициентов, каждый из которых отражает влияние определенного фактора на скорость резания.

Для резцов с пластиной из твердого сплава  $K_v$  равно:

$$K_v = K_{\mu v} \cdot K_{nv} \cdot K_{\varphi v} \cdot K_{ov},$$

где  $K_{\mu v} = 0,75$  – общий поправочный коэффициент, учитывающий влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала  $K_{nv}$  – поправочный коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки: при черновой обработке  $K_{nv1} = 0,8$ ; при чистовой обработке –  $K_{nv2} = 1,0$ ;  $uv$   $K_{uv}$  – поправочный коэффициент, учитывающий материал режущей части:  $K_{uv1} = 0,65$  и  $K_{uv2} = 1,0$ ;  $K_{\varphi v}$  – поправочный коэффициент, учитывающий главный угол в плане резца – для  $\varphi = 45^\circ$   $K_{\varphi v1} = K_{\varphi v2} = 1,0$ ;  $K_{ov}$  – поправочный коэффициент, учитывающий вид обработки ( $K_{ov} = 1,0$ ).

Общий поправочный коэффициент для резцов (чернового и чистового):

$$K_{v1} = 0,75 \cdot 0,8 \cdot 0,65 \cdot 1 \cdot 1 = 0,39.$$

$$K_{v2} = 0,75 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 0,75.$$

Показатели степени  $x$ ,  $y$  и  $m$  принимаем равными:

– для черновой обработки –  $x_1 = 0,15$ ;  $y_1 = 0,20$  и  $m_1 = 0,20$  (при  $S$  до 0,3 мм/об);

– для чистовой обработки –  $x_2 = 0,15$ ;  $y_2 = 0,45$  и  $m_2 = 0,20$  (при  $S$  более 0,7 мм/об).

Скорость резания равна:

$$v_1 = \frac{340}{60^{0,2} \cdot 3^{0,15} \cdot 0,8^{0,2}} \cdot 0,39 = 52,2 \text{ м/мин};$$

$$v_2 = \frac{420}{60^{0,2} \cdot 3^{0,15} \cdot 0,2^{0,2}} \cdot 0,75 = 290 \text{ м/мин}.$$

Определяем частоту вращения шпинделя по расчетной скорости резания:

$$n_1 = \frac{1000 v_1}{\pi D_1} = \frac{1000 \cdot 52,2}{3,14 \cdot 95} = 175 \text{ об/мин};$$

$$n_2 = \frac{1000 v_2}{\pi D_2} = \frac{1000 \cdot 290}{3,14 \cdot 89} = 1037 \text{ об/мин}.$$

Для черновой обработки выбираем 13 ступень коробки скоростей  $n_1 = 200 \text{ мин}^{-1}$ , для чистовой обработки выбираем 21 ступень коробки скоростей  $n_2 = 1000 \text{ мин}^{-1}$ . И наконец, определяем фактическую скорость резания

$$v_{\phi 1} = \frac{\pi D_1 n_1}{1000} = \frac{3,14 \cdot 95 \cdot 200}{1000} = 59,7 \text{ м/мин};$$

$$v_{\phi 2} = \frac{\pi D_2 n_2}{1000} = \frac{3,14 \cdot 89 \cdot 1000}{1000} = 279,5 \text{ м/мин}.$$

Задание выполнено.

### Задание 3

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ И ВРЕМЕНИ СВЕРЛИЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

На вертикально-сверлильном станке модели 2А135 производится рассверливание отверстия под последующую обработку. Обработка производится с применением смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ).

Исходные данные:

Материал заготовки: чугун серый с пределом прочности 170НВ.

Вид отверстия: глухое (рис. 3.1).

Диаметр отверстия до обработки  $d = 20 \text{ мм}$ .

Диаметр отверстия после обработки  $D = 30 \text{ мм}$ .

Глубина сверления  $l = 50 \text{ мм}$ .

Операция – сверлильная, вертикально-сверлильный станок мод. 2А135

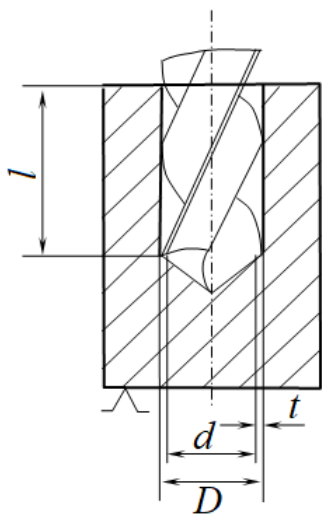


Рисунок 3.1 – Операционный эскиз рассверливания отверстия

## Решение

### I. Выбор инструмента

Для рассверливания отверстий выбирают сверло спиральное из быстрорежущей стали с коническим (нормальным) хвостовиком, ГОСТ 10903-77. Материал сверла: быстрорежущая сталь Р6М5

Выбираем геометрические размеры сверла:

- диаметр сверла  $\varnothing = 30$  мм;
- длина режущей части:  $l = 175$  мм;
- общая длина:  $L = 296$  мм.

Определяем геометрические параметры режущей части сверла:

- задний угол  $\alpha = 11^\circ$ ;
- угол наклона поперечной кромки  $\psi = 55^\circ$ ;
- форма заточки сверла: нормальная;
- стойкость сверла  $T = 75$  мин.

### II. Расчет режимов резания.

1. Расчет глубины резания  $t$  выполняем по формуле

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{30 - 20}{2} = 5 \text{ мм},$$

где  $D$  – диаметр отверстия после обработки, мм;  $d$  – диаметр отверстия до обработки.

2. Расчет подачи  $S$ , мм/об.

Выбираем из  $s$ ,  $s_{\max}$ ,  $s'_{\max}$ ,  $s''_{\max}$  наименьшее значение и согласовываем с паспортом станка:

- по нормативам  $S = 0,54$  мм/об,
- по прочности сверла

$$s_{\max} = C_p \cdot D^{0,6} = 0,13 \cdot 30^{0,6} = 0,99 \text{ мм/об},$$

где  $C_p = 0,13$  – согласно методических указаний;

- по прочности механизма подачи стола (при рассверливании)

$$s'_{\max} = y_p \sqrt{\frac{[P_0]}{10 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot K_p}},$$

где  $[P_0] = 10\,660$  Н – максимальная осевая сила, допускаемая механизмом подачи;  $C_p = 23,5$ ;  $x_p = 1,2$ ;  $y_p = 0,4$ ;  $K_p$  – коэффициент, определяемый по формуле

$$K_p = \left(\frac{HB}{170}\right)^{0,6} = \left(\frac{170}{170}\right)^{0,6} = 1.$$

Тогда

$$s'_{\max} = y_p \sqrt{\frac{[P_0]}{10 \cdot C_p \cdot t^{x_p} \cdot K_p}} = 0,4 \sqrt{\frac{10\,660}{10 \cdot 23,5 \cdot 5^{1,2} \cdot 1}} = 107,7 \text{ мм/об.}$$

- по прочности коробки скоростей

$$s''_{\max} = y_M \sqrt{\frac{M_{\max}}{10 \cdot C_M \cdot D^{q_M} \cdot t^{x_M} \cdot K_p}},$$

где  $C_M = 0,085$ ;  $x_M = 0,75$ ;  $y_M = 0,8$ ;  $q_M = 1$ ;  $M_{\max}$  – максимальный крутящий момент станка, определяемый по формуле

$$M_{\text{кр.}\max} = \frac{9750 \cdot N_{\text{дв}} \cdot \eta}{n_{\min}} = \frac{9750 \cdot 6 \cdot 0,8}{42} = 1114,3 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где  $N_{\text{дв}} = 6$  кВт – мощность двигателя станка;  $n_{\min} = 42$  об/мин – минимальная частота вращения сверла;  $\eta = 0,8$  – КПД станка.

Тогда

$$s''_{\max} = 0,8 \sqrt{\frac{1114,3}{10 \cdot 0,085 \cdot 30^1 \cdot 5^{0,75} \cdot 1,1}} = 22 \text{ мм/об}.$$

Из полученных значений:  $S = 0,54$  мм/об;  $S_{\max} = 0,99$  мм/об;  $S'_{\max} = 107,7$  мм/об и  $S'_{\max} = 22$  мм/об выбираем наименьшее значение:

$$S = 0,54 \text{ мм/об}.$$

Согласовываем с паспортом станка:  $S = 0,5$  мм/об.

### III. Расчет скорости резания

1. Теоретическая скорость резания  $v_T$  (при рассверливании):

$$v_T = \frac{C_v \cdot D^{q_v}}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot s^{y_v}} \cdot K_v, \text{ м/мин};$$

где  $C_v = 23,4$ ;  $q_v = 0,25$ ;  $x_v = 0,1$ ;  $y_v = 0,4$ ;  $m = 0,125$ ;  $K_v = 1,15$  – общий поправочный коэффициент;  $T = 75$  мин.

Тогда

$$v_T = \frac{23,4 \cdot 30^{0,25}}{75^{0,125} \cdot 5^{0,1} \cdot 0,5^{0,4}} \cdot 1,15 = 41,4 \text{ м/мин}.$$

2. Определение потребной частоты вращения (по диаметру сверла):

$$n = \frac{1000 v_T}{\pi D} = \frac{1000 \cdot 41,4}{3,14 \cdot 30} = 439,5 \text{ об/мин}.$$

3. Расчет частоты вращения по мощности станка производится по формуле

$$n_N = \frac{N_{\text{дв}} \cdot \eta \cdot 9750}{M_{\text{кр}}}, \text{ об/мин}.$$

Крутящий момент определяют из выражения

$$M_{\text{кр}} = 10 \cdot C_M \cdot D^{q_M} \cdot t^{x_M} \cdot s^{y_M} \cdot K_p, \text{ Н}\cdot\text{м};$$

где  $C_M = 0,085$ ;  $x_M = 0,75$ ;  $y_M = 0,8$ ;  $q_M = 1$ ;  $K_p = 1$ ;  $N_{\text{дв}} = 6$  кВт;  $n_{\min} = 42$ ;  $\eta = 0,8$ . Подставляя значения, получаем

$$M_{\text{кр}} = 10 \cdot 0,085 \cdot 30 \cdot 5^{0,75} \cdot 0,1^{0,8} \cdot 1 = 14,8 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Тогда частота вращения

$$n_N = \frac{6 \cdot 0,8 \cdot 9750}{14,8} = 3\ 162 = \text{об/мин.}$$

4. Выбираем наименьшее из  $n$  и  $n_N$  и корректируем по паспорту станка:

$$n_{cm} = 333 \text{ об/мин.}$$

5. Расчет фактической скорости резания:

$$v_\phi = \frac{\pi D \cdot n_{cm}}{1000} = \frac{3,14 \cdot 30 \cdot 333}{1000} = 0,031 \text{ м/мин} = 31 \text{ мм/мин.}$$

*IV. Проверочный расчет режимов резания по мощности станка*

1. Расчет мощности резания:

Момент резания при рассверливании равен крутящему моменту

$$M_{рез} = M_{кр} = 14,8 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Мощность резанья

$$N_{рез} = \frac{M_{рез} \cdot n_{cm}}{9750} = \frac{14,8 \cdot 333}{9750} = 0,505 \text{ кВт.}$$

Принимаем мощность резанья

$$N_{рез} = 0,5 \text{ кВт.}$$

Поскольку

$$0,5 \text{ кВт} < 4,8 \text{ кВт,}$$

то мощность станка достаточна для выполнения данной операции.

*V. Определение основного времени обработки  $T_o$ .*

Время обработки определяют по формуле

$$T_o = \frac{L}{n s} \cdot i, \text{ мин,}$$

где  $n$  – частота вращения сверла, об/мин;  $s$  – подача, мм/об;  $i = 1$  – число проходов/

Глубина врезания сверла

$$l_1 = \frac{D-d}{2} \cdot ctg \varphi + (0,5...2) = \frac{30-20}{2} \cdot ctg 60^\circ + 2 = 5 \text{ мм,}$$

где  $\varphi$  – половина угла при вершине сверла  $60^\circ$ .

Рабочий ход сверла

$$L = l + l_1 + l_2 = 50 + 5 + 0 = 55 \text{ мм}$$

где  $l$  – глубина сверления, мм;  $l_1$  – глубина врезания, мм;  $l_2 = 0$  мм – перебеж сверла для глухих отверстий.

Тогда основное время

$$T_o = \frac{L}{n s} \cdot i = \frac{55}{333 \cdot 0,5} \cdot 1 = 0,33 \text{ мин.}$$

Основные результаты вычислений представляем в виде таблицы

<b>Режимы резания</b>			
$t$ , мм	$S$ , мм/об	$n$ , об/мин	$v$ , м/мин
5	0,5	333	41,4

Задание выполнено.

#### Задание 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ И ВРЕМЕНИ ШЛИФОВАНИЯ ВАЛА

На круглошлифовальном станке 3М131 шлифуется шейка вала диаметром  $D = 80/h6$  мм длиной  $l = 300$  мм, длина вала  $l_1 = 550$  мм. Параметр шероховатости обработанной поверхности  $Ra = 0,4$  мкм, припуск на сторону 0,2 мм. Материал заготовки – сталь 45 закаленная, твердостью HRC45. Необходимо выбрать шлифовальный круг, назначить режим резания и определить основное время на технологическую операцию.

#### Решение

##### 1. Выбор шлифовального круга

Для круглого внешнего шлифования с продольной подачей (шлифовать с радиальной подачей нельзя из-за большой длины шлифуемой поверхности), параметра шероховатости  $Ra = 0,4$  мкм, конструкционной закаленной стали до HRC 45 принимаем шлифовальный круг формы ПП со следующими параметрами:

- характеристика – 24 А401 К,
- индекс зернистости Н,
- структура – 5,
- класс – А.

Полная маркировка круга ПП24 А40НС15КА 35 м/с, размеры шлифовального круга  $D_k = 600$  мм,  $B_k = 63$  мм определяем по паспорту станка.

##### 2. Назначение режима резания

По известной скорости выбранного шлифовального круга  $v_k = 35$  м/с предварительно определяем частоту вращения шпинделя шлифовальной бабки:

$$n'_{ш} = \frac{1000 \cdot 60 v_k}{\pi D_k} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot 35}{3,14 \cdot 600} = 1114,6 \text{ об/мин.}$$

Корректируя по паспортным данным станка, принимаем действительную частоту вращения шпинделя  $n_{ш} = 1112$  об/мин (корректируется только в меньшую сторону).

Окружная скорость заготовки находится в пределах  $v_z = 15...55$  м/мин, поэтому принимаем  $v_z = 30$  м/мин. Частота вращения шпинделя передней бабки, соответствующая принятой окружной скорости заготовки:

$$n'_z = \frac{1000 v_z}{\pi D_k} = \frac{1000 \cdot 30}{3,14 \cdot 80} = 119,4 \text{ об/мин.}$$

Поскольку частота вращения заготовки регулируется бесступенчато, принимаем  $n_z = 120$  об/мин.

Глубина шлифования должна находиться в пределах  $t = 0,005...0,015$  мм. Учитывая бесступенчатое регулирование поперечной подачи шлифовального круга, на ход стола принимаем

$$t = 0,005 \text{ мм.}$$

Продольная подача равна  $S = (0,2...0,4) \cdot B_k$ , мм/об. Принимаем

$$S = 0,25 B_k = 0,25 \cdot 63 = 15,75 \text{ мм/об.}$$

Скорость продольного хода стола:

$$v_c = \frac{S \cdot n_z}{1000} = \frac{15,75 \cdot 120}{1000} = 1,89 \text{ м/мин.}$$

С учетом паспортных данных (бесступенчатое регулирование скорости продольного хода стола) принимаем

$$v_c = 1,9 \text{ м/мин.}$$

Выполняем проверку достаточности мощности станка. Мощность  $N_p$ , затрачиваемая на резанье, кВт:

$$N_p = C_N \cdot V_3^z \cdot t^x \cdot S^y \cdot d^q,$$

где  $C_N$  – коэффициент, учитывающий условия шлифования;  $x, y, z, q$  – показатели степени;  $V, t, S$  – элементы режима резанья;  $d$  – диаметр шлифования, мм.

Мощность на шпинделе станка:

$$N_{ш} = N_{\partial} \eta = 7,5 \cdot 0,8 = 6,0 \text{ кВт,}$$

где  $N_{\partial} = 7,5$  кВт и  $\eta = 0,8$  – мощность и коэффициент полезного действия станка.

Поскольку  $N_{ш} \geq 6$  кВт, а  $N_p = 4,63$  кВт, то обработка возможна.

### 3. Расчет основного времени

Находим длину  $L$  по формуле

$$L = l - (1 - k \cdot m) \cdot B_k = 300 - (1 - 1 \cdot 0,5) \cdot 63 = 268,5 \text{ мм,}$$

где  $m = 0,5$  – часть перебега круга, принятая равной половине круга;  $k = 1$  – количество сторон перебега круга.

Основное время на операцию шлифовки определяется по формуле:

$$T_o = \frac{L \cdot h}{1000 v_c \cdot t} \cdot K = \frac{268,5 \cdot 0,2}{1000 \cdot 1,9 \cdot 0,005} \cdot 1,4 = 7,92 \text{ мин,}$$

где  $K = 1,4$  – коэффициент выхода.

## 3 Задания к самостоятельной работе студентов

### Задание для самостоятельного выполнения № 1

Расшифруйте марочный состав сталей и классифицируйте их по назначению. В каких из этих сталей малое содержание углерода? Укажите, какие из приведенных сталей относятся к низколегированным.

Расшифруйте марку чугуна и укажите вид графита. Расшифруйте марочный состав цветных сплавов. Укажите области применения указанных марок. Исходные данные к заданию принять по табл. 1 в соответствии с номером варианта.

Таблица 1 – Исходные данные к заданию 1

№	стали	чугуны	цветные сплавы
1	2	3	4
1	Ст0; 08кп; 10ХСНД	СЧ15	АМц; БрОФ6,5-0,4; Д6
2	А12; ШХ4; Р18	ВЧ35	АК7; БрО17Ц4С4; Л90
3	А20; ШХ6; 7ХГ2ВМ	КЧ30-6	Д1; Б88; БрО8Н4Ц2
4	10; 15ХСНД; У8	СЧ25	АМг0,5; Л96; БрОФ6,5-0,15

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
5	Ст1пс; А30; 5Х2МН	ВЧ40	АК9; ЛО90-1; Б83
6	ШХ9; У9; Р6М5	КЧ33-8	АМг1; ЛЦ14К3С3; БрОФ7-2
7	Ст1сп; 20ХГР; У10	СЧ30	АК12; Л85; Б83С
8	20; 4Х3ВМФ; Р6М3	ВЧ45	Д16; ЛЦ23А6Ж3Мц2; Б16
9	Ст2кп; ШХ8; Р6М5	КЧ35-10	БрО6Ц6С3; Л60; Б83
10	25; А12; 25ХГТ	СЧ35	АМг3,5; АК9; Д16
11	Ст2; 25ХГМ; ШХ15	ВЧ50	Л66; ЛЦ40С; БрОЦС4-4-4
12	У12; 9Х5ВФ; Р18Ф2	КЧ37-12	АК5М2; Д19; ЛЦ40Мц1,5
13	Ст2; 30ХГ; Р18Ф2К8	СЧ15	АМг4,5; БрАЖ9-4; Б83С
14	ШХ4; У13; 9Г2Ф	ВЧ60	АМг4; БрО3Ц12С5; БКА
15	Ст3; 12ХН3А; ШХ15	КЧ45-7	АК12; Д18; ЛЦ36Мц2О2С2

**Задание для самостоятельного выполнения № 2**

Определить фактическую скорость точения заготовки из стали 40Х (штамповка) с пределом прочности  $\sigma = 900$  МПа твердостью НВ. Общий припуск на обработку (на диаметр)  $h$ , диаметр заготовки  $D$ , диаметр детали (после обработки)  $d$ , длина обрабатываемой поверхности  $l$ . Требуемая шероховатость поверхности  $Ra = 2,5$  мкм, станок – 1К62. Исходные данные к заданию принять по табл. 2 в соответствии с номером варианта.

Таблица 2 – Исходные данные к заданию 2

№ варианта	Твердость НВ	Припуск $h$ , мм	$D$ , мм	$d$ , мм	$l$ , мм
1	220	6	90	85	150
2	201	7	95	90	155
3	205	8	90	86	160
4	210	6	85	80	150
5	195	7	80	75	155
6	180	8	90	85	160
7	175	6	95	88	150
8	170	7	98	92	155
9	179	8	85	81	60
10	173	6	87	84	150
11	184	7	90	86	155
12	190	8	92	85	160
13	194	6	94	90	150
14	200	7	95	87	155
15	202	8	92	90	160

**Задание для самостоятельного выполнения № 3**

На вертикально-сверлильном станке модели 2А135 производится рассверливание отверстия под последующую обработку. Обработка производится с применением смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ). Материал заготовки: чугун серый, отверстие глухое, используется вертикально-

сверлильный станок мод. 2A135. Исходные данные для расчета выбрать из табл. 3.

Таблица 3 – Исходные данные для расчета

№ вар.	Твердость НВ	$D$ , мм	$d$ , мм	$l$ , мм
1	220	30	25	50
2	201	35	28	55
3	205	40	35	60
4	210	45	35	50
5	195	40	30	55
6	180	40	25	60
7	175	35	25	50
8	170	38	28	55
9	179	35	28	60
10	173	37	30	50
11	184	40	32	55
12	190	42	30	60
13	194	44	34	50
14	200	45	34	55
15	202	42	32	60

#### Задание для самостоятельного выполнения № 4

Выполнить расчет режима резания аналитическим способом согласно заданного варианта. В процессе расчета необходимо выбрать шлифовальный круг, назначить режим резания; определить основное время. Данные для расчета взять из табл. 4.

Таблица 4 – Исходные данные для расчета

№ п/п	Материал заготовки и свойства	Вид обработки и шероховатость, мкм	Размер шлифуемой поверхности, мм	Припуск на сторону, мм	Количество одновременно обрабатываемых деталей	Модель станка
1	2	3	4	5	6	7
1	Сталь 45ХН закаленная, HRC45	Конечная, $R_a = 0,8$	$D = 60h8$ $l = 240$	0,22	1	3М131
2	Сталь 40Х не закаленная	Конечная, $R_a = 0,4$	$D = 55h7$ $l = 40$	0,15	1	3М131
3	Серый чугун СЧ30, НВ220	Предварит., $R_a = 1,6$	$D = 120H8$ $l = 140$	0,25	1	3К228В
4	Серый чугун СЧ15, НВ190	Конечная, $R_a = 0,8$	$D = 80H7$ $l = 60$	0,2	1	3К228В
5	Сталь 12Х18Н9Т	Предварит., $R_a = 1,6$	$B = 250$ $l = 300$	0,4	2	3П722
6	Сталь 40Х закаленная, HRC52	Конечная, $R_a = 0,4$	$D = 55H7$ $l = 50$	0,18	1	3К228В

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7
7	Сталь 47А закаленная, HRC60	Конечная, $R_a = 0,8$	$B = 200$ $l = 300$	0,25	6	3П722
8	Серый чугун СЧ20, HB200	Предварит., $R_a = 1,6$	$B = 280$ $l = 650$	0,5	1	3П722
9	Бронза Бр АЖН 10-4 HB170	Конечная, $R_a = 0,8$	$D = 45h7$ $l = 120$	0,2	1	3М131
10	Сталь 40 закаленная, HRC35	Конечная, $R_a = 0,4$	$D = 84h7$ $l = 300$	0,1	1	3М131
11	Сталь Ст5	Предварит., $R_a = 1,6$	$D = 120h8$ $l = 48$	0,25	1	3М131
12	Сталь 45Х закаленная, HRC45	Конечная, $R_a = 0,8$	$D = 85H7$ $l = 60$	0,18	1	3П722
13	Сталь 40ХНМА закаленная, HRC55	Конечная, $R_a = 0,8$	$B = 120$ $l = 270$	0,2	6	3П722
14	Латунь ЛМцЖ 52-4-1	Предварит., $R_a = 1,6$	$D = 120H8$ $l = 80$	0,25	1	3К228В
15	Сталь 48А закаленная, HRC60	Конечная, $R_a = 0,4$	$D = 80H7$ $l = 70$	0,15	1	3К228В

## **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЗАЧЕТУ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ»**

1. Роль обработки резанием в технологиях изготовления деталей.
2. Цель и задачи изучения курса «Теория резания».
3. Понятие о системном подходе к анализу процесса резания.
4. Основные особенности процесса резания.
5. Исследования выдающихся ученых в области развития теории резания.
6. Классификация относительных движений инструмента и детали при существующих методах обработки.
7. Определение обрабатываемой, обработанной поверхности и поверхности резания при основных видах обработки.
8. Классификация и особенности видов резания.
9. Основные элементы режущих частей инструментов.
10. Режущий клин инструмента и его основные характеристики.
11. Определения координатных плоскостей для статической системы координат.
12. Определения геометрических параметров токарных резцов и основные схемы.
13. Отличие определения геометрических параметров режущих частей инструментов для кинематической системы координат.
14. Основные факторы, влияющие на изменение геометрии режущего инструмента.
15. Формы режущих частей токарных резцов для различных инструментальных материалов.
16. Влияние условий резания на форму и геометрию режущего инструмента.
17. Определения основных элементов резания и формулы их вычисления.
18. Формулировки параметров срезаемого слоя.
19. Примеры влияния геометрии режущего инструмента на параметры процесса резания.
20. Основные требования, предъявляемые к инструментальным материалам.
21. Классификация инструментальных материалов.
22. Основные физико-механические характеристики углеродистых сталей и их использование.
23. Основные марки, характеристики и использование низколегированных сталей.
24. Химический состав, физико-механические свойства и область применения быстрорежущих сталей.
25. Влияние различных легирующих элементов на физико-механические характеристики быстрорежущих сталей?
26. Применение быстрорежущих сталей, полученных методами порошковой металлургии.
27. Группы твердых сплавов по химическому составу.

28. Основные физико-механические характеристики твердых сплавов и области их рационального использования.
29. Классификация твердых сплавов по ISO.
30. Основные преимущества и недостатки керамики и керметов.
31. Свойства природных и искусственных алмазов, основные марки и их использование.
32. Классификация сверхтвердых поликристаллических материалов.
33. Основные физико-механические характеристики сверхтвердых поликристаллических материалов.
34. Предпочтительные инструментальные материалы при обработке сталей, чугунов, цветных металлов.
35. Инструментальные материалы при обработке высокопрочных материалов в закаленном состоянии.
36. Основные характеристики абразивного инструмента.
37. Методика выбора зернистости, связки, твердости и структуры шлифовальных кругов.
38. Характеристики шлифовального круга для обработки высокопрочной стали с высокими требованиями к качеству обработанных поверхностей.
39. Характеристики шлифовального круга для получистовой обработки серого чугуна.
40. Примеры маркировки шлифовальных абразивных кругов.
41. Требования к износостойким покрытиям.
42. Выбор износостойких покрытий для обработки различных материалов и условий резания.
43. Методы исследования процесса резания.
44. Влияние условий обработки на типы стружек, возникающих при резании?
45. Условия процесса образования сливной стружки.
46. Механика образования сливной стружки при единой условной плоскости сдвига.
47. Определения величин абсолютного и относительного смещения, угла сдвига.
48. Методика расчета скорости схода стружки вдоль передней поверхности.
49. Условия и механизм образования нароста.
50. Влияние режима резания, геометрии режущего инструмента и свойства обрабатываемых деталей на условия образования нароста.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное учебное пособие по учебной дисциплине «Резание материалов» включает обширный набор методических материалов для аудиторных занятий студентов и для самостоятельной работы студентов. В нем в полном объеме изложен теоретический материал, актуальный для профессиональной деятельности учителя технологии и отражающий современные представления о резании металлических, древесных, полимерных и композиционных материалов.

Изложение материала в учебном пособии ведется в соответствии с принципом фундаментализации профессиональной подготовки в вузе. Рассмотрение кинематики и динамики резания ориентирует студентов на создание новых способов формообразования поверхностей деталей, разработку новых конструкций режущих инструментов. По мнению авторов, понимание физической сущности процесса резания способствует более качественному освоению знаний студентами, а также пониманию подходов к повышению качества обработки, снижению износа инструмента.

Учебное пособие также ориентировано на активизацию познавательной деятельности студенты в процессе самостоятельной работы, их подготовку к поиску новых технических решений. Подбор заданий для самостоятельного выполнения позволяет научиться выполнять типовые расчеты при выполнении различных операций обработки материалов резанием. Предложенная тематика самостоятельных заданий и широта рассматриваемых в теоретической части явлений позволяют использовать данное пособие не только в процессе обучения студентов направления 44.03.04 «Педагогическое образование. Технология», но и при подготовке студентов инженерных направлений подготовки.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байкалова В.Н. Расчет режимов резания при точении. Методические рекомендации по курсу «Технология конструкционных материалов и материаловедение» (раздел «Обработка конструкционных материалов резанием») / В.Н. Байкалова, А.М. Колокатов, И.Д. Малинина. – М.: МГАУ им. В.П. Горячкина, 2000. – 19 с.
2. Балашов В.М. Обработка резанием в машиностроении : учеб. пособие для студентов вузов / В.М. Балашов, В.В. Мешков, С.П. Рыков. – Тверь : Изд-во Твер. гос. техн. ун-та, 2004. – 198 с.
3. Бородина Н.В. Теория резания металлов : конспект лекций. – Екатеринбург : Изд-во ФГАОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2010. – 131 с.
4. Васильев В.И. Резание материалов. В 2 ч. Ч. 1 : учебное пособие / В.И. Васильев, А.В. Негодин. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 236 с.
5. Васильев В.И. Резание материалов. В 2 ч. Часть 2 : учебное пособие / В.И. Васильев, А.В. Негодин. – Томск : Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2018. – 306 с.
6. Кишуров В.М. Резание материалов. Режущий инструмент : учеб. пособие для студентов вузов. – М. : Машиностроение, 2009. – 492 с.
7. Кожевников Д.В. Резание материалов / Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов. – М. : Машиностроение, 2012. – 304 с.
8. Комков М.А. Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения : учеб. пособие / М.А. Комков, В.А. Тарасов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.
9. Рыжкин А.А. Обработка материалов резанием : учеб. пособие / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 411 с.
10. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных материалов : учебник. – Л. : Машиностроение, 1987. – 176 с.
11. Попок Н.Н. Теория резания : учеб. пособие для студ. машиностроит. спец. – Новополюцк : ПГУ, 2006. – 228 с.
12. Ярославцев В.М. Обработка резанием полимерных композиционных материалов: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 180 с.
13. Ярославцев В.М. Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. «Композиционные материалы, конструкции и технологии». – 2005. – С. 41–62.
14. Ящерицин П.И. Теория резания : учебник / П.И. Ящерицин, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Минск : Новое знание, 2005. – 512 с.

**Для заметок**

Учебное издание

**КАЛАЙДО Александр Витальевич  
СЕРДЮКОВА Елена Яковлевна**

# **РЕЗАНИЕ МАТЕРИАЛОВ**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Подп. в печать 24.02.2021 г. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсет. Гарнитура Times New Roman  
Печать ризографическая. Усл. печ. л. 9,07.  
Тираж 100 экз. Зак. № 17.

*Издатель*

**ГОУ ВО ЛНР «ЛГПУ»**

**«Книга»**

**ул. Оборонная, 2, г. Луганск, 91011. Т/ф: (0642) 58-03-20.  
e-mail: knitaizd@mail.ru**