

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Конспект лекций

Витебский государственный технологический университет

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования

«Витебский государственный технологический университет»

И. С. Алексеев

К. С. Матвеев

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Конспект лекций

для студентов специальности 1-36 01 04

«Оборудование и технологии высокоэффективных процессов
обработки материалов»

Витебск

2011

УДК 621.9

ББК

А 47

Рецензенты: Савицкий В.В., доцент кафедры «МТВПО» УО ВГТУ,
Белов Е.В., доцент кафедры «ТиОМП» УО ВГТУ

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ»
«7» апреля 2010 г., протокол № 2

Алексеев, И. С. Теория обработки материалов : конспект лекций /
И. С. Алексеев, К. С. Матвеев. – Витебск : УО «ВГТУ», 2011. – 101 с.

ISBN 978-985-481-257-1

В конспекте лекций рассматриваются основные понятия, термины и определения, кинематические элементы процесса резания, материалы для режущих инструментов, процессы, происходящие в зоне резания, режимы резания для разных процессов обработки. Рассматривается также теория обработки материалов давлением, электрофизические и электрохимические методы обработки, гидроабразивная обработка и обработка порошковых материалов. Конспект предназначен для студентов специальности 1-36 01 04 «Оборудование и технологии высокоэффективных процессов обработки материалов».

УДК 621.9

ББК 34.5

ISBN 978-985-481-257-1

© Алексеев И.С., 2011

© Матвеев К.С., 2011

© УО «ВГТУ», 2011

Содержание

Введение	5
Тема 1. Теория обработки материалов резанием	
1.1 Основные понятия, термины и определения. Кинематические элементы процесса резания.....	5
1.2 Координатные плоскости и системы координатных плоскостей.....	9
1.3 Геометрические элементы лезвия резца.....	12
1.4 Геометрические параметры лезвия резца (углы заточки).....	13
1.5 Рабочие углы инструмента.....	18
1.6 Классификация основных видов резания.....	22
1.7 Элементы резания и размеры срезаемого слоя при продольном точении.....	24
1.8 Материалы для режущих инструментов.....	28
1.9 Источники образования тепла и распределение тепла между стружкой, инструментом и деталью.....	31
1.10 Режимы резания.....	34
1.10.1 Точение.....	34
1.10.2 Строгание.....	38
1.10.3 Фрезерование.....	44
1.10.4 Шлифование.....	47
1.10.5 Плоское шлифование.....	50
1.10.6 Протягивание.....	51
Тема 2. Теория обработки материалов давлением	
2.1 Дефекты кристаллической решетки.....	54
2.2 Движение атомов в кристалле, механизмы диффузии.....	57
2.3 Деформация монокристалла.....	58
2.4 Механизм сдвиговой деформации.....	60
2.5 Движение дислокаций.....	63
2.6 Нанокристаллические материалы.....	65
2.7 Микроструктура деформированных поликристаллов.....	66
2.8 Упрочнение поликристалла.....	68
2.9 Деформация при повышенных температурах.....	70
2.10 Холодная и горячая деформация металлов.....	73
2.11 Основные законы деформирования.....	74
Тема 3. Основы теории электрофизических и электрохимических методов обработки (ЭФЭХ)	
3.1 Характеристика электрофизических и электрохимических методов обработки.....	82

3.2 Электроэрозионные методы обработки.....	83
3.2.1 Электроискровая обработка.....	83
3.2.2 Электроимпульсная обработка.....	84
3.2.3 Электроконтактная обработка.....	85
3.3 Электрохимическая обработка.....	86
3.3.1 Электрохимическое полирование.....	86
3.3.2 Электрохимическая размерная обработка.....	87
3.4 Комбинированные методы обработки.....	87
3.4.1 Электроабразивная и электроалмазная обработка.....	87
3.5 Анодно-механическая обработка.....	88
3.6 Лучевые методы обработки.....	89
3.6.1 Электроннолучевая обработка.....	89
3.6.2 Лазерная обработка.....	90
3.7 Плазменная обработка.....	90

Тема 4. Основы теории гидроабразивной резки.....	91
---	-----------

Тема 5. Теория обработки порошковых материалов

5.1 Технологический процесс изготовления деталей из порошков.....	99
5.2 Измельчение порошковых материалов.....	100
5.3 Кинетика процесса измельчения.....	103
5.4. Гранулометрический состав порошков.....	104
5.5 Формование порошков.....	106
5.6 Спекание порошков.....	108

Список литературы.....	109
------------------------	-----

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении детали разрабатывается технологический процесс, который устанавливает количество и содержание переходов, последовательно приближающих форму заготовки к форме готовой детали. При этом следует иметь в виду, что к одному и тому же результату можно прийти разными путями, т.е. технологический процесс может быть многовариантным.

Выбор варианта — ответственный этап в работе технолога. В конечном итоге от того, как разработан технологический процесс, зависит эффективность производства детали — максимальная производительность и стойкость инструмента при минимальных отходах материала, капитальных вложениях и энергозатратах.

Назначение оптимальных с точки зрения эффективности процесса в целом формоизменяющих переходов базируется на знании законов пластического течения металла, его напряженного и деформированного состояния в конкретных условиях обработки, допустимых степеней деформации и др.

Целью настоящего курса является изучение физических основ резания и пластической деформации металла.

Тема 1. Теория обработки материалов резанием

1.1 Основные понятия, термины и определения. Кинематические элементы процесса резания

Понятие «*обработка*» связано с действием, направленным на изменение свойств предмета труда (заготовки) при выполнении технологического процесса. В зависимости от вида применяемой энергии для воздействия на заготовку обработка может быть механической, термической, химической, электрической и др.

Под *механической обработкой* понимают обработку материала заготовки давлением или резанием. *Обработка резанием* заключается в снятии с заготовки определенного слоя металла для получения из нее детали необходимой формы и размеров с соответствующим качеством и точностью обработанных поверхностей.

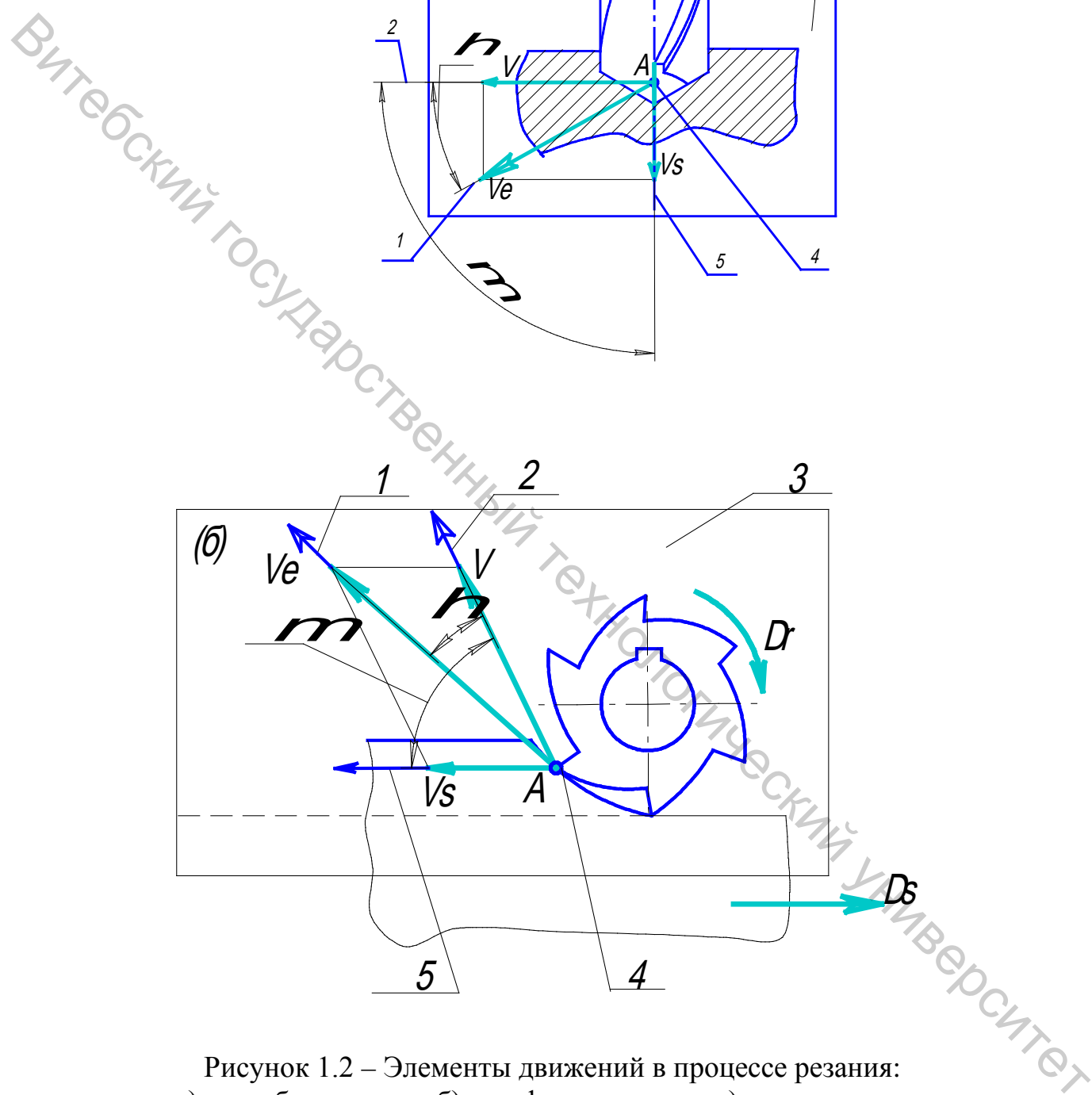


Рисунок 1.2 – Элементы движений в процессе резания:

а) при обтачивании; б) при фрезеровании; в) при сверлении

1 – направление скорости результирующего движения резания V_c ; 2 – направление скорости главного движения резания V ; 3 – рабочая плоскость P_s ; 4 – рассматриваемая точка режущей кромки A ; 5 – направление скорости движения подачи V_s .

Терминология, рассматриваемая в этой теме, позволяет успешно изучать и другие виды обработки резанием.

D_r – *главное движение резания* – это прямолинейное поступательное или вращательное движение заготовки или режущего инструмента, происходящее с *наибольшей скоростью* V .

D_s – *движение подачи* – это прямолинейное поступательное или вращательное движение режущего инструмента или заготовки, скорость которого V_s *меньше* скорости главного движения резания, предназначенное для отделения слоя обрабатываемого материала.

D_e – *результатирующее движение резания* – это суммарное движение режущего инструмента относительно заготовки, включающее главное движение резания D_r и движение подачи D_s .

V – скорость рассматриваемой точки A режущей кромки или заготовки в главном движении резания D_r называется *скоростью резания*.

V_s – скорость рассматриваемой точки A режущей кромки в движении подачи D_s называется *скоростью подачи*.

V_e – скорость рассматриваемой точки A режущей кромки в результирующем движении резания D_e называется *результатирующей скоростью*.

P_s – рабочая плоскость, в которой расположены направления скоростей главного движения резания V и движения подачи V_s .

η – *угол скорости резания*, расположенный в рабочей плоскости P_s между направлениями скоростей результирующего движения резания V_e и главного движения резания V .

μ – *угол подачи*, расположенный в рабочей плоскости P_s между направлениями скоростей движения подачи V_s и главного движения резания V .

Различают (рис. 1.3) поверхность главного движения R_r и поверхность резания R .

Поверхность главного движения R_r – это поверхность, образуемая режущей кромкой в главном движении резания D_r . Представляет собой коническую поверхность.

Поверхность резания R – это поверхность, образуемая режущей кромкой в результирующем движении резания ($D_r + D_s$). Представляет собой винтовую коническую поверхность.

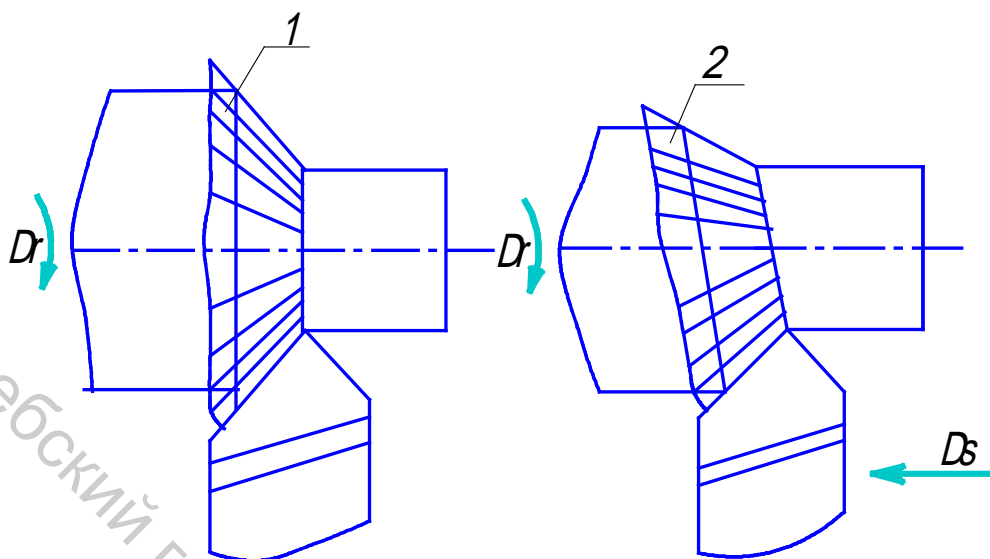


Рисунок 1.3 – Поверхность резания и поверхность главного движения:
 1) поверхность главного движения – R_r ; 2 – поверхность резания – R

1.2 Координатные плоскости и системы координатных плоскостей

Расположение координатных плоскостей, при помощи которых возможно определять геометрические параметры (углы) режущего инструмента, принято связывать с кинематическими элементами процесса резания. Координатные плоскости взаимно перпендикулярны, и центр их пересечения лежит в рассматриваемой точке A на режущей кромке. На рис. 1.4 показано расположение координатных плоскостей для процесса продольного точения. Для всех видов обработки резанием определение расположения координатных плоскостей производится по нижеописанным правилам:

- P_v – **основная плоскость** – это координатная плоскость, проведенная через рассматриваемую точку A режущей кромки, перпендикулярно направлению скорости главного V (или результирующего V_e) движения резания в этой точке.
- P_n – **плоскость резания** – это координатная плоскость, касательная к режущей кромке в точке A и перпендикулярная основной плоскости.
- P_τ – **главная секущая плоскость** – это координатная плоскость, перпендикулярная линии пересечения основной плоскости и плоскости резания в точке A .

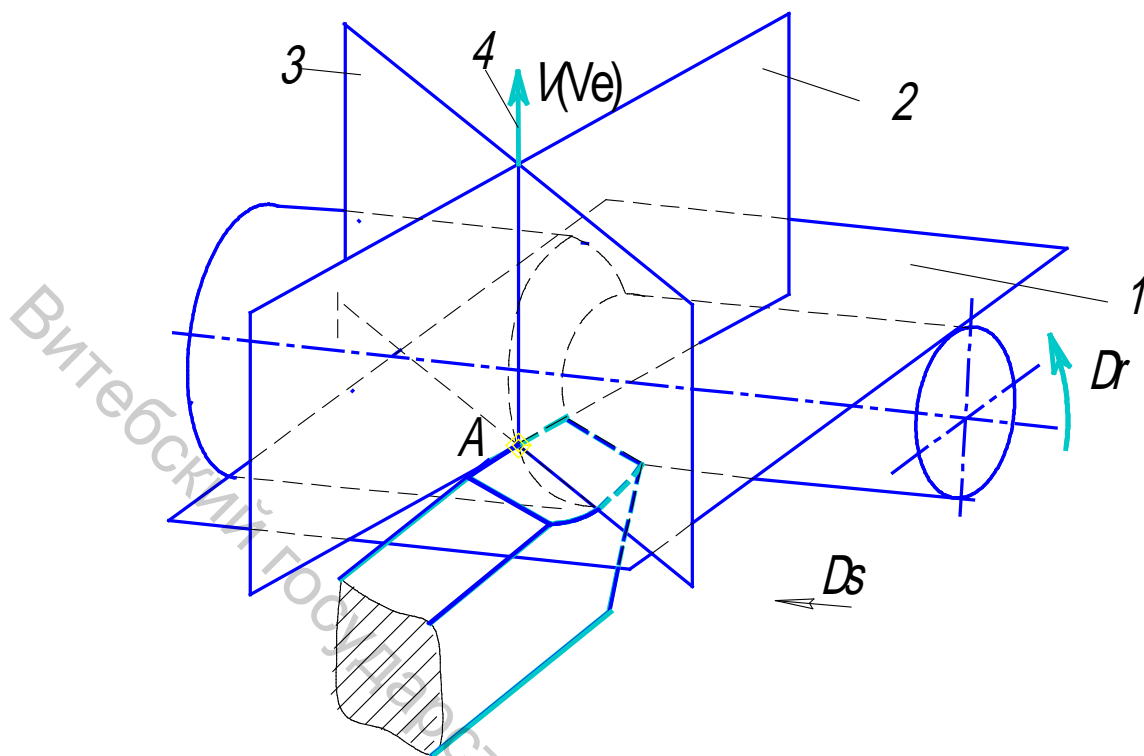


Рисунок 1.4 – Расположение координатных плоскостей относительно кинематических элементов процесса резания:

1– основная плоскость P_v ; 2 – плоскость резания P_n ; 3– главная секущая плоскость P_τ ; 4– $V (V_e)$ – вектор скорости главного движения D_r (или скорости результирующего движения – D_e)

Несмотря на то, что координатные плоскости (основная, резания и главная секущая) взаимно перпендикулярны, по отношению к режущему инструменту их ориентация может быть разной. В практике предусмотрено применение трех систем координатных плоскостей: *инструментальной, статической и кинематической*. На рис. 1.5, 1.6, 1.7 показаны расположения координатных плоскостей в различных системах.

Рассматривается операция отрезки:

Инструментальная система координат (ИСК) – это прямоугольная система координат с началом в вершине лезвия, ориентированная относительно геометрических элементов режущего инструмента, принятых за базу. Например, плоскость резания P_{ni} совпадает с задней поверхностью инструмента.

Инструментальная система координат применяется для изготовления и контроля инструментов (рис. 1.5).

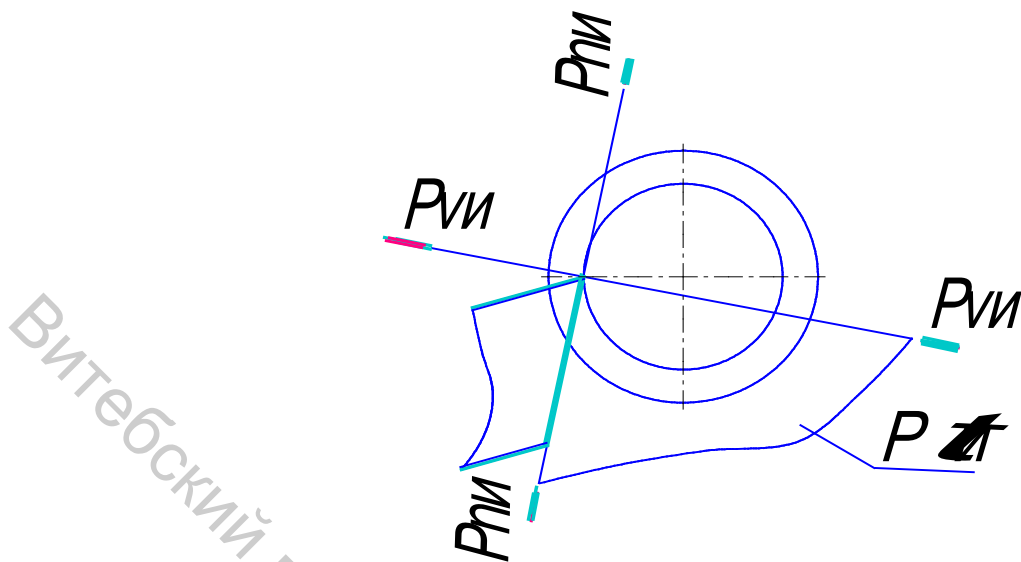


Рисунок 1.5 – Инструментальная система координат:

$P_{ви}$ – инструментальная основная плоскость; $P_{пи}$ – инструментальная плоскость резания; $P_{тл}$ – инструментальная главная секущая плоскость

Статическая система координат (ССК) – это прямоугольная система с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно направления скорости главного движения резания V . Статическая система координат является наиболее широко применяемой в практике. Эта система позволяет игнорировать влияние скорости подачи V_s на величину результирующей скорости V_e , поэтому вся система и сориентирована относительно вектора скорости главного движения V (рис. 1.6).

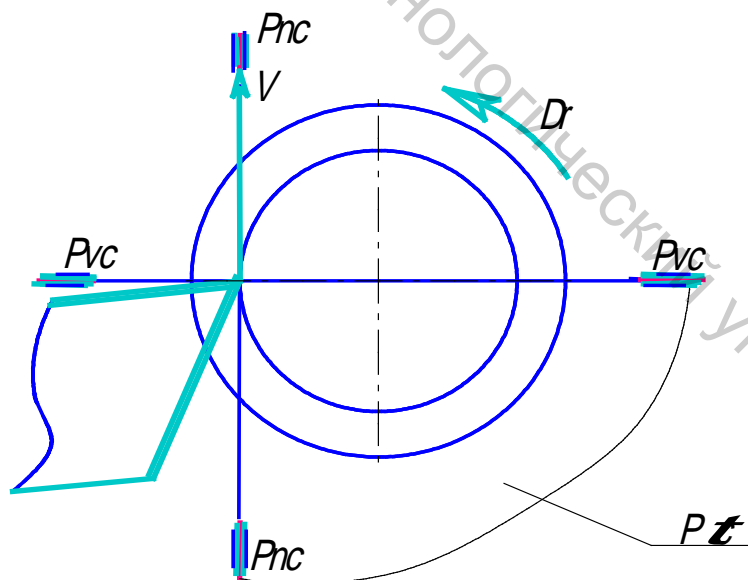


Рисунок 1.6 – Статическая система координат:

P_{vc} – статическая основная плоскость; P_{nc} – статическая плоскость резания; $P_{тс}$ – статическая главная секущая плоскость; V – скорость главного движения D_r

Статическая система координат применяется для приближенных расчетов углов лезвия в процессе резания и для учета изменения этих углов, после уста-

новки инструмента на станке. Является переходной от инструментальной системы координат к кинематической.

Кинематическая система координат (КСК) – это прямоугольная система с началом в рассматриваемой точке режущей кромки, ориентированная относительно направления скорости результирующего движения резания V_e (рис. 1.7).

Кинематическая система координат применяется для точных аналитических расчетов.

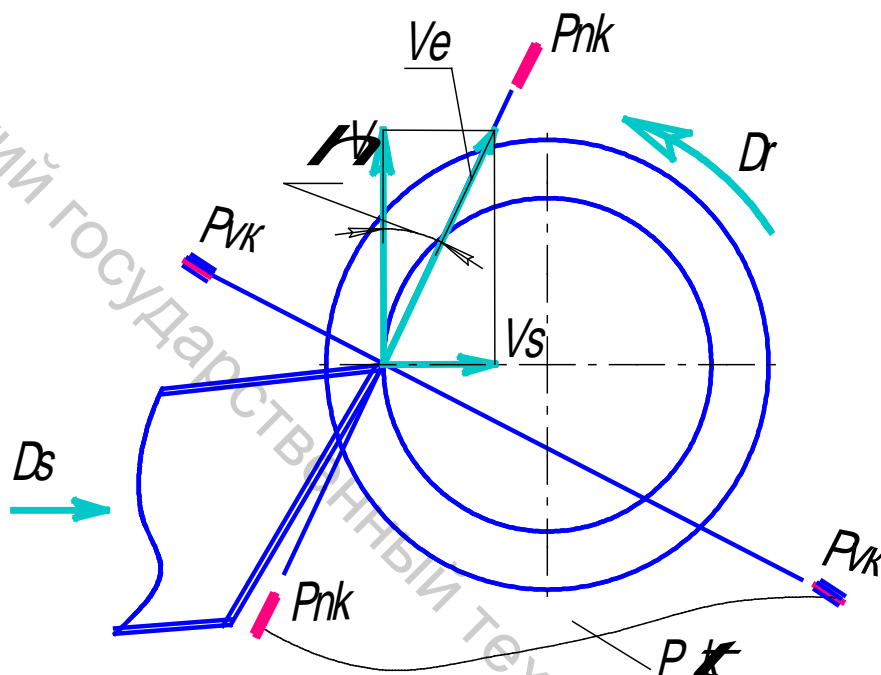


Рисунок 1.7 – Кинематическая система координат:

P_{vk} – кинематическая основная плоскость; P_{nk} – кинематическая плоскость резания; $P_{тк}$ – кинематическая главная секущая плоскость; V_e – результирующая скорость; V_f – скорость главного движения D_f ; V_s – скорость движения подачи D_s .

1.3 Геометрические элементы лезвия резца

Наиболее простым режущим инструментом является прямой проходной резец (рис. 1.8).

Резец состоит из двух частей: рабочей части – лезвия (I), несущего режущие элементы, и крепежной части (II), служащей для закрепления резца на станке. Лезвие инструмента имеет форму клина. С его помощью с заготовки отделяют слой определенной толщины, превращая его в стружку.

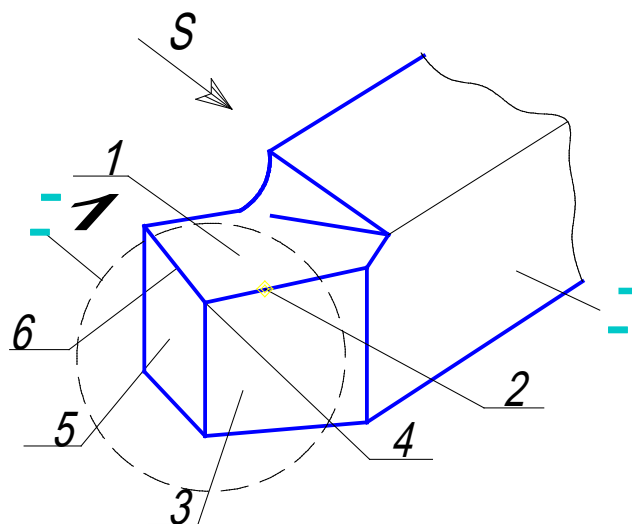


Рисунок 1.8 – Прямой проходной резец:

I– рабочая часть резца (лезвие); II– крепежная часть резца (державка);
 S– направление подачи; 1– передняя поверхность A_γ ; 2– главная режущая кромка K; 3– главная задняя поверхность A_α ; 4 – вершина лезвия; 5– вспомогательная задняя поверхность A'_α ; 6– вспомогательная режущая кромка K'

На лезвии инструмента (резца) различают следующие элементы:

A_γ –передняя поверхность – это поверхность лезвия инструмента, контактирующая в процессе резания со срезаемым слоем и стружкой;

A_α –главная задняя поверхность – это задняя поверхность лезвия инструмента, которая примыкает к *главной* режущей кромке K и контактирует с поверхностью резания;

A'_α –вспомогательная задняя поверхность – это задняя поверхность лезвия инструмента, которая примыкает к *вспомогательной* режущей кромке K' и контактирует с обработанной поверхностью;

K – главная режущая кромка – это часть режущей кромки, формирующая *большую* сторону сечения срезаемого слоя;

K'–вспомогательная режущая кромка – это часть режущей кромки, формирующая *меньшую* сторону сечения срезаемого слоя.

Вершина лезвия – это место пересечения главной и вспомогательной режущих кромок.

1.4 Геометрические параметры лезвия резца (углы заточки)

Геометрические параметры лезвия резца (углы заточки) рассматривают в координатных плоскостях в статической системе координат (ССК) (рис. 1.9).

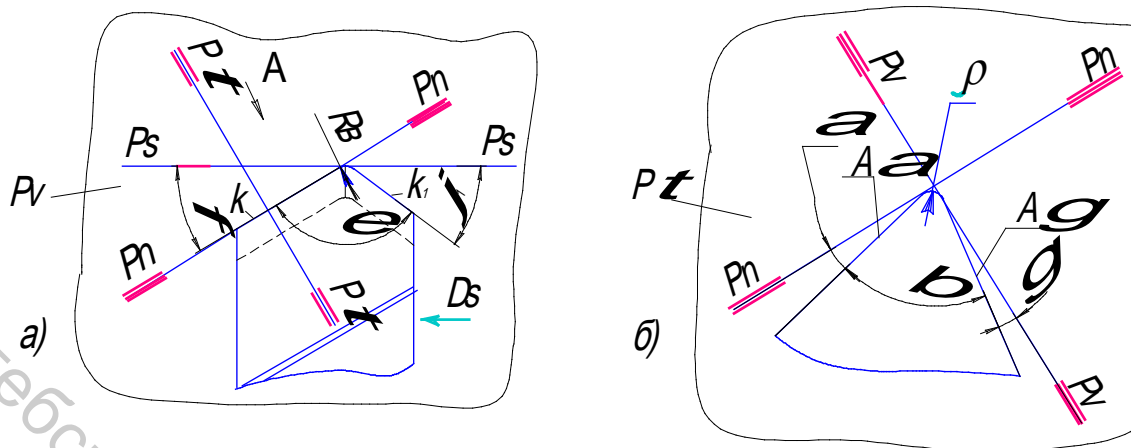


Рисунок 1.9 – Геометрические параметры лезвия реза:
 а) в основной плоскости P_v ; б) в главной секущей плоскости P_t

Углы в основной плоскости P_v (углы в плане):

- φ – главный угол в плане – это угол между плоскостью резания P_n и рабочей плоскостью P_s ;
- φ_1 – вспомогательный угол в плане – это угол между рабочей плоскостью P_s и проекцией вспомогательной режущей кромки K_1 на основную плоскость P_v ;
- ε – угол при вершине лезвия.

Очевидно, что $\varphi + \varepsilon + \varphi_1 = 180^\circ$.

- r_b – радиус вершины – определяет радиус кривизны вершины лезвия.

Углы в главной секущей плоскости P_t :

- γ – главный передний угол – это угол между передней поверхностью лезвия A_γ и основной плоскостью P_v ;
- α – главный задний угол – это угол между главной задней поверхностью лезвия A_α и плоскостью резания P_n ;
- β – главный угол заострения – это угол между передней и задней поверхностями лезвия.

Очевидно, что $\gamma + \beta + \alpha = 90^\circ$.

- ρ – радиус округления режущей кромки – это радиус кривизны режущей кромки в сечении ее нормальной секущей плоскостью.

Различают положительный и отрицательный передний угол γ (рис. 1.10).

Если режущая кромка занимает наивысшее положение на передней поверхности A_γ , то передний угол γ будет положительным. Если режущая кромка расположена ниже других точек передней поверхности A_γ , то передний угол γ будет отрицательным.

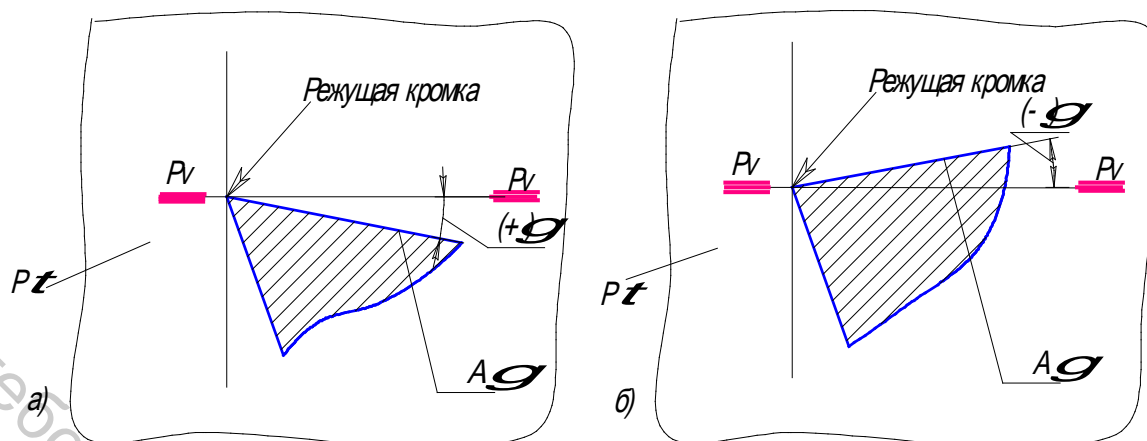


Рисунок 1.10 – Определение переднего угла γ :

а) положительный передний угол γ ; б) отрицательный передний угол γ

В плоскости резания P_r :

λ – угол наклона главной режущей кромки – это угол между главной режущей кромкой K и основной плоскостью P_v (рис. 1.11).

Различают положительный угол λ когда вершина резца занимает низшее положение на главной режущей кромке K , и отрицательный угол λ когда вершина резца занимает высшее положение на главной режущей кромке K .

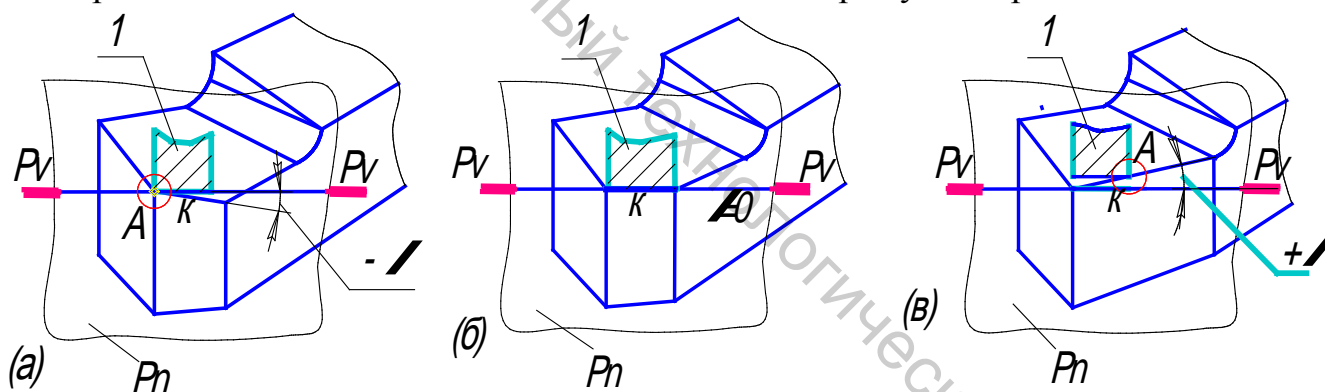


Рисунок 1.11 – Определение угла наклона главной режущей кромки λ :

1 – снимаемый припуск (первый контакт в точке A); k – главная режущая кромка; а) угол λ отрицательный; б) угол λ равен 0; в) угол λ положительный

Угол наклона главной режущей кромки λ определяет место расположения точки A на режущей кромке, в которой происходит первое касание со снимаемым слоем (припуском) (рис. 1.11).

Угол λ также определяет направление схода стружки (угол схода стружки ν) и кинематический передний угол γ_p (рис. 1.12).

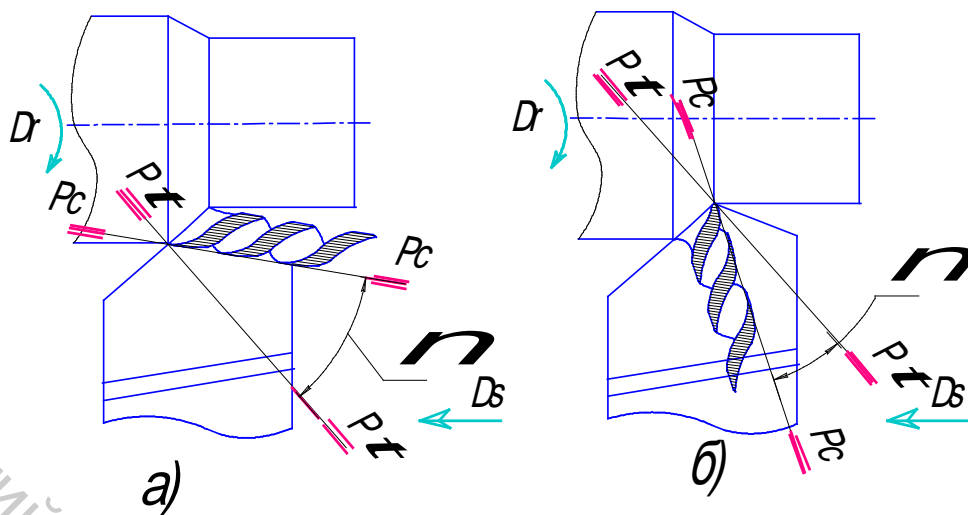


Рисунок 1.12 – Определение угла схода стружки ν :
 а) направление схода стружки при положительном угле λ ;
 б) направление схода стружки при отрицательном угле λ

Кинематический передний угол γ_p рассматривают в секущей плоскости схода стружки P_c , которая проходит через направления схода стружки и скорости резания в рассматриваемой точке режущей кромки.

Особенности выбора геометрических параметров лезвия резцов

А Форма передней поверхности

Различают 3 основные формы передней поверхности: криволинейная с фаской, плоская с фаской и плоская с углом γ положительным и отрицательным (рис. 1.13).

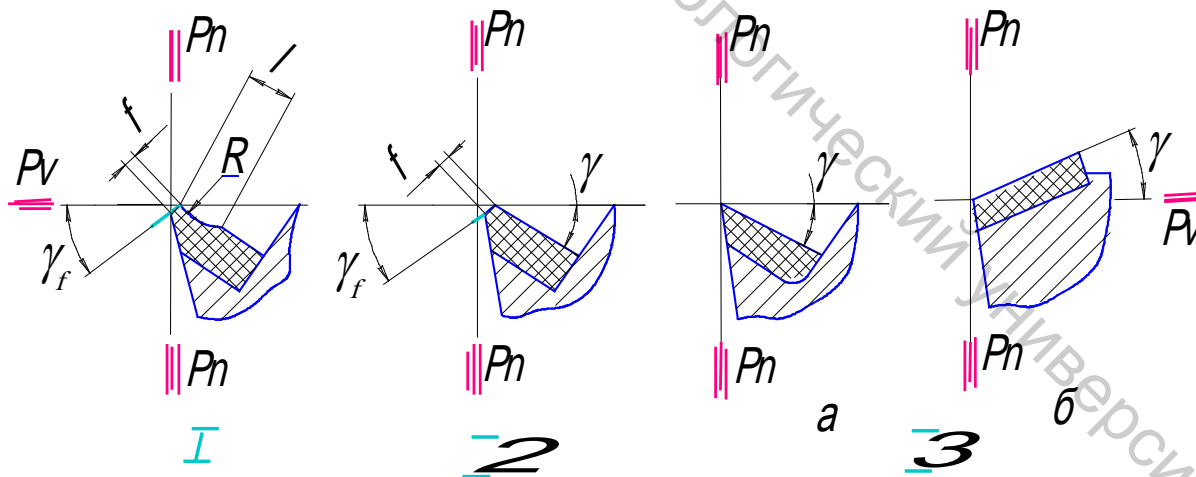


Рисунок 1.13 – Основные формы передней поверхности:
 I) криволинейная с фаской; II) плоская с фаской; III) плоская: а) с положительным углом γ ; б) с отрицательным углом γ

Все формы передней поверхности имеют области их эффективного применения:

Форма I – предназначена для резцов, обрабатывающих пластичные материалы с $\sigma_{в} \leq 80 \text{ кг/мм}^2$ при полустружковом режиме резания ($S < 0,3 \text{ мм/об}$). Выкружка радиусом R выполняет роль стружкозавивального элемента резца. Ее размеры $l = 2 \dots 2,5 \text{ мм}$, $R \approx 2l$. Для упрочнения режущей кромки имеется отрицательная фаска шириной $f = 0,2 \dots 0,5 \text{ мм}$ с углом наклона $\gamma_f = -(3 \dots 5)^\circ$.

Форма II – применяется в тех же случаях, что и форма I, а также для резцов, обрабатывающих хрупкие материалы, но при прерывистом резании и при обработке деталей, имеющих литейную корку. Обычно $\gamma = 8 \dots 15^\circ$.

Форма IIIa – предназначена для обработки хрупких материалов, а также для пластичных с $\sigma_{в} \leq 80 \text{ кг/мм}^2$ при чистовом режиме резания с малыми глубинами резания и подачами. Обычно $\gamma = 8 \dots 15^\circ$.

Форма IIIб – предназначена для обработки пластичных материалов с $\sigma_{в} > 80 \text{ кг/мм}^2$, в том числе и при прерывистом резании. Обычно $\gamma = (-5 \dots -10)^\circ$.

Для современного режущего инструмента (из твердых сплавов и режущей керамики), получаемого методами прессования порошковых материалов в виде сменных многогранных пластин (СМП), формы передней поверхности могут быть значительно сложнее (рис. 1.14). Такие формы позволяют обеспечивать в процессе резания стружкозавивание, стружкодробление (очень важно при работе на станках с ЧПУ), а также улучшение подвода СОЖ в зону контактирования со стружкой.

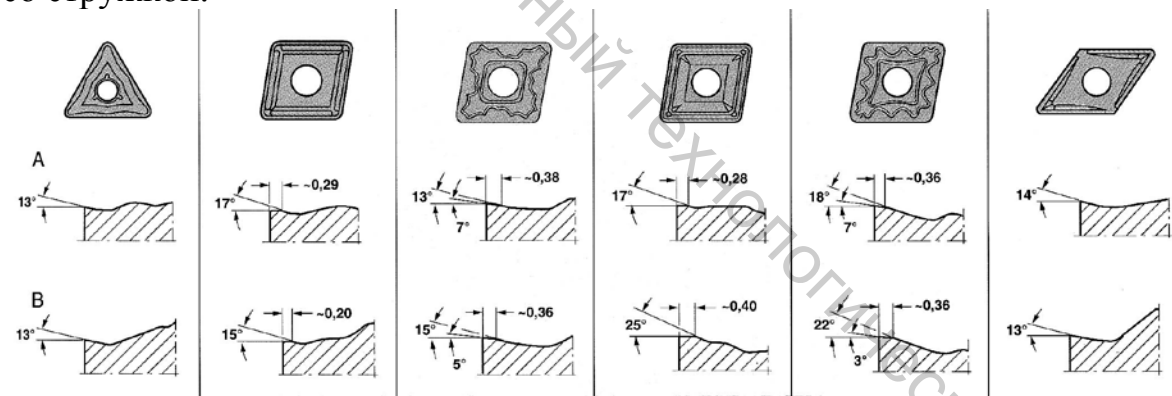


Рисунок 1.14 – Формы передней поверхности современных режущих пластин из твердых сплавов

Величина заднего угла α мало зависит от механических свойств материала обрабатываемой детали и определяется величиной подачи S . Обычно задний угол назначают в пределах $\alpha = 3 \dots 12^\circ$. СМП изготовленные с задним углом $\alpha = 0$ называются негативными, и положительное значение α получают путем наклона режущей пластины при установке и закреплении.

Величина главного (ϕ) и вспомогательного (ϕ_1) углов в плане зависит от назначения резца и жесткости технологической системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь). Обычно $\phi = 30 \dots 90^\circ$, а $\phi_1 = 5 \dots 30^\circ$.

Угол наклона главной режущей кромки λ зависит от материала инструмента и условий работы резца.

При непрерывном резании резцами из быстрорежущей стали при черновой обработке $\lambda = 0 \dots 4^\circ$, а при чистовой обработке $\lambda = 0 \dots (-4)^\circ$.

У резцов с пластинками твердого сплава угол λ всегда положительный $\lambda = 0 \dots 5^\circ$.

При прерывистом резании, независимо от рода инструментального материала, резцы имеют положительный угол наклона главной режущей кромки, величина которого лежит в пределах $\lambda = 10 \dots 30^\circ$.

Д *Переходная режущая кромка* – сопрягающая главную и вспомогательную режущую кромки, может быть в виде дуги или прямой линии (рис. 1.15).
Переходная режущая кромка позволяет значительно улучшить условия работы инструмента в районе вершины.

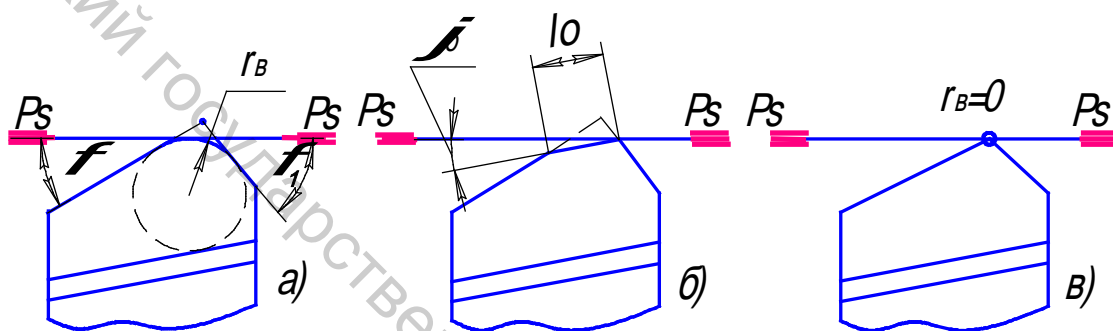


Рисунок 1.15 – Форма переходной режущей кромки:
а) в виде дуги– r_b ; б) в виде прямой линии– l_0 под углом– φ_0 ;
в) острозаточенный, $r_b=0$

Величину радиуса у вершины резцов из быстрорежущей стали назначают $r_b = 1 \dots 5$ мм, а твердых сплавов $r_b = 0,5 \dots 3$ мм. При I и II формах передней поверхности, радиус у вершины рассчитывают по формуле

$$r_b = \frac{f}{2 \sin^2 \left(\frac{\varphi + \varphi_1}{2} \right)}, \quad (1.1)$$

где f – ширина отрицательной фаски на передней поверхности.

Длина переходного лезвия l_0 находится в пределах $l_0 = 0,3 \dots 2$ мм, а переходной угол в плане для проходных, расточных и подрезных резцов $\varphi_0 = 15 \dots 20^\circ$, для отрезных резцов $\varphi_0 = 45^\circ$.

1.5 Рабочие углы инструмента

В процессе обработки, когда инструмент может быть закреплен на станке с погрешностями установки, а также когда реализуются движения инструмента и заготовки, рабочие (действительные) углы инструмента отличаются от углов полученных в результате заточки.

А. Изменение углов в результате движения подачи D_s .

При операции *отрезки* (рис. 1.16) необходимо учитывать главное движение D_r и движение подачи D_s . В этом случае основная плоскость P_{vk} строится перпендикулярно относительно вектора результирующей скорости V_e , т.е. поворачивается против часовой стрелки на угол η . Поэтому, рабочий передний угол γ_p будет больше, а рабочий задний угол α_p меньше углов заточки γ_3 и α_3 на угол η .

$$\gamma_p = \gamma_3 + \eta; \quad \alpha_p = \alpha_3 - \eta,$$

где η – угол скорости резания.

Угол скорости резания η можно определить из соотношения

$$\frac{S_0}{\pi \cdot D} = \operatorname{tg} \eta; \quad (1.2)$$

откуда

$$\eta = \operatorname{arctg} \frac{S_0}{\pi \cdot D}, \quad (1.3)$$

где S_0 – подача на 1 оборот детали, мм;

D – диаметр заготовки, мм.

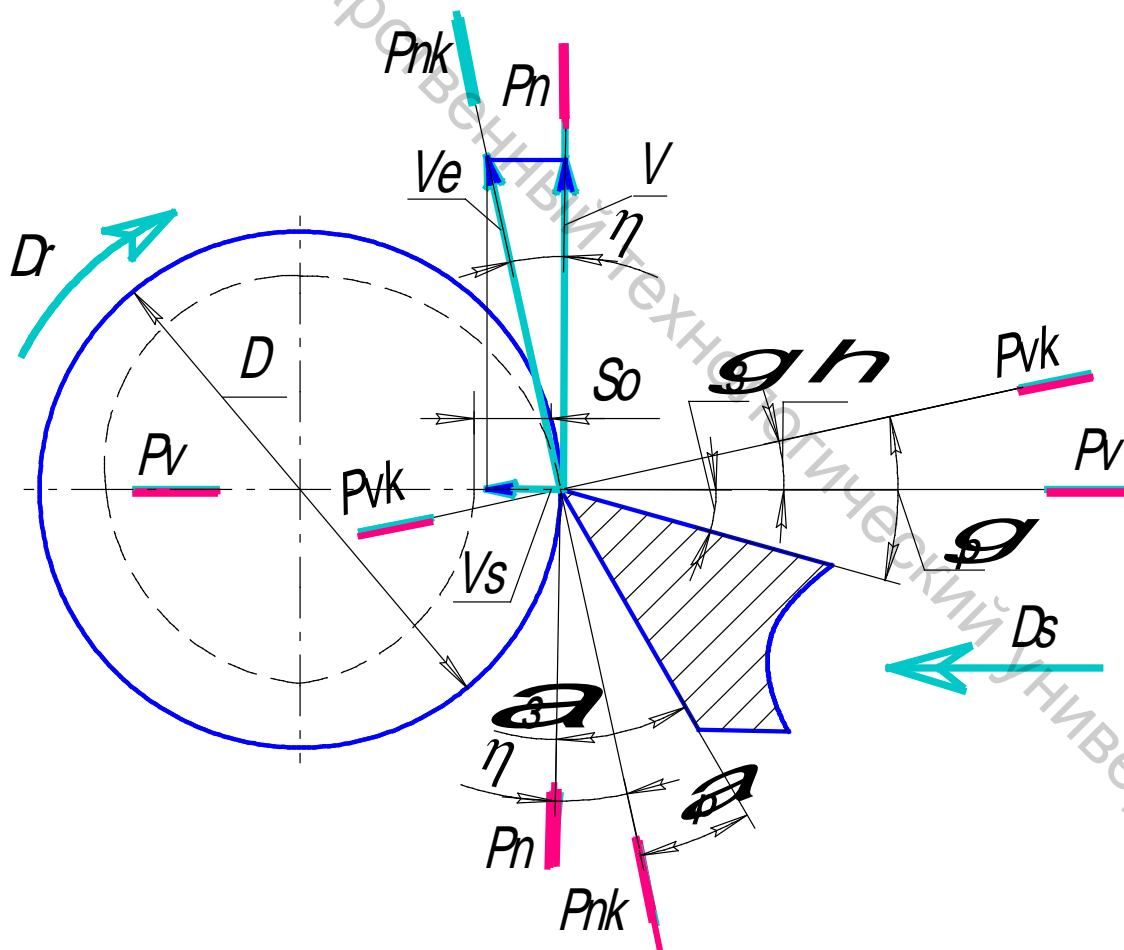


Рисунок 1.16 – Операция отрезки:

γ_p, α_p – рабочие кинематические передний и задний углы инструмента;
 γ_3, α_3 – передний и задний углы заточки инструмента

При продольном точении фасонной поверхности (рис. 1.17) происходит изменение направления движения подачи D_s . При этом изменяется положение рабочей поверхности P_s .

В результате этого поворота, рабочие кинематические углы в плане φ_p в каждой точке являются переменными. Причем по сравнению с поз. 1, в поз. 2 угол φ_p уменьшается, а φ_{1p} увеличивается, в поз. 3 угол φ_p увеличивается, а φ_{1p} уменьшается.

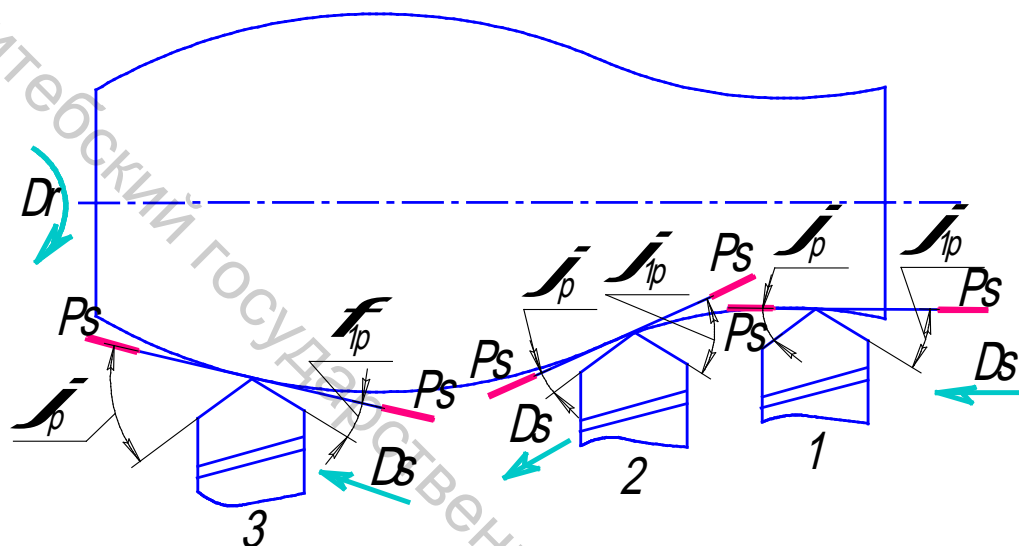


Рисунок 1.17 – Продольное точение фасонной поверхности

Б. Изменение углов в результате погрешности установки.

Иногда в результате погрешности установки инструмента вершина лезвия может быть расположена выше или ниже оси вращения заготовки (рис. 1.18). В этом случае также происходит изменение рабочих (действительных) углов по сравнению с углами инструмента, полученными после его заточки.

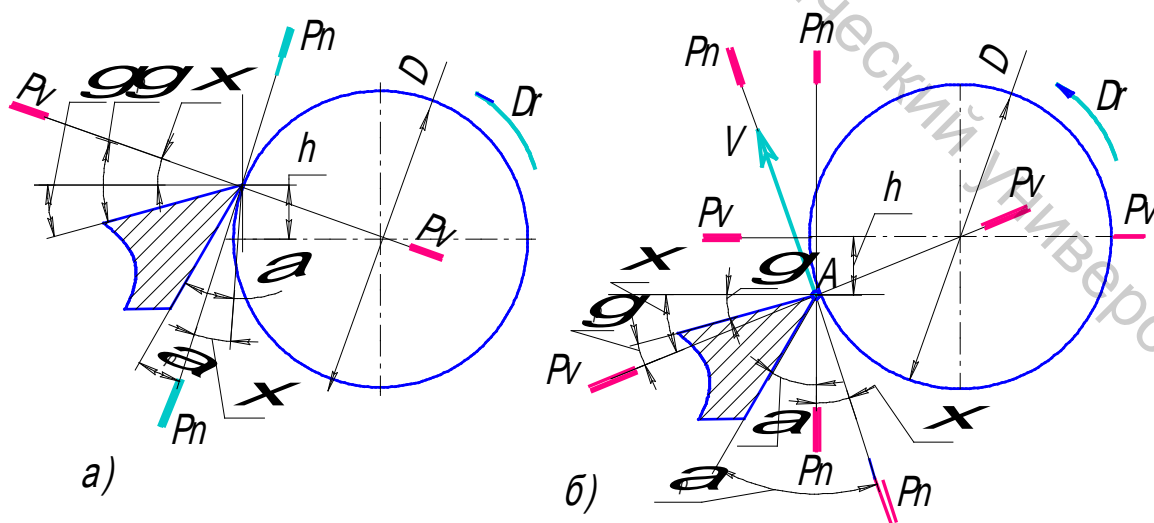


Рисунок 1.18 – Погрешность установки вершины лезвия относительно оси вращения заготовки:

а) выше центра; б) ниже центра

Для приведенных случаев угол погрешности установки вершины резца относительно центра оси вращения установки ξ можно рассчитать по формуле

$$\xi = \arcsin \frac{2h}{D}, \quad (1.4)$$

где h – погрешность установки вершины лезвия, мм;

D – диаметр заготовки, мм.

Тогда при установке вершины резца выше центра рабочие (действительные) углы можно определить по зависимости

$$\gamma_p = \gamma + \xi, \quad \alpha_p = \alpha - \xi, \quad (1.5)$$

а при установке ниже центра

$$\gamma_p = \gamma - \xi, \quad \alpha_p = \alpha + \xi. \quad (1.6)$$

В некоторых случаях резцы устанавливают не перпендикулярно оси вращения заготовки, изменяя тем самым значение углов в плане φ и φ_1 .

На рис. 1.19 показано изменение рабочих углов в плане при закреплении резца с углом погрешности ξ , значения которых можно рассчитать по формулам:

$$\varphi_p = \varphi - \xi, \quad \varphi_{1p} = \varphi_1 + \xi. \quad (1.7)$$

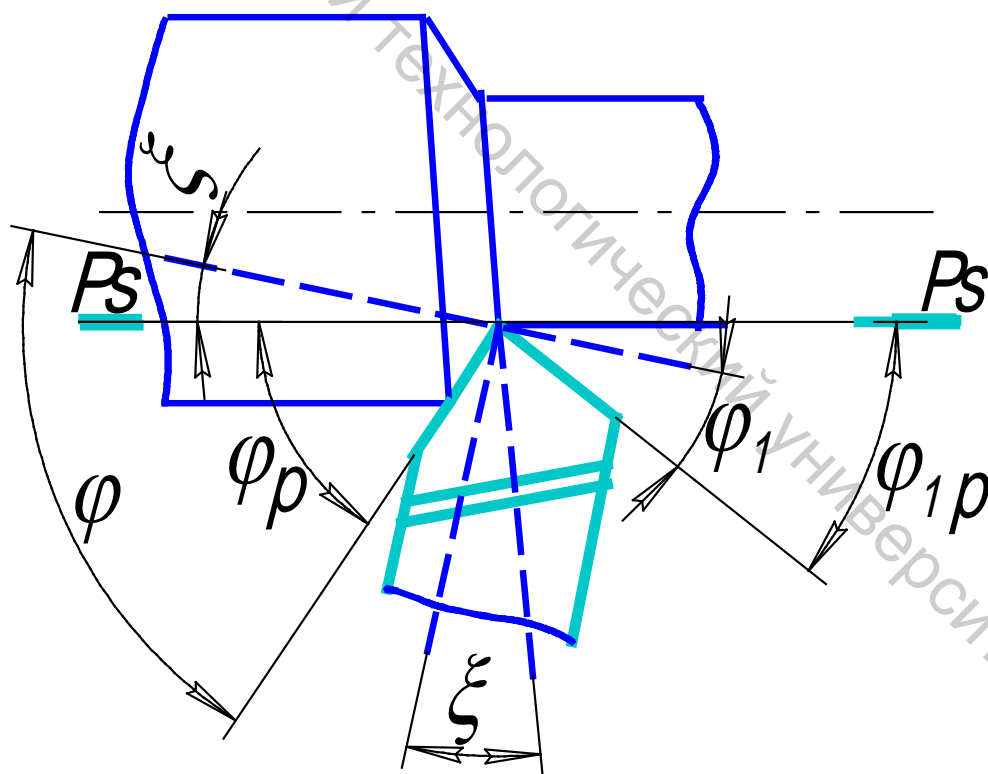


Рисунок 1.19 – Схема изменения углов φ и φ_1 в зависимости от установки резца относительно оси заготовки

1.6 Классификация основных видов резания

Разнообразие способов обработки резанием, конструкций и геометрии инструментов, широкие пределы изменения режимов резания обуславливают практически бесконечное число возможных комбинаций условий резания. Однако все они могут быть сведены к сравнительно небольшому числу основных случаев работы режущего лезвия. Их классификация может быть проведена по следующим признакам.

1. По форме и количеству участков режущих кромок:

а) **свободное резание** – если в работе участвует только одна прямолинейная режущая кромка АВ (рис. 1.20). В данном случае процессы пластического деформирования стружки можно рассматривать как процесс плоского деформирования в любой точке режущей кромки.

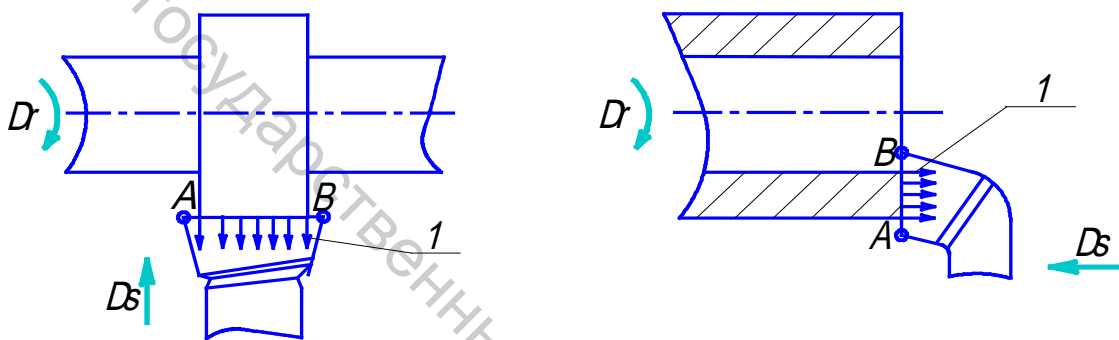


Рисунок 1.20 – Схема свободного резания:
1 – направление движения стружки

б) **несвободное резание** – если в работе участвуют две (АО и ОВ) и более сопряженных режущих кромок (рис. 1.21). В данном случае наблюдаются сложные деформационные процессы при образовании стружки, так как здесь отдельные элементы стремятся передвигаться по передней поверхности в различных направлениях.

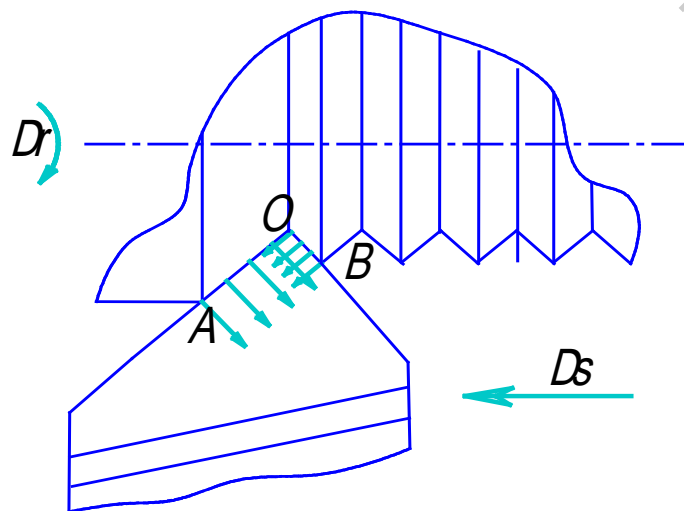


Рисунок 1.21 – Схема несвободного резания

2. По ориентации режущей кромки относительно вектора скорости резания V (рис. 1.22):

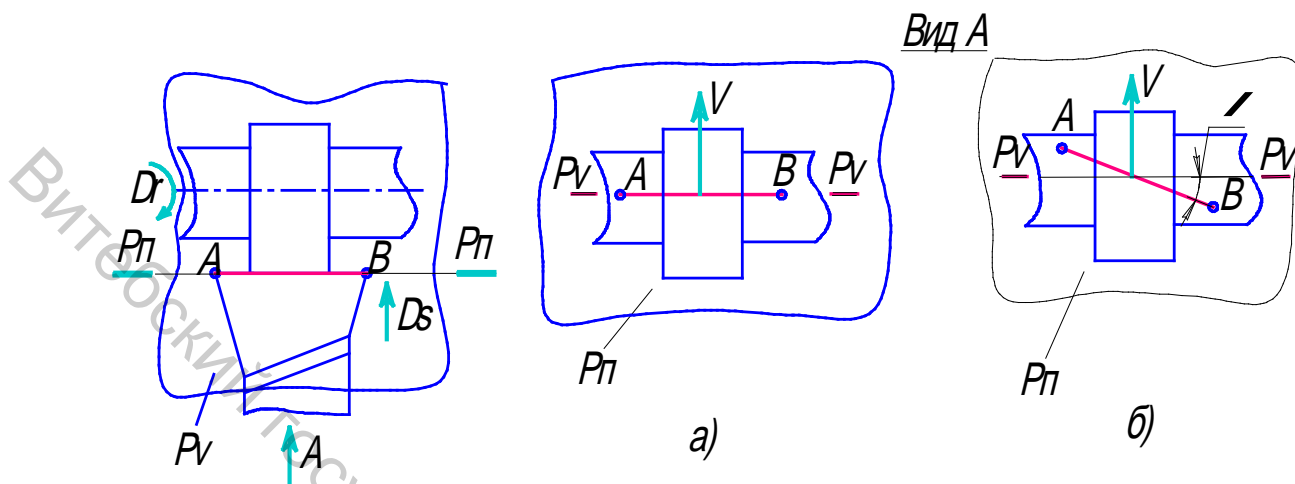


Рисунок 1.22 – Схемы резания:

на виде А, схемы (а) и (б), резец убран; АВ – главная режущая кромка;

а) прямоугольная схема резания; б) косоугольная схема резания

а) **прямоугольное резание**, происходит, если вектор скорости резания V перпендикулярен режущей кромке АВ;

б) **косоугольное резание**, происходит, если вектор скорости резания V не перпендикулярен режущей кромке АВ. Так как расположение режущей кромки АВ рассматривается в плоскости резания P_n , то угол отклонения режущей кромки АВ от перпендикуляра к вектору скорости резания V будет равным углу наклона главной режущей кромки λ .

3. По количеству одновременно участвующих в работе лезвий – **одно-** и **многолезвийное**. К первому виду относятся точение и строгание; ко второму – сверление, фрезерование и т.д.

4. По форме сечения среза – с **постоянным** и **переменным сечениями**. К первому виду относятся точение и сверление; ко второму – фрезерование.

5. По времени и условиям контактирования режущего лезвия с заготовкой – **непрерывное**, **прерывистое** и **нестационарное** резание. Первый вид характеризуется **непрерывным** контактом рабочих поверхностей лезвия с заготовкой при постоянных условиях резания. **Прерывистый** процесс резания осуществляется путем периодического повторения цикла (резание – отдых) лезвия (рис. 1.23, а).

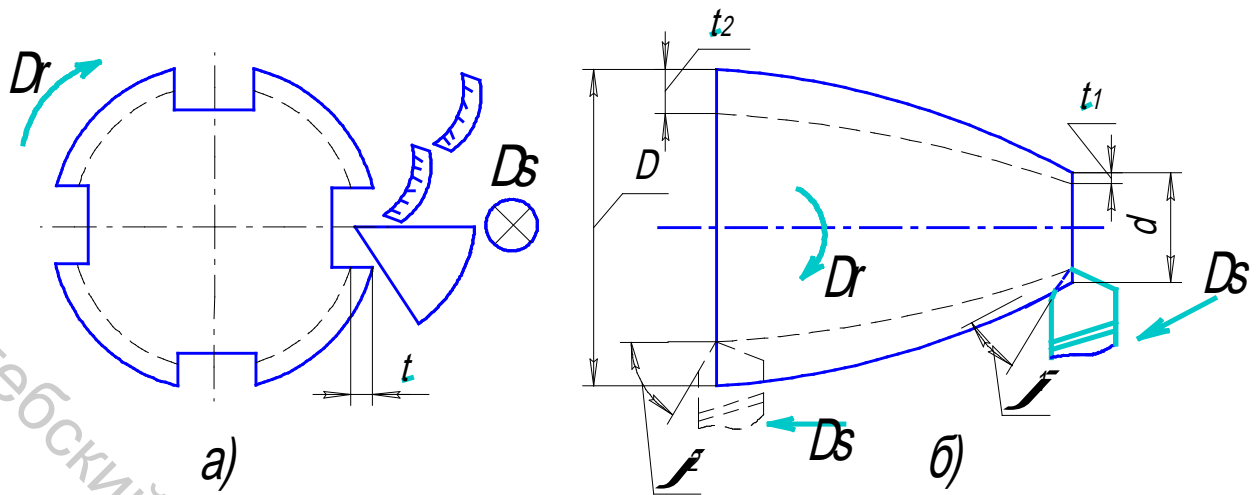


Рисунок 1.23 – Схемы резания:
 а) прерывистое резание; б) нестационарное резание

Обработка поверхностей на станках с ЧПУ (числовым программным управлением) при непрерывном и одновременном изменении нескольких параметров (диаметра D , глубины t , скорости V и углов в плане φ и φ_1) называется **нестационарным резанием** (рис. 1.23, б).

1.7 Элементы резания и размеры срезаемого слоя при продольном точении

На обрабатываемой заготовке при снятии стружки различают три поверхности: **обрабатываемую**, которая частично или полностью удаляется при обработке; **обработанную**, образованную на заготовке в результате обработки; **поверхность резания**, образуемую режущей кромкой в результирующем движении резания. Поверхность резания является переходной между обрабатываемой и обработанной поверхностями (рис. 1.24).

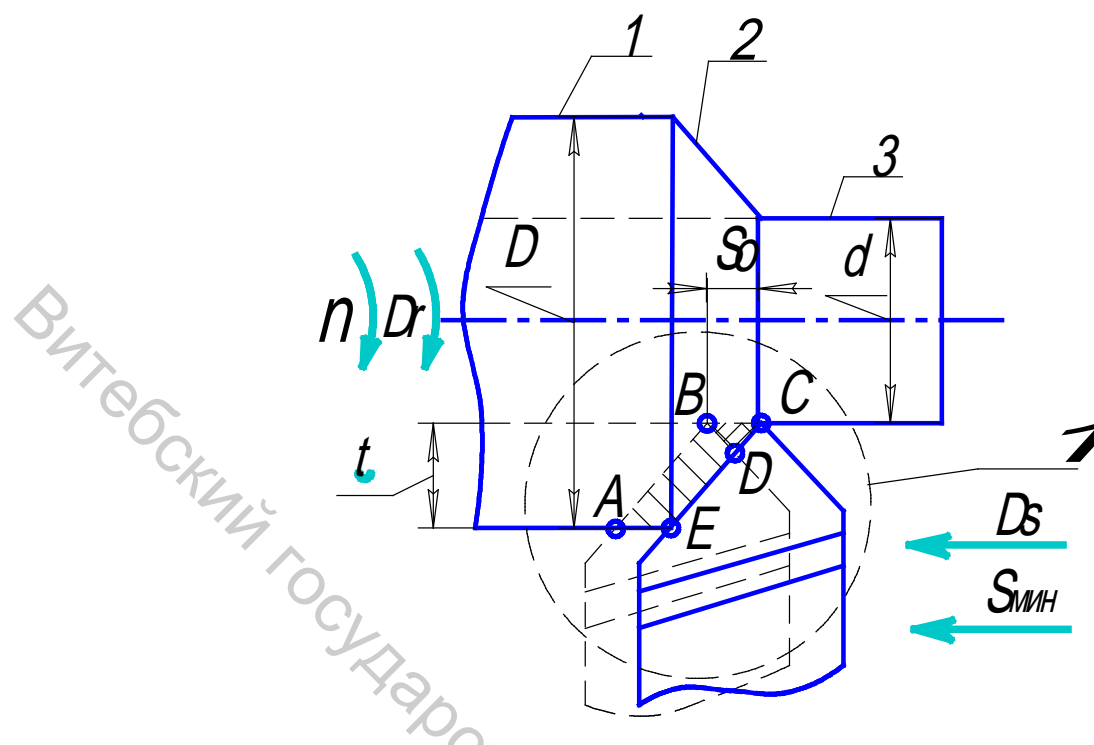


Рисунок 1.24 – Продольное точение:

1– обрабатываемая поверхность; 2– поверхность резания; 3– обработанная поверхность

При продольном точении различают два движения (рис. 1.24):

- **главное движение** D_r – это равномерное вращательное движение заготовки с числом оборотов n [об/мин];
- **движение подачи** D_s – это равномерное поступательное движение резца вдоль оси детали со скоростью $S_{\text{мин}}$ [мм/мин] (минутная подача резца).

Путь, проходимый резцом вдоль оси детали за один ее оборот, называется подачей на один оборот – S_0 [мм/об]. Эта подача рассчитывается по формуле

$$S_0 = \frac{S_{\text{мин}}}{n} = \left[\frac{\text{мм}}{\text{мин}} \cdot \frac{\text{мин}}{\text{об}} \right] = \left[\frac{\text{мм}}{\text{об}} \right]. \quad (1.8)$$

Подача инструмента направленная вдоль оси детали называется продольной подачей $S_{\text{пр}}$.

Скорость резания V численно равна окружной скорости вращения точки E детали, расположенной на диаметре D обрабатываемой поверхности (рис 1.24).

Скорость резания рассчитывают по формуле

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}, \text{ [м/мин]}. \quad (1.9)$$

Под **глубиной резания** t понимают размер слоя, удаляемого с обрабатываемой поверхности за один проход инструмента, измеренный по нормали к направлению подачи. Глубину резания определяют по формуле

$$t = \frac{D-d}{2}, [\text{мм}], \quad (1.10)$$

где D – диаметр обрабатываемой поверхности;
 d – диаметр обработанной поверхности.

При отрезке глубина резания равна ширине реза (рис. 1.25), а подача, направленная перпендикулярно оси вращения детали, называется **поперечной подачей** $S_{\text{поп}}$.

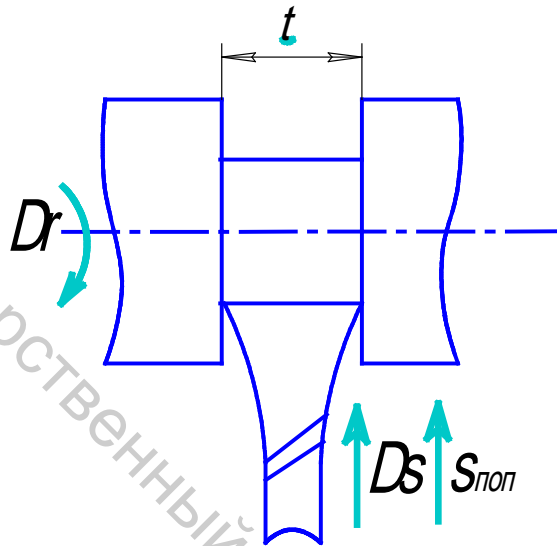


Рисунок 1.25 – Точение при отрезке:
 t – глубина резания при отрезке

Для более детального изучения элементов сечения среза рассмотрим зону I (приведенную на рис. 1.24) в более увеличенном изображении, представленном на рис. 1.26.

Параллелограмм $ABCE$ называется площадью сечения срезаемого слоя f .

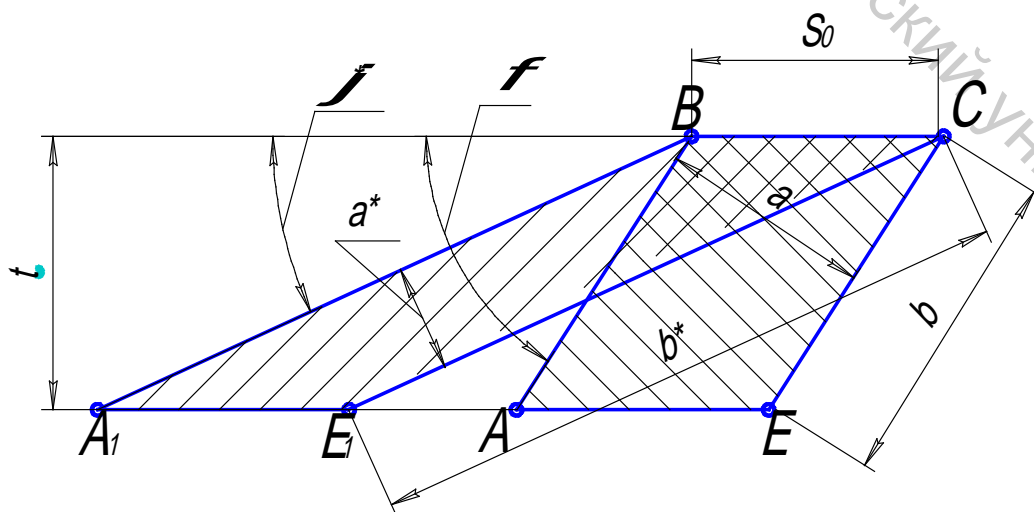


Рисунок 1.26 – Элементы сечения среза
 f – площадь сечения срезаемого слоя

При резании различают *технологические размеры* срезаемого слоя (глубина резания t , подача на 1 оборот детали S_0) и *физические размеры* срезаемого слоя (ширина срезаемого слоя b , толщина срезаемого слоя a).

Физические и технологические размеры срезаемого слоя связаны соотношениями:

$$a = S_0 \cdot \sin \varphi, \quad b = \frac{t}{\sin \varphi}. \quad (1.11)$$

При одних и тех же технологических параметрах S_0 и t размеры срезаемого слоя a и b зависят от главного угла в плане φ (рис. 1.26). При уменьшении угла в плане φ' отношение ширины среза b' к толщине среза a' (b'/a') увеличивается, несмотря на то, что площадь сечения среза f остается той же.

Физические размеры дают лучшее представление о форме срезаемого слоя, нежели технологические, а также позволяют точнее оценивать физические процессы, происходящие при резании.

Еще раз рассмотрим зону площади сечения срезаемого слоя с учетом продольного перемещения инструмента за каждый оборот детали (рис. 1.27).

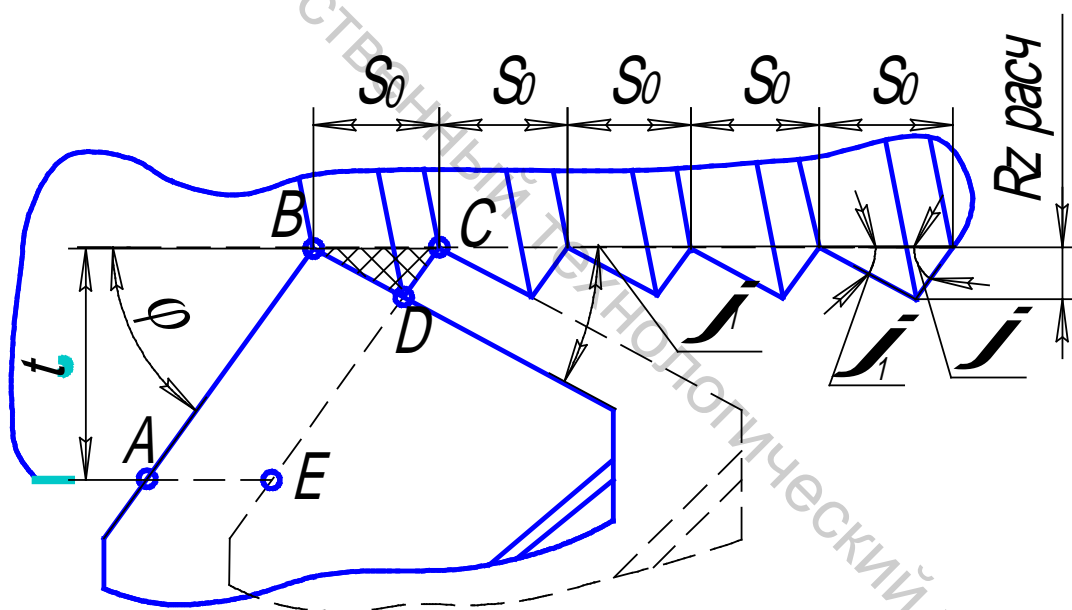


Рисунок 1.27 – Схема формирования остаточного рельефа на обработанной поверхности

Из рис. 1.27 видно, что не весь металл, перекрываемый площадью сечения срезаемого слоя $ABCE$ удаляется в стружку, часть его в виде остаточных гребешков площадью BDC остается на обработанной поверхности. В связи с этим различают:

- *номинальное сечение среза* (площадь $ABCE$);
- *действительное сечение среза* (площадь $ABDE$), удаляемое резцом (в виде стружки);

- *остаточное сечение среза* (площадь BCD), которое остается на обработанной поверхности детали и в дальнейшем в основном определяет ее шероховатость $R_{z\text{расч}}$.

Если резец имеет не остроконечную вершину лезвия, а округление радиусом r_b , то формирование остаточного сечения среза будет происходить по схеме, приведенной на рис. 1.28.

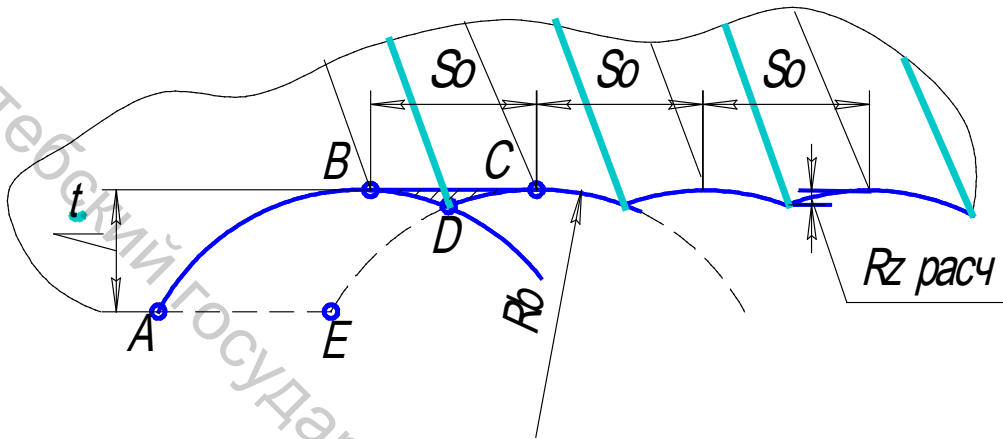


Рисунок 1.28 – Схема формирования остаточного рельефа на обработанной поверхности резцом с радиусом при вершине R_b

Высоту остаточных гребешков $R_{z\text{расч}}$ можно рассчитать по формулам:

- для резца с острой вершиной (рис. 1.27)

$$R_{z\text{расч}} = \frac{S_0}{(\text{ctg } \varphi + \text{ctg } \varphi_1)}; \quad (1.12)$$

- для резца с закругленной вершиной (имеется радиус при вершине резца r_b) (рис. 1.28)

$$R_{z\text{расч}} = \frac{S_0}{8 \cdot r_b}. \quad (1.13)$$

Из приведенных схем формирования остаточного рельефа и формул расчета высоты остаточного сечения среза можно сделать вывод о том, что чем больше подача S_0 , главный φ и вспомогательный φ_1 углы в плане и меньше радиус при вершине r_b , тем высота неровностей $R_{z\text{расч}}$ больше, т.е. шероховатость обработанной поверхности выше.

1.8 Материалы для режущих инструментов

В основу режущих инструментов положен режущий клин, состоящий из двух поверхностей, сходящихся в острую кромку. При перемещении клина относительно обрабатываемого материала он давит на заготовку и разделяет ее на две неравные части, меньшая из которых деформируется и превращается в

стружку. Режущий клин при работе подвергается истиранию, тепловым воздействиям и силовым нагрузкам. Внедрение клина в заготовку возможно лишь при преобладающей прочности материала клина. Материалы для режущих инструментов подразделяются на следующие основные группы: инструментальные стали; твердые сплавы; минералокерамика и керметы, сверхтвердые материалы. Инструментальные стали в зависимости от химического состава делятся на углеродистые, легированные и быстрорежущие. По твердости в холодном состоянии все эти стали мало отличаются друг от друга, основное их отличие в теплостойкости. Углеродистые стали (У10А, У12А и др.) имеют низкую теплостойкость – до 200...250°C. У легированных сталей (имеют около 1% легирующих элементов: вольфрама, хрома, ванадия и др.) – большая теплостойкость – до 300°C (марки 9ХС, ХВГ, Х6ВФ и др.). Углеродистые и легированные стали применяются для изготовления инструментов, работающих с малыми скоростями резания: плашки, метчики, развертки и слесарные инструменты. Быстрорежущие стали имеют содержание вольфрама до 6...18% и большое количество легирующих элементов: Р – вольфрам, К – кобальт, М – молибден, Ф – ванадий и др. Быстрорежущие стали умеренной теплостойкости – до 620...630 °С (марки Р9К10, Р9М4К8, Р18Ф2К8М и др.) – предназначены для обработки труднообрабатываемых материалов: жаропрочных и титановых сплавов, нержавеющей сталей и др. Стали с высокими теплостойкостью (до 700...730°C) и твердостью (до 68...69 HRC) легированы большим количеством кобальта (до 16...25%), вольфрама (до 11...20%) и молибдена (до 4...7%). Эти стали (марки В18М7К25, В14М7К25 и др.) используются при резании труднообрабатываемых материалов. Твердые сплавы изготавливаются методом порошковой металлургии. Основными компонентами твердых сплавов являются карбиды вольфрама, титана и тантала, а в качестве связки используются кобальт, никель, молибден. Теплостойкость твердых сплавов различных марок составляет 800...1000°C, твердость – до 86...90 HRC, прочность при сжатии – до 3,5 ГПа, прочность при изгибе – до 1,8 ГПа. Инструменты из твердых сплавов работают на высоких скоростях резания. В зависимости от состава карбидной фазы твердые сплавы делятся на четыре группы: однокарбидные (группа ВК), двухкарбидные (группа ТК), трехкарбидные (группа ТТК) и безвольфрамовые (группа ТН). Сплавы группы ВК содержат карбид вольфрама и кобальт, являющийся своеобразной связкой. Марки ВК3, ВК4 (96% WC и 4% Co) имеют высокую твердость, но более хрупкие, используются для чистовой обработки, а сплавы (ВК8, ВК10) с большим содержанием кобальта, как наиболее вязкие, применяются при черновой обработке материалов. Физико-механические свойства твердых сплавов во многом определяются размером зерен порошков, применяемых для спекания. Большой износостойкостью обладают мелкозернистые (ВК-М и др.) и особо мелкозернистые (ВК6-ОМ, ВК10-ОМ и др.) сплавы, которые для повышения режущих свойств зачастую легируются хромом (ВК6-ХОМ, ВК15-ХОМ и др.). Двухкарбидные твердые сплавы содержат карбиды вольфрама, титана и кобальта, например, сплав марки Т30К4 содержит 30% TiC, 4% Co и 66% WC. Сплавы группы ТК имеют большую твердость и хруп-

кость, поэтому применяются при получистой и чистовой обработке высоко-твердых материалов. Трехкарбидные сплавы дополнительно содержат карбид тантала TaC. Например, сплав ТТ20К9 содержит 20% (TiC + TaC) + 9%Co + 71%WC. Сплавы группы ТК превосходят двухкарбидные по прочности, обладают высокой износостойкостью, хорошо сопротивляются ударным нагрузкам и вибрациям, поэтому их используют при строгании, фрезеровании и черновой обработке с большими сечениями срезаемого слоя. Безвольфрамовые твердые сплавы явились следствием дефицита вольфрама и содержат в своем составе карбид или карбонитрид титана и тугоплавкие связи (обычно никельмолибденовые). Безвольфрамовые сплавы (марки КНТ-16, ТН 20, ТН 30 и др.) имеют более низкую прочность, теплопроводность, склонны к разупрочнению при повышенных температурах, но имеют и ряд положительных свойств: низкий коэффициент трения, пониженную склонность к адгезивному взаимодействию с обрабатываемым материалом. Их применяют при обработке конструкционных и малолегированных сталей и чугунов, а также некоторых цветных металлов. Режущие инструменты, оснащенные минералокерамикой, обладают высокими твердостью (92...94 НРА), теплостойкостью (до 1200°C) и износоустойчивостью. Наибольшее распространение получила керамика оксидного и оксидно-карбидного типов. Оксидная керамика содержит до 99% Al₂O₃ (например, марка ЦМ 332). Ее используют только для чистовой и получистой обработки материалов на виброустойчивых станках. Оксидно-карбидная керамика получается добавлением к основе (Al₂O₃) одинарных и сложных карбидов титана, вольфрама и молибдена (до 40%). Выпускаются керамики марок ВЗ, ВОК-60, ВОК-63 в виде пластин, которые крепятся к корпусу инструмента. К группе сверхтвердых материалов относятся естественные и искусственные алмазы и нитрид бора. Твердость алмаза составляет порядка 100 ГПа, он обладает высокой износостойкостью, малым коэффициентом трения, хорошей теплопроводностью, однако имеет относительно низкую теплостойкость (800°C) и большую хрупкость ($\sigma_{п} = 0,3...0,6$ ГПа). В качестве синтетических алмазов используют поликристаллы марок баллас, карбонадо, карболит (по твердости они близки твердости природных алмазов, а по прочности на изгиб в 2 - 3 раза превосходят их). Инструменты из синтетических алмазов показывают высокие режущие свойства при обработке титановых сплавов, высококремнистых алюминиевых сплавов, медных сплавов, стеклопластиков, композиционных материалов, минералокерамики и других материалов. Для обработки сталей алмазные инструменты непригодны ввиду высокой химической активности, которая приводит к интенсивному износу инструмента. На основе синтетических алмазов выпускают композиционные материалы, например, пластины марок АТП (алмазно-твердосплавные), БПА (биластины алмазные). Кубический нитрид бора (КНБ) – синтетический материал, по твердости (90 ГПа) близкий к твердости алмаза, а по теплостойкости (1500°C) значительно превосходящий все инструментальные материалы. КНБ химически нейтрален к железу и углеродистым сплавам. Промышленностью выпускается целая гамма композитов на основе КНБ: Эльбор-Р, гексинит, белбор и др. Они синтезируются в виде цилиндрических столбиков

диаметром 4...8 мм и высотой 3...6 мм. Основное применение режущие инструменты на основе КНБ нашли при обработке сталей и чугунов различной твердости, причем зачастую не требуется операция последующего шлифования.

К одному из видов резания относится абразивная обработка материалов: разрезка очень твердых материалов; зачистка сварных швов; заточка лезвийных режущих инструментов; шлифование, хонингование, притирка, полирование и др. Для изготовления абразивных инструментов используются частицы материалов различной зернистости, обладающие высокой твердостью и способностью резания. Абразивные инструменты бывают со связанными зёрнами (шлифовальные круги, головки, бруски, ленты) и в виде несвязанных – свободных зёрен (пасты, суспензии, порошки). Для изготовления абразивных инструментов используют главным образом искусственные абразивные материалы: электрокорунд, карбид кремния, карбид бора, синтетические алмазы, кубический нитрид бора. Основная составляющая электрокорунда – кристаллический оксид алюминия Al_2O_3 (микротвердость 18,6...23 ГПа, плотность (3,93...4,01 г/см³). Существует несколько разновидностей электрокорунда, отличающихся режущими свойствами, прочностью и размером зёрен. Карбид кремния SiC обладает более высокой твердостью (до 32...35 ГПа), но имеет высокую хрупкость и малую прочность, поэтому применяется для обработки хрупких материалов – чугунов, бронзы, титановых и тугоплавких сплавов, заточки твердосплавных инструментов. Карбид бора B₄C имеет высокую твердость (39...44 ГПа), большую хрупкость и применяется в виде порошков для доводочных процессов и при ультразвуковой обработке хрупких материалов. Для изготовления абразивных инструментов также используются синтетические алмазы и кубический нитрид бора. По зернистости абразивные материалы подразделяются на четыре группы: шлифзерна, шлифпорошки, микропорошки и тонкие микропорошки, которые в свою очередь тщательно подразделяются по номерам зернистости в зависимости от назначения абразивного материала. Эффективность работы абразивных зёрен очень сильно зависит от связующего вещества: неорганические (керамическое, магнезиальное, силикатное), органические (бакелитовое, глифталевое, вулканическое), металлические (порошки олова, меди, алюминия + наполнители).

1.9 Источники образования тепла и распределение тепла между стружкой, инструментом и деталью

Опытами П. А. Ребиндера и Г. И. Епифанова установлено, что при резании конструкционных материалов более 99,5% работы резания переходит в тепло. Таким образом, если работа резания или любая ее составляющая E_i выражена в кгс-м/мин, то соответствующее им количество выделяемого тепла

$$Q_i = \frac{E_i}{427}, \text{ ккал/мин.} \quad (1.14)$$

На основании этого количество тепла, образующегося при резании, можно определить с помощью выражения

$$Q = Q_d + Q_{тп} + Q_{тз} \cdot \quad (1.15)$$

Расположение источников тепла представлено на рис. 1.29. Тепло деформации Q_d образуется в зоне сдвигов на условной плоскости сдвига; тепло трения $Q_{тп}$ на передней поверхности — в пределах площадки контакта между стружкой и инструментом шириной C_1 ; тепло трения $Q_{тз}$ на задней поверхности — в пределах площадки контакта между поверхностью резания и инструментом шириной C_2 .

Образовавшееся тепло распространяется из очагов теплообразования к более холодным областям, распределяясь между стружкой, деталью и инструментом. Между стружкой, деталью и инструментом устанавливаются следующие тепловые потоки (рис. 1.30).

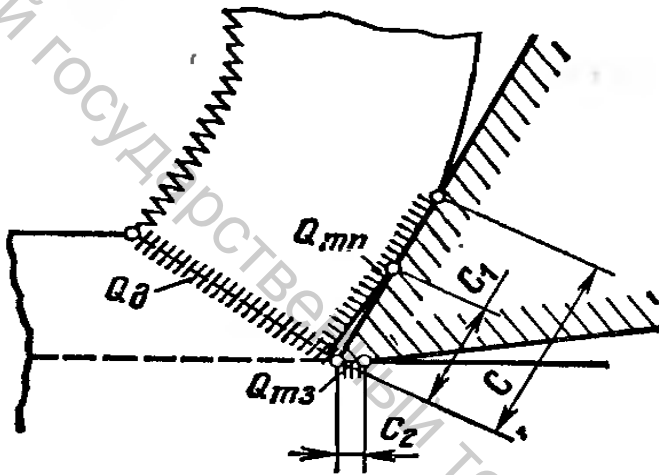


Рисунок 1.29 – Источники образования тепла в зоне резания

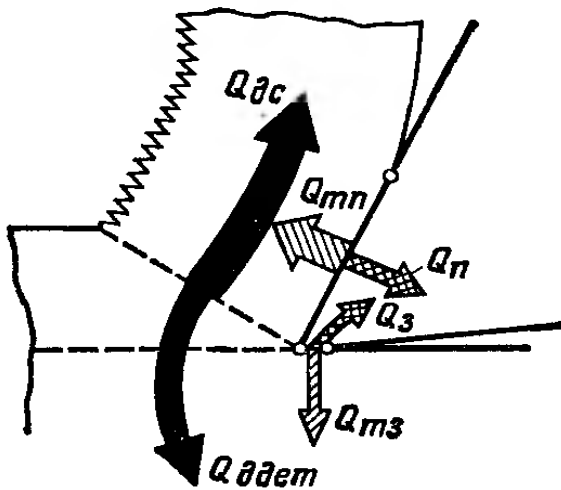


Рисунок 1.30 – Потоки тепла в стружку, инструмент и деталь

Часть тепла деформации Q_{dc} от условной плоскости сдвига переходит в стружку. Из зоны трения на передней поверхности в стружку переходит часть тепла трения, равная $Q_{tp} - Q_{п}$, где $Q_{п}$ — тепло, уходящее в инструмент. Таким образом, температура стружки определяется суммарным тепловым потоком:

$$Q_c = Q_{дс} + Q_{ТП} + Q_{п} \quad (1.16)$$

Часть тепла деформации $Q_{д.дет}$ от условной плоскости сдвига переходит в деталь. Туда же из зоны трения на задней поверхности переходит часть тепла трения, равная $Q_{тз} - Q_з$, где $Q_з$ — тепло, уходящее в инструмент. В результате этого интенсивность теплового потока в деталь

$$Q_{дет} = Q_{д.дет} + Q_{тз} + Q_з \quad (1.17)$$

Температурное поле режущего клина инструмента устанавливается в результате действия суммарного теплового потока $Q_{и}$ с интенсивностью

$$Q_{и} = Q_{п} + Q_з \quad (1.18)$$

На основании этого можно написать выражение, описывающее расход образовавшегося при резании тепла:

$$Q = Q_c + Q_{дет} + Q_{и} + Q_{ср}, \quad (1.19)$$

где $Q_{ср}$ — количество тепла, уходящего в окружающую среду.

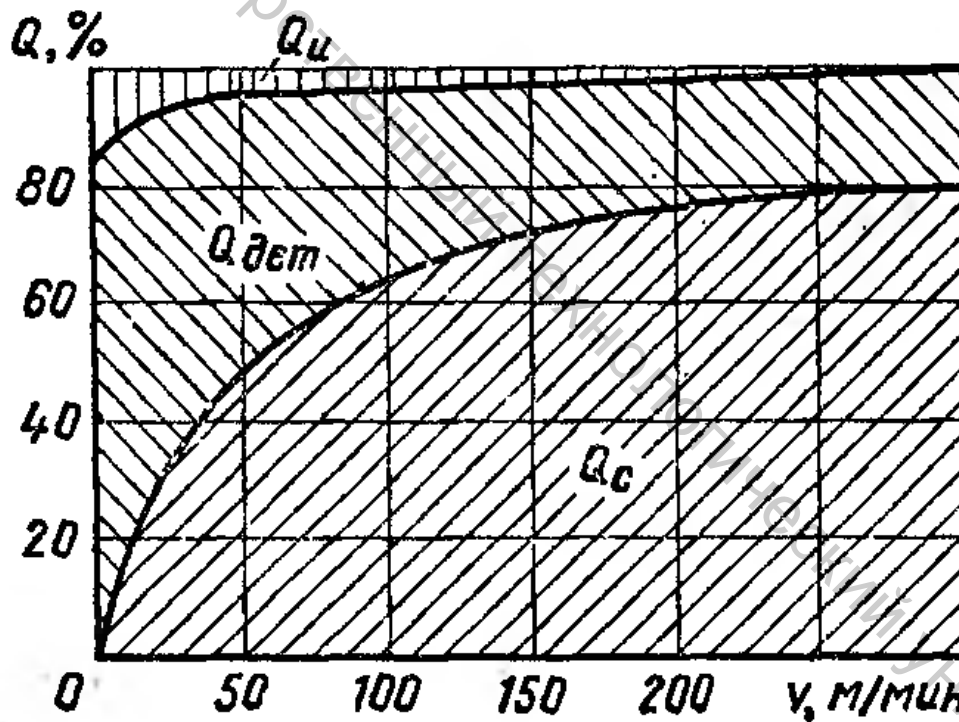


Рисунок 1.31 – Распределение тепла Q между стружкой, инструментом и деталью при точении резцом из твёрдого сплава Т60К6 ($t = 1,5$ мм; $s = 0,12$ мм/об)

1.10 Режимы резания

При установлении режимов резания учитывается характер обработки, тип материала инструмента, его геометрические параметры, материал и состояние заготовки, тип оборудования и другие факторы.

Расчёт режимов чаще всего ведётся по следующей схеме $t \rightarrow S \rightarrow V - P$, т.е. устанавливается глубина резания (t) подача (S), определяется скорость резания (V) и сила резания (P), по которой рассчитывается необходимая мощность станка.

Глубина резания при черновой обработке назначается по возможности максимальной (чаще всего равную всему припуску на обработку), а при чистовой – в зависимости от требований точности размеров и шероховатости обработанной поверхности.

Подача при черновой обработке выбирается максимально возможной, исходя из жесткости и прочности системы: станок-приспособление-инструмент-деталь, мощности станка, прочности режущей части инструмента и других ограничивающих факторов. При чистовой обработке принимается во внимание требуемая степень точности и шероховатости обработанной поверхности.

Скорость и силы резания рассчитываются по эмпирическим формулам, устанавливаемым для каждого вида обработки. Значения коэффициентов и показателей степени, содержащихся в этих формулах даны в справочной литературе.

1.10.1 Точение

Точение (токарная обработка) – наиболее распространённый метод обработки поверхностей деталей типа тел вращения на токарных станках. Основные виды токарных работ: обработка наружных цилиндрических и конических поверхностей, обработка пазов и ступов, вытачивание пазов и канавок, отрезка заготовок, сверление, зенкерование, развёртывание, нарезание резьб, обработка фасонных поверхностей, накатывание рифлений и др. На рис.1.32 приведена технологическая схема точения.

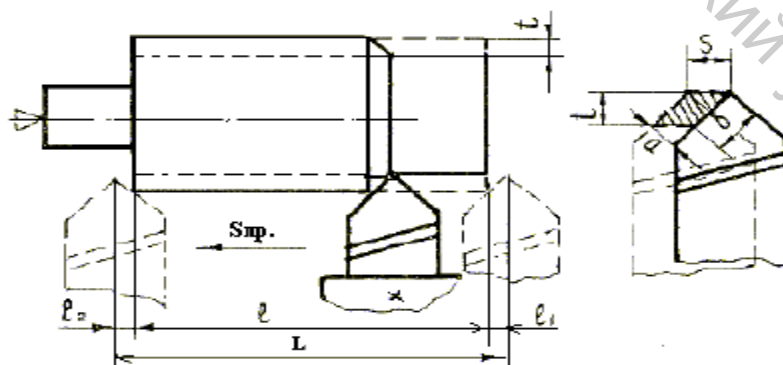


Рисунок 1.32 – Технологическая схема точения

Вращательное движение заготовки называется главным движением резания, а поступательное движение режущего инструмента – движением подачи.

Подачей (мм/об) называется (рис.1.32) путь, пройденный режущей кромкой инструмента относительно вращающейся заготовки. Подача может быть продольной, если инструмент перемещается параллельно оси вращения заготовки, и поперечной, если инструмент перемещается перпендикулярно этой оси.

Подачи при чистовом точении выбираются в зависимости от требуемых параметров шероховатости обработанной поверхности и радиуса при вершине резца.

При прорезании пазов и отрезании величина поперечной подачи зависит от свойств обрабатываемого материала, размеров паза и диаметра заготовки.

Выборную подачу необходимо скорректировать по паспорту станка, приняв ближайшую меньшую ступень и выдержав условие: $S_{ст} \leq S$.

Глубина резания t (мм) определяется (рис.1.32) толщиной снимаемого слоя за один рабочий ход резца, измеренной по перпендикуляру к обрабатываемой поверхности детали.

При черновом точении и отсутствии ограничений по мощности станка величина t принимается равной припуску на обработку (h); при чистовом точении припуск снимается за два и более проходов, на каждом последующем проходе глубина резания устанавливается меньше, чем при предшествующем. При параметрах шероховатости обработанной поверхности $Ra=3,2$ мкм включительно $t=0,5-2,0$ мм; при $Ra 0,8$ мкм, $t=0,1-0,4$ мм.

При отрезке и прорезке глубиной резания является ширина главной режущей кромки, которую можно определить из выражения: $b=0,6 D 0,5$ мм, где D – диаметр отрезаемой детали.

Скорость резания V_p (м/мин) зависит от конкретных условий обработки. На её величину оказывают существенное влияние следующие факторы: стойкость инструмента, физико-механические свойства обрабатываемого материала, подача и глубина резания, геометрические параметры режущего инструмента, наличие смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), температура в зоне контакта инструмента и детали, допустимый износ инструмента и др. При наружном продольном и поперечном точении, а также при растачивании расчётная скорость резания определяется по эмпирической формуле

$$V_p = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v, \quad (1.20)$$

а при отрезании, прорезании и фасонном точении – по формуле

$$V_p = \frac{C_v}{T^n S^y} K_v, \quad (1.21)$$

где C_v – коэффициент, учитывающий условия резания; T – период стойкости инструмента, мин; S – подача, мм/об; K_v – корректирующий коэффициент; m , x , y – показатели степени.

Значения C_v , m , x , y выбираются по справочнику.

Средние значения периода стойкости T можно принимать в пределах 60 - 90 мин для резцов из быстрорежущей стали и 90-120 мин для твердосплавного инструмента.

Корректирующий коэффициент определяется по следующей формуле:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{iv} \cdot K_{\phi} \cdot K_r, \quad (1.22)$$

где K_{mv} – коэффициент, учитывающий влияние материала заготовки; K_{nv} – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки; K_{iv} – коэффициент, учитывающий материал режущей части резца; K_{ϕ} – коэффициент, учитывающий главный угол в плане резца; K_r – коэффициент, учитывающий величину радиуса привершине резца (принимается во внимание только для резцов из быстрорежущей стали). Коэффициент K_{mv} рассчитывается:

при обработке сталей

$$K_{mv} = \left(\frac{750}{\sigma_b} \right)^{nv}; \quad (1.23)$$

при обработке серого чугуна

$$K_{mv} = \left(\frac{1900}{HB} \right)^{nv}; \quad (1.24)$$

при обработке ковкого чугуна

$$K_{mv} = \left(\frac{1500}{HB} \right)^{nv}; \quad (1.25)$$

где σ_b – предел прочности материала заготовки, Мпа; HB – твердость материала заготовки, Мпа.

Значения показателей nv и коэффициентов K_{nv} , K_{iv} , K_{ϕ} , K_r выбираются по справочникам.

При обработке медных сплавов с содержанием свинца 10% $K_{mv}=4$, а с содержанием свинца 15% $K_{mv}=12,0$.

При обработке силумина с $\sigma_b=200-300$ Мпа, HB 60 и дюралюминия $\sigma_b=400-500$ Мпа, HB 100 принимать $K_{mv}=0,8$. Если дюралюминий имеет $\sigma_b=300-400$ Мпа, HB 100, а силумин $\sigma_b=100-200$ Мпа, HB 65, то $K_{mv}=1,0$.

Для проверки возможности реализации VP на выбранном станке определяется расчётная частота вращения шпинделя n_p , 1/мин:

$$n_p = \frac{V_p \cdot 1000}{\pi D_0}, \quad (1.26)$$

где D_0 – диаметр заготовки до обработки.

Полученная v_p сравнивается с имеющимися на станке значениями. Если расчётная частота не совпадает с одной из ступеней, то для дальнейших расчётов принимается та ступень ($n_{ст}$), которая является ближайшей меньшей к n_p , т.е. должно выдерживаться условие $n_{ст} \leq n_p$.

По принятому значению $n_{ст}$ определяется фактическая скорость резания V_ϕ , м/мин:

$$V_\phi = \frac{\pi D_0 n_{ст}}{1000} \quad (1.27)$$

В дальнейших расчётах используются только $n_{ст}$ и V_ϕ .

Сила резания P. Раскладывается на составляющие силы, направленные по осям координат станка (тангенциальную P_z , радиальную P_y и осевую P_x). При наружном продольном и поперечном точении, растачивании, отрезании, прорезании пазов и фасонном точении эти составляющие рассчитываются по формуле:

$$P_{z,y,x} = 10 C_p t^x S^y V_\phi^n k_p \quad (1.28)$$

При отрезании, прорезании и фасонном точении t – длина режущей кромки резца. Постоянная C_p и показатели степени x , y , n для каждой из составляющих сил резания.

При отрезании, прорезании и фасонном точении t – длина режущей кромки резца. Постоянная C_p и показатели степени x , y , n для каждой из составляющих сил резания.

Поправочный коэффициент K_p представляет собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих условия резания:

$$K_p = K_{mp} \cdot K_{fp} \cdot K_{yp} \cdot K_{xp} \quad (1.29)$$

Численные значения коэффициентов приведены в справочниках.

Главной составляющей силы резания является P_z , по которой рассчитывается мощность, необходимая для снятия стружки. Поэтому расчётным путём достаточно определить только P_z , а остальные составляющие можно установить по формулам:

$$P_x = (0,3 - 0,4) P_z \quad (1.30)$$

$$P_y = (0,4 - 0,5) P_z \quad (1.31)$$

Осевая сила P_x (сила подачи) сравнивается по паспорту станка с наибольшей допускаемой механизмом подачи, и в случае превышения последней, требует повторного расчёта режимов резания.

Мощность резания N. Вначале рассчитывается эффективная мощность резания:

$$N_\phi = \frac{P_z \cdot V_\phi}{1020 \cdot 60}, \quad \text{кВт.} \quad (1.32)$$

Затем определяется потребная мощность на шпинделе станка:

$$N_p = \frac{N_{\text{э}}}{\eta_{\text{ст}}}, \quad \text{кВт}, \quad (1.33)$$

где $\eta_{\text{ст}}$ – КПД станка.

Для выводов об эффективности рассчитанных режимов для принятого станка устанавливается коэффициент его использования по мощности:

$$K = \frac{N_p}{N_{\text{ст}}}, \quad (1.34)$$

где $N_{\text{ст}}$ – мощность главного электродвигателя станка (по паспорту).

Величина коэффициента K не должна превышать единицы. Наиболее рациональное значение $K=0,85-0,9$.

В случае отклонения K от рациональной величины необходимо вновь рассчитать режимы резания, скорректировав при этом параметры, устанавливаемые автором расчётов (S , t , T , тип станка и др.)

Основное технологическое время – время в минутах, затрачиваемое непосредственно для снятия заданного припуска. Оно определяется по формуле

$$T_0 = \frac{L}{n_{\text{ст}} \cdot S_{\text{ст}}} \cdot i, \quad (1.35)$$

где L – расчётная длина обработки, мм; i – количество проходов.

$$L = l + l_1 + l_2, \text{ мм}, \quad (1.36)$$

где l – чертёжный размер обрабатываемой поверхности, мм; l_1 – величина врезания резца, мм; l_2 – величина перебега резца, мм.

$$l_1 = t \cdot \text{ctg} \varphi, \text{ мм}; \quad l_2 = (2 - \varepsilon) S_{\text{ст}}, \text{ мм},$$

где φ – величина главного угла в плане резца.

1.10.2 Стругание

Стругание (рис.1.33) с точки зрения стружкообразования имеет общие черты с точением. При этом виде обработки используется инструмент сходной формы и одинаковой геометрией режущей части.

При стругании обрабатываются плоскости или линейные поверхности профильного сечения с прямолинейными образующими. При этом предусматривается простейшая принципиальная кинематическая схема резания, используются только одно главное движение – прямолинейно направленное.

Стругальные станки осуществляют главное движение в горизонтальной плоскости. Протяжённость пути движения резца ограничивается настройкой станка. Совершив рабочий путь резания, резец или заготовка, пройдя в обратном направлении такое же расстояние, возвращается в исходное положение.

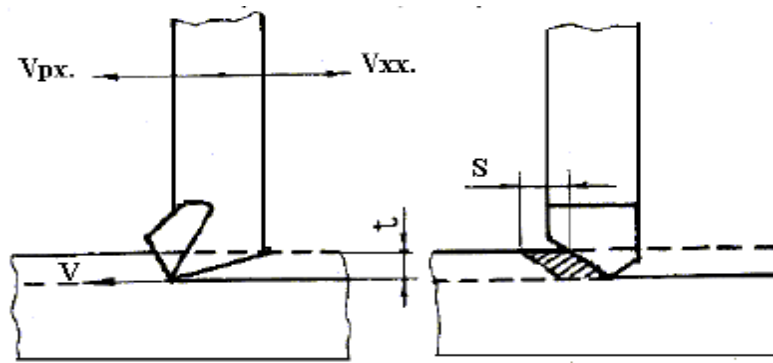


Рисунок 1.33 – Схема срезания припуска строгальным резцом:
 $V_{рх}$ –рабочий ход; $V_{хх}$ – холостой ход

Полный цикл работы строгального станка состоит из равных по длине рабочего и холостого ходов. Это даёт основание вести счёт пройденного пути или времени работы станка по двойным ходам.

После каждого двойного хода механизм привода главного движения станка отключается и включается механизм подачи (S), который выражается в мм/дв.ход.

После завершения подачи снова включается механизм привода главного движения и осуществляется очередной двойной ход.

Глубина резания t , мм, и число проходов предопределяются припуском на обработку и мощностью станка. Они устанавливаются, как и при точении. При черновом строгании необходимо стремиться к тому, чтобы весь припуск снялся за один проход.

Подача S , мм/дв.ход, при черновом строгании выбирается максимально допустимой, в соответствии с глубиной резания, сечением державки резца, прочностью режущей пластинки.

Скорость резания V_p , м/мин, при строгании плоскостей проходными резцами, при прорезании пазов и отрезании рассчитывается по соответствующим формулам для точения. При этом вводится дополнительный поправочный коэффициент ($K_{ув}$) в формулу, учитывающий ударную нагрузку на резец. При продольном строгании $K_{ув}=1,0$; а при поперечном $K_{ув}=0,8$.

После определения скорости резания рассчитывается число двойных ходов в минуту:

$$\Pi_p = \frac{1000 V_p}{L(1+m)}, \text{ дв.ход/мин}, \quad (1.37)$$

где V_p – расчётная скорость резания, м/мин; L – расчётная длина хода резца, мм; m – отношение скорости рабочего хода резца к скорости холостого хода. Обычно принимается $m=0,75$.

$$L = l_1 + l_2, \text{ мм}, \quad (1.38)$$

где l_1 –длина обрабатываемой поверхности, мм; l_2 –пробег резца в обе стороны, мм.

При $l_1 < 100$ мм $l_2 = 35$ мм,
 при $101 < l_1 < 200$ мм $l_2 = 50$ мм,
 при $201 < l_1 < 300$ мм $l_2 = 60$ мм.

Расчитанная величина n_p корректируется по паспорту станка, и принимается ближайшая меньшая ступень, т.е. $n_{ст} \cdot n_p$. В случае бесступенчатого регулирования скорости ползуна станка проверяется возможность реализации на нём n_p , а $n_{ст}$ принимается на 5-10% меньше n_p .

После корректировки устанавливается фактическая скорость резания:

$$V_{ф} = \frac{L(1+m) \cdot n_{ст}}{1000} \text{ , м/мин}$$

В дальнейших расчётах используются только $n_{ст}$ и $V_{ф}$. (1.39)

Сила резания. Составляющие силы резания при строгании рассчитываются также, как и при точении, с использованием формул 1.28; 1.30; 1.31.

Мощность резания и коэффициент использования станка по мощности определяются по формулам для точения : 1.32; 1.33; 1.34.

Основное технологическое время определяется по следующей зависимости:

$$T_o = \frac{A + B}{n_{ст} \cdot S} \text{ , мин.} \quad (1.40)$$

где A – ширина обрабатываемой поверхности, мм; B – боковое врезание и сход резца, мм:

при $t < 2$ мм $B = 4$ мм,
 при $2,1 < t < 4$ мм $B = 6$ мм,
 при $4,1 < t < 6$ мм $B = 8$ мм.

Сверление, рассверливание, зенкерование, развёртывание

Сверление, зенкерование и развёртывание являются наиболее распространёнными технологическими способами обработки круглых отверстий.

Сверление (рис.1.34) – основной метод образования отверстий в металле обрабатываемых заготовок.

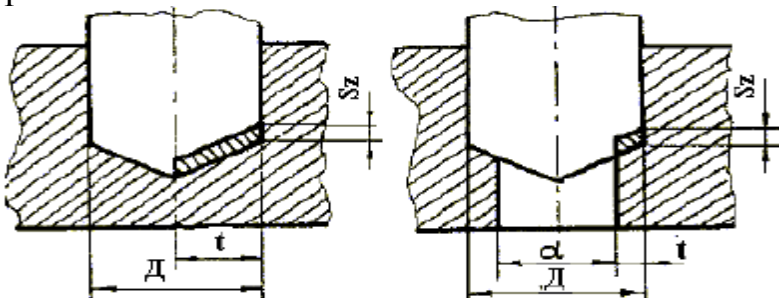


Рисунок 1.34 – Схема резания при сверлении и рассверливании

При сверлении, как правило, используются стандартные свёрла, имеющие двережущие кромки, расположенные диаметрально относительно друг друга. Просверленные отверстия чаще всего не имеют абсолютно правильной цилиндрической формы. Их поперечные сечения представляют форму овала, а продольные – небольшую конусность.

Зенкерование предназначено для обработки предварительно просверленных отверстий или отверстий, изготовленных способами литья или штамповки. При зенкеровании достигается более высокая точность по форме и размеру, чем при сверлении.

Стандартные зенкеры имеют от трёх до восьми зубьев. На практике чаще всего используются зенкеры с тремя винтовыми зубьями, смещёнными на 120° относительно друг друга.

Развёртывание – технологический способ завершающей обработки просверленных и зенкеранных отверстий с целью получения точных по форме и диаметру цилиндрических отверстий с малой шероховатостью.

Развёртки имеют чётное ($z = 4$) число зубьев, расположенных диаметрально друг против друга. Каждым зубом срезается слой малой толщины, что и даёт возможность получения высокой точности.

Глубина резания. При сверлении глубина резания принимается $t=0,5D$ (см. рис. 1.34), а при рассверливании, зенкерании или развёртывании $t=0,5(D-d)$, где D – диаметр инструмента, мм; d – диаметр предварительного отверстия, мм.

Подача. При сверлении отверстий подача принимается по справочнику. При рассверливании отверстий, подача рекомендуемая для сверления, увеличивается в 2 раза.

Значения подач рассчитаны на обработку отверстий глубиной менее $3D$. При большей глубине необходимо вводить поправочный коэффициент K_{l_s} .
Таблица 1.1 – Значения поправочного коэффициента

Глубина отверстия, l мм	$1 \leq 5D$	$1 \leq 7D$	$1 \leq 10D$
Поправочный коэффициент K_{l_s}	0,9	0,8	0,75

Рекомендуемые подачи при зенкерании приводятся в справочнике.

Назначенная подача должна быть скорректирована по паспорту выбранного станка. При этом необходимо выдержать условие: $S_{ct} \leq S$, где S_{ct} – окончательно установленное по паспорту значение подачи.

Скорость резания. Скорость резания, м/мин, определяется:

$$V_p = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v, \quad (1.41)$$

при сверлении,

а при рассверливании, зенкерании и развёртывании

$$V_p = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} \cdot K_v, \quad (1.42)$$

где D – диаметр сверла, зенкера или развёртки, мм; K_v – общий поправочный коэффициент.

Общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий

фактические условия резания, определяется по формуле:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{iv} \cdot K_{lv}, \quad (1.43)$$

где K_{mv} – коэффициент на обрабатываемый материал; K_{iv} – коэффициент на инструментальный материал; K_{lv} –коэффициент, учитывающий глубину сверления.

Коэффициент K_{mv} рассчитывается следующим образом:

при обработке стали

$$K_{mv} = \left(\frac{750}{\sigma_b} \right)^{nv}; \quad (1.44)$$

при обработке серого чугуна

$$K_{mv} = \left(\frac{1900}{HB} \right)^{nv}; \quad (1.45)$$

при обработке ковкого чугуна

$$K_{mv} = \left(\frac{150}{HB} \right)^{nv}, \quad (1.46)$$

где σ_b –предел прочности материала заготовки, Мпа; HB –твёрдость материала заготовки, Мпа.

Коэффициент, учитывающий глубину отверстия K_{lv} , при сверлении принимается в зависимости от диаметра сверла.

Таблица 1.2–Коэффициент, учитывающий глубину отверстия K_{lv}

Глубина отверстия	$D_0 - 3D$	$3D - 4D$	$4D - 5D$	$5D - 6D$	$6D - 8D$	более $8D$
Коэффициент K_{lv}	1,0	0,85	0,75	0,7	0,6	0,55

При рассверливании, зенкерования и развёртывания $K_{lv}=1,0$.

После определения скорости резания рассчитывается частота вращения шпинделя станка n_p , 1/мин:

$$n_p = \frac{1000 \cdot v_p}{\pi \cdot D}, \quad (1.47)$$

где D – диаметр инструмента, мм.

Полученное значение n_p корректируется по паспорту станка, и принимается ближайшая меньшая ступень $n_{ст}$, т.е. должно быть выдержано условие: $n_{ст} \cdot n_p$. В дальнейших расчётах используется только $n_{ст}$.

Крутящий момент, M , и осевая сила, P , рассчитываются по следующим формулам:

при сверлении

$$M_{кр} = 10 \cdot C_m \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_p; \quad (1.48)$$

$$P_0 = 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_p;$$

при рассверливании и зенкерования

$$\begin{aligned}M_{кр} &= 10 \cdot C_m \cdot D^q \cdot t^x \cdot S^y \cdot K_p; \\P_0 &= 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot K_p,\end{aligned}\quad (1.49)$$

где C_m и C_p – коэффициенты, учитывающие условия резания, значения которых приведены в справочниках.

Коэффициент K_p в данном случае зависит только от материала заготовки и определяется выражением: $K_p = K_{mp}$.

Для определения крутящего момента при развёртывании каждый зуб инструмента можно рассматривать как расточной резец. Тогда при диаметре развёртки D крутящий момент устанавливается:

$$M_{кр} = \frac{C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot D \cdot z}{2 \cdot 100} \text{, Нм} \quad (1.50)$$

где S_z подача, мм, на 1 зуб развёртки, равная S/z ; z – число зубьев развёртки;

$S = S_{ст}$ принятая подача, мм/об.

Рассчитанную силу подачи P_0 необходимо сравнить с допускаемыми значениями по паспорту выбранного станка. При превышении последней расчёт режимов следует повторить, скорректировав принимаемые автором параметры.

Мощность резания. Эффективная мощность резания определяется по формуле

$$N_э = \frac{M_{кр} \cdot n_{ст}}{9750} \text{ кВт.} \quad (1.51)$$

Потребная мощность резания:

$$N_{п} = \frac{N_э}{\eta} \text{ кВт,} \quad (1.52)$$

где η – КПД станка.

Для выводов об эффективности рассчитанных режимов для принятого станка определяется коэффициент его использования по мощности:

$$K = \frac{N_{п}}{N_{ст}}, \quad (1.53)$$

где $N_{ст}$ – мощность главного электродвигателя станка.

Наиболее рациональные значения $K = 0,85 - 0,9$. В случае отклонения K от этой величины необходимо расчёты режимов резания повторить, скорректировав параметры, устанавливаемые автором.

Основное технологическое время определяется по формуле

$$T_о = \frac{L}{\Pi_{ст} \cdot S_{ст}} \text{ мин,} \quad (1.54)$$

где L – расчётная глубина отверстия, мм.

$$L = l + l_1 + l_2; \text{ мм,} \quad (1.55)$$

где l – чертёжный размер глубины отверстия, мм; l_1 – величина врезания инструмента, мм; l_2 –величина перебега инструмента, мм.

Можно принять :

$$l_1 + l_2 = 0,35D.$$

1.10.3 Фрезерование

Фрезерование является высокопроизводительным методом формообразования поверхностей деталей многолезвийным режущим инструментом – фрезой. Для этого метода характерно непрерывное главное вращательное движение инструмента и поступательное движение заготовки.

Тип применяемой фрезы определяется конфигурацией обрабатываемой поверхности (рис.1.35). Её диаметр для сокращения основного технологического времени выбирается по возможности наименьшей величины с учётом схемы резания, формы и размеров обрабатываемой заготовки.

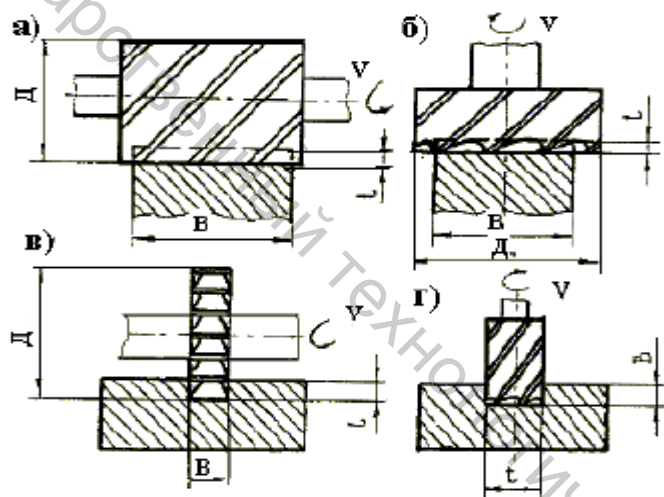


Рисунок 1.35 – Виды фрезерования:

- а) фрезы цилиндрические; б) фрезы торцевые;
- в) фрезы дисковые; г) фрезы концевые.

При торцовом фрезеровании (рис.1.35б) диаметр фрезы D должен быть больше ширины фрезерования B и может приниматься по формуле :

$$D = (1,25 - 1,5)B, \text{ мм.} \quad (1.56)$$

Глубина фрезерования t и ширина фрезерования B (рис.1.35) – величины, связанные с размерами снимаемого слоя. Параметр t измеряется в направлении, перпендикулярном оси фрезы (за исключением торцового фрезерования). Ширина фрезерования измеряется перпендикулярно глубине.

Глубина резания при припуске на обработку до 5 мм, как правило, принимается равной последнему. В противном случае назначается несколько проходов. При чистовом фрезеровании чаще всего $t = 1-1,5$ мм.

Подача. При фрезеровании различаются подача на один зуб фрезы S_z , мм/зуб; подача на один оборот $S_o = S_{zz}$, мм/об, и минутная подача $S_m = S_z \cdot n \cdot z$, мм/мин, где n – частота вращения фрезы, 1/мин; z – число зубьев фрезы.

При черновом фрезеровании исходной величиной подачи является подача на зуб $S_z = S_o / z$.

Скорость резания определяется по формуле

$$V_p = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^h \cdot z^p} \cdot K_v, \quad \text{м/мин}, \quad (1.57)$$

где K_v – общий поправочный коэффициент; T – период стойкости фрезы, мин. Значения C_v и показателей степени приведены в справочнике.

Общий поправочный коэффициент на скорость резания:

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{pv} \cdot K_{iv}, \quad (1.58)$$

где K_{mv} – коэффициент, учитывающий обрабатываемый материал; K_{pv} – коэффициент, учитывающий состояние поверхности; K_{iv} – коэффициент, учитывающий материал инструмента.

Коэффициент K_{mv} рассчитывается по формулам:

при обработке стали

$$K_{mv} = \left(\frac{750}{\sigma_b} \right)^{pv}; \quad (1.59)$$

при обработке серого чугуна

$$K_{mv} = \left(\frac{1900}{HB} \right)^{pv}; \quad (1.60)$$

при обработке ковкого чугуна

$$K_{mv} = \left(\frac{1500}{HB} \right)^{pv}, \quad (1.61)$$

где σ_b – предел прочности материала заготовки, Мпа; HB – твердость материала заготовки, Мпа.

Значения показателей pv и коэффициентов K_{pv} , K_{iv} приведены в справочнике.

При обработке медных сплавов принимать $K_{mv} = 1,7-2,0$, а при обработке алюминевых сплавов $K_{mv} = 0,8-1,2$.

После расчёта скорости резания определяется частота вращения шпинделя:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V_p}{\pi \cdot D}, \quad \text{,1/мин}, \quad (1.62)$$

где D – диаметр фрезы, мм.

Значение n_p корректируется по паспортным данным принятого станка

и принимается ближайшая меньшая ступень $n_{ст}$ так, чтобы $n_{ст} \leq n_p$. В дальнейших расчётах используется только $n_{ст}$.

После корректировки частоты вращения шпинделя определяется фактическая скорость резания.

В дальнейших расчётах используется только V_f .

Сила резания. Главная составляющая силы резания при фрезеровании – окружная сила, N :

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot V^u \cdot Z}{D^q \cdot n_{ст}^w} \cdot K_{мр}, \quad (1.63)$$

где $K_{мр}$ – поправочный коэффициент на качество обрабатываемого материала.

После расчёта P_z устанавливается возможность её реализации на выбранном станке.

Для этого определяется сила P_x , которая сравнивается по паспорту станка с допустимой силой подачи P_x доп.

Для цилиндрических дисковых, прорезных и отрезных фрез $P_x = (1,1-1,2)P_z$, а для торцовых $P_x = (0,3-0,4)P_z$.

Необходимо, чтобы $P_x \leq P_x$ доп.

Мощность резания, кВт. Вначале рассчитывается эффективная мощность резания:

$$N_{э} = \frac{P_z \cdot V_{ст}}{1020 \cdot 60}, \quad (1.64)$$

а затем определяется потребная мощность на шпинделе станка:

$$N_{п} = \frac{N_{э}}{\eta}, \quad \text{кВт}, \quad (1.65)$$

где η – КПД станка.

Для выводов об эффективности рассчитанных режимов устанавливается коэффициент использования станка по мощности:

$$K = \frac{N_{п}}{N_{ст}}, \quad (1.66)$$

где $N_{ст}$ – мощность главного электродвигателя станка, кВт.

Значения K не должны превышать единицы. Наиболее рациональное значение $K = 0,85-0,9$.

В случае существенного отклонения коэффициента от рациональных величин расчёт режимов следует осуществить вновь, скорректировав при этом параметры, принимаемые автором (t , S , тип станка и др.).

Основное технологическое время определяется по формуле

$$T_o = \frac{L}{S_m} \cdot i, \quad (1.67)$$

мин,

где L – расчётная длина обрабатываемой поверхности, мм; S_m – минутная подача, мм/мин; i – число проходов.

$$L = l + l_1 + l_2, \text{ мм}, \quad (1.68)$$

где l – чертёжная длина обрабатываемой поверхности, мм; l_1 – величина врезания, мм:

при фрезеровании цилиндрической и дисковой фрезами

$$l_1 = \sqrt{t(D - t)};$$

а при фрезеровании торцовой фрезой $l_1 = D \cdot l_2$ – величина перебега, мм; при использовании цилиндрической и дисковой фрезы $l_2 = 2-5$ мм; при торцовой – $l_2 = 2-4$ мм.

1.10.4 Шлифование

Шлифованием называется процесс обработки заготовок с помощью шлифовальных кругов. Абразивные зёрна в круге удерживаются с помощью связки и расположены неупорядоченно. При вращении круга часть зёрен срезает материал обрабатываемой поверхности, и она приобретает вид совокупности микроследов абразивных зёрен.

Часть зёрен ориентирована таким образом, что резать не может, но производит работу трения по поверхности резания. В зоне резания выделяется большое количество теплоты, по причине которой мелкие частицы обрабатываемого материала, сгорая, либо образуют пучок искр, либо оплавляются. Существуют следующие основные схемы шлифования: наружное круглое, внутреннее круглое и плоское.

При наружном круглом шлифовании (рис. 1.36 а) круг, вращаясь вокруг оси, совершает главное движение. Цилиндрическая заготовка вращается вокруг оси, параллельной оси круга. Наружные поверхности круга и заготовки взаимно касаются по образующей. Линейные скорости точек шлифовального круга и заготовки могут быть направлены в одну сторону или навстречу друг другу, но в любом случае скорости точек, принадлежащих кругу, намного превосходят скорости точек заготовки.

Заготовке сообщается возвратно-поступательное движение продольной подачи $S_{пр}$. По окончании цикла возвратно-поступательного движения продольной подачи действует прерывистое движение поперечной подачи, сообщаемое шлифовальному кругу или заготовке $S_{поп}$.

Во время внутреннего круглого шлифования (рис. 1.36 б) шлифовальный круг и обрабатываемая заготовка вращаются вокруг параллельных осей, при этом наружная поверхность круга касается внутренней поверхности детали. Движения продольной $S_{пр}$ и поперечной $S_{поп}$ подач такие же, как и при на-

ружном круглом шлифовании, но приложены, как правило, только к шлифовальному кругу.

При плоском шлифовании (рис.1.36 в) шлифовальный круг, вращаясь вокруг своей оси, совершает главное движение резания. Его наружная поверхность касается обрабатываемой заготовки. Заготовке сообщается возвратно-поступательное движение продольной подачи $S_{пр}$. В промежутках между этими движениями кругу придаётся прерывистое движение поперечной подачи $S_{поп}$. После обработки всей поверхности шлифовальному кругу сообщается движение вертикальной подачи $S_{верт}$. Шлифование всей плоскости повторяется до тех пор, пока значение суммарной вертикальной подачи не будет равно припуску на обработку.

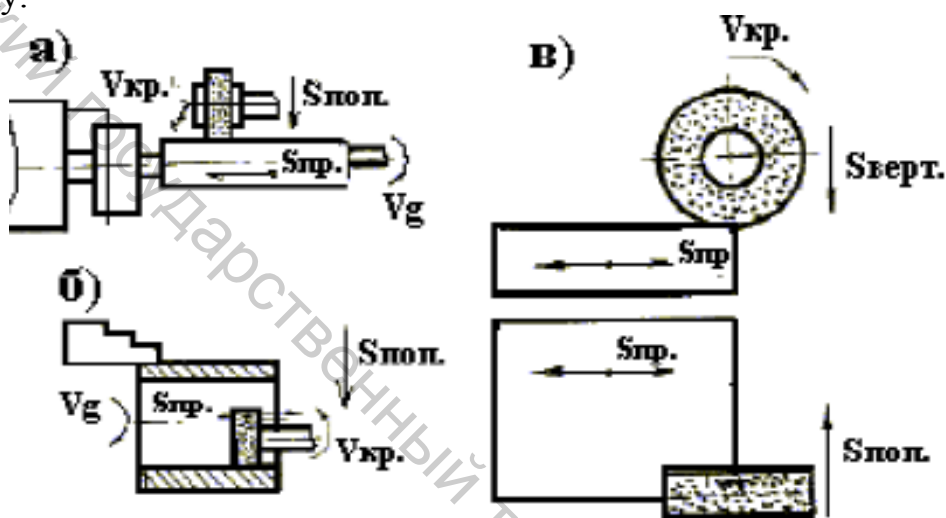


Рисунок 1.36 – Схемы шлифования:

а) наружное круглое; б) внутреннее круглое; в) плоское.

При шлифовании важное значение имеет выбор материала круга. Для шлифования мягких материалов, как правило используются твёрдые круги с открытой (пористой) структурой.

При шлифовании закалённых сталей нужны мягкие круги. В случае необходимости достижения большой производительности следует применять крупнозернистые круги, а высокой чистоты поверхности - мелкозернистые.

Круглое наружное и внутреннее шлифование

Ниже приводятся рекомендации по расчету режимов шлифования методом продольных подач цилиндрических поверхностей деталей.

Глубина шлифования t , мм, (поперечная подача $S_{поп.}$, мм) зависит от размеров заготовки, свойств обрабатываемого материала и характера шлифования.

Продольная подача $S_{пр}$, – мм это перемещение обрабатываемой детали вдоль её оси за один оборот. Она определяется по формуле

$$S_{пр} = B \cdot \beta \quad (1.69)$$

, мм/об.

где B – ширина шлифовального круга, мм; β – расчётный коэффициент.

Частота вращения детали круга. Прежде чем рассчитать частоту вращения детали, необходимо определить её расчётную скорость вращения:

$$V_d = \frac{C_v \cdot D_d^x}{T^m \cdot t^k \cdot \beta}, \text{ м/мин}, \quad (1.70)$$

где D_d – диаметр шлифуемой поверхности, мм; T – стойкость шлифовального круга (30–45 мин). Значения C_v , K , m , x приведены в справочнике.

Расчётная частота вращения детали:

$$n_d = \frac{1000 \cdot V_d}{\pi \cdot D_d}, \text{ 1/мин}. \quad (1.71)$$

Необходимо, чтобы n_d находилась в пределах, указанных в паспортных данных выбранного станка.

Определяется скорость вращения шлифовального круга.

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_k}{1000}, \text{ м/мин}, \quad (1.72)$$

где D_k – диаметр шлифовального круга, мм; n_k – частота вращения шлифовального круга, 1/мин (принимается по паспорту станка).

Скорость перемещения стола определяется по формуле

$$V_c = \frac{S_{пр} \cdot n_d}{1000}, \text{ м/мин}. \quad (1.73)$$

Полученное значение V_c должно находиться в пределах скоростей перемещения стола, указанных в паспорте выбранного станка. В противном случае, необходимо провести корректировку $S_{пр}$ и n_d .

Силы резания и мощность. Тангенциальная сила резания, H :

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot V_d^u \cdot S_{пр}^k \cdot t^y \quad (1.74)$$

Значения C_p , u , k , y приведены в справочнике.

Эффективная мощность на вращение шлифовального круга определяется по формуле

$$N_{эк} = \frac{P_z \cdot V_k}{1020 \cdot 60}, \text{ кВт}. \quad (1.75)$$

Потребная мощность на вращение шлифовального круга:

$$N_{пк} = \frac{N_{эк}}{\eta}, \text{ кВт}, \quad (1.76)$$

где η – КПД шлифовального станка по паспортным данным станка.

Коэффициент использования станка по мощности:

$$K = \frac{N_{\text{ПК}}}{N_{\text{СТ}}} \quad (1.77)$$

где $N_{\text{СТ}}$ – мощность электродвигателя главного движения, кВт.

Основное технологическое время, мин, определяется по формуле

$$T_o = \frac{2L \cdot h}{n_d \cdot S_{\text{пр}} \cdot t} \cdot K \quad (1.78)$$

где L – длина продольного хода детали, мм; h – припуск на обработку, мм; K – коэффициент, учитывающий точность шлифования и износ круга. При черновом шлифовании $K = 1,3-1,4$; при чистовом $K = 1,3-1,7$.

$$L = l + B \quad (1.79)$$

где l – длина обрабатываемой поверхности, мм; B – ширина круга, мм.

1.10.5 Плоское шлифование

Ниже рассматривается расчёт режимов шлифования периферией круга.

Глубина шлифования t мм (вертикальная подача, S в мм/дв.ход).

Обычно при плоском шлифовании глубина шлифования принимается при предварительной обработке $t=0,15-0,04$ мм, а при окончательной $t=0,005-0,01$ мм надвойной ход.

Продольная подача $S_{\text{пр}}$, мм/об, это перемещение шлифуемой поверхности за один оборот круга. Величина подачи определяется по формуле:

$$S_{\text{пр}} = \beta \cdot B \quad (1.80)$$

где B – ширина круга, мм; β – коэффициент шлифования.

Величину B можно принять по паспорту станка. Коэффициент шлифования для предварительной обработки $\beta=0,4-0,7$, а для окончательной $\beta = 0,25-0,35$

Скорость детали и круга. Скорость перемещения детали определяется по формуле

$$V_d = \frac{C_v}{T^{0,7} \cdot \beta \cdot t^{0,75}} \quad (1.81)$$

где C_v – коэффициент, принимаемый при шлифовании незакалённой стали – 15,50; при шлифовании закалённой стали – 15,25; при шлифовании чугуна и медных сплавов – 15,90; T – период стойкости круга (30–40 мин).

Скорость V_d должна быть в пределах, указанных в паспорте выбранного станка. Число двойных ходов стола:

$$n_{\text{СТ}} = \frac{1000 \cdot V_d}{2L} \quad (1.82)$$

где L – расчётный ход стола, мм.

$$L = l + (20 - 30) \quad (1.83)$$

где L – длина шлифуемой поверхности, мм.

Скорость вращения шлифовального круга:

$$V_k = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_k}{1000 \cdot 60}, \text{ м/сек} \quad (1.83)$$

где D_k – диаметр шлифовального круга (по паспорту станка), мм; n_k – частота вращения круга (по паспорту станка), 1/мин.

Мощность шлифования. Эффективная мощность шлифования определяется по формуле

$$N_{\text{э}} = C_N \cdot V_d \cdot S_{\text{пр}}^{0,8} \cdot t^{0,8}, \text{ кВт}, \quad (1.84)$$

где C_N – коэффициент, принимаемый при шлифовании сырой стали – 0,68; при шлифовании закалённой стали – 0,76; при шлифовании чугуна и медных сплавов – 1,8.

Потребная мощность резания:

$$N_{\text{п}} = \frac{N_{\text{э}}}{\eta}, \text{ кВт}, \quad (1.85)$$

где η – КПД станка (по паспорту).

Коэффициент использования станка по мощности:

$$K = \frac{N_{\text{п}}}{N_{\text{ст}}}, \quad (1.86)$$

где $N_{\text{ст}}$ – мощность электродвигателя станка (по паспорту), кВт.

Основное технологическое время, мин, при плоском шлифовании с двойным ходом стола определяется по формуле

$$T_o = \frac{2L \cdot H \cdot h \cdot K}{S_{\text{пр}} \cdot n_k \cdot S_{\text{поп}} \cdot t}, \quad (1.87)$$

где H – ширина шлифования, мм; h – припуск на обработку, мм; $S_{\text{поп}}$ – поперечная подача, мм/дв.ход. При обычном шлифовании $S_{\text{поп}} = 0,005 - 0,10$ мм/дв.ход. При чистовом $S_{\text{поп}} = 0,003 - 0,005$ мм/дв.ход; K – коэффициент, учитывающий точность шлифования и износ круга. При обычном шлифовании $K = 1,2 - 1,4$, а при чистовом $K = 1,3 - 1,7$.

1.10.6 Протягивание

Протягивание используется для формирования таких стандартных элементов деталей, как шлицевые пазы, шпоночные канавки, квадраты или многогранники под гаечные ключи, круглые и прямоугольные отверстия и др.

Особенность протягивания состоит в том, что при этом виде обработки отсутствует движение подачи, так как она заложена в конструкции самого инструмента: разность высот зубьев протяжки или полуразность диаметров каждой пары смежных рабочих зубьев даёт величину, называемую подачей на зуб S_z (рис.1.37).

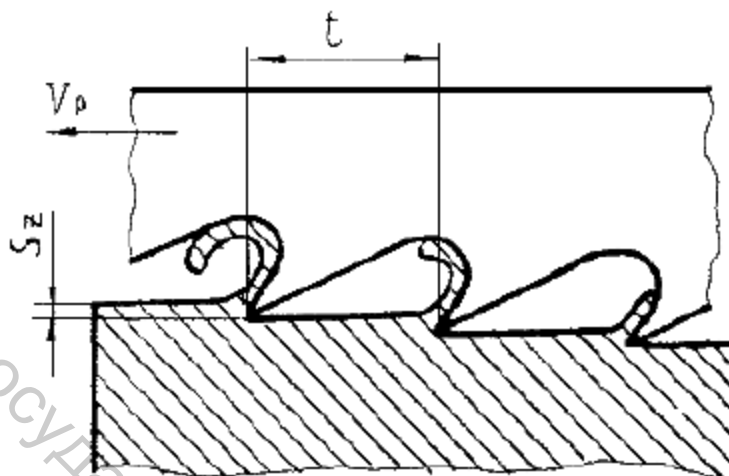


Рисунок 1.37 – Схема срезания припуска при обработке протягиванием

Различают внутреннее и наружное протягивание. При внутреннем– формируются отверстия различных конфигураций, а при наружном– обрабатываются плоскости и фасонные незамкнутые профили. Протягивание осуществляется с помощью специальных инструментов протяжек, которые представляют собой многолезвийный инструмент, имеющий значительную длину (более 1500 мм). На режущей части протяжек находится большое число режущих зубьев, расположенных друг за другом. При обработке внутренних центрально симметричных отверстий зубья протяжки имеют кольцевую форму соответствующего профиля. В процессе резания протяжка протаскивается через неподвижно закреплённую заготовку, установленную на приспособлении стола протяжного станка, тем самым формируя необходимые элементы детали.

Подача. При протягивании толщина срезаемого слоя равна разности между высотами соседних зубьев протяжки, которая называется подачей на зуб S_z , которая обычно принимается равной 0,1– 0,2 мм.

Скорость резания, м/мин, определяется по следующей формуле:

$$V_p = \frac{C_v}{T^m \cdot S_z^y} \quad (1.88)$$

где T – период стойкости протяжки, мин (принимается в пределах 106-500 мин); C_v –коэффициент, зависящий от качества обрабатываемого материала, материала режущей части инструмента, условий резания и т. д.

Значения C_v и показателей степени m и y приведены в справочнике.

Величина V_p должна быть в пределах интервала скорости, указанных в паспорте выбранного станка.

Сила резания, H , при протягивании определяется по формуле

$$P_z = P \cdot \sum B \cdot K, \quad (1.89)$$

где P – сила резания, приходящаяся на 1 мм длины режущей кромки зуба протяжки, Н мм; B – наибольшая суммарная длина кромок всех одновременно режущих зубьев, мм; K – поправочный коэффициент.

$$\sum B = B \cdot Z_p, \quad (1.90)$$

где B – периметр резания, мм; Z_p – наибольшее число одновременно режущих зубьев.

$$Z_p = \frac{l}{t}, \quad (1.91)$$

где l – длина обрабатываемой поверхности, мм; t – шаг режущих зубьев протяжки (см. рис. 1.37).

Поправочный коэффициент K , учитывающий влияние геометрии протяжки, износа режущей части, условия резания определяется:

$$K = K_\alpha \cdot K_\gamma \cdot K_h \cdot K_o, \quad (1.92)$$

Где K_α, K_γ, K_o – коэффициенты, учитывающие влияние переднего и заднего углов протяжки; K_h – коэффициент, учитывающий влияние износа зубьев протяжки. При отсутствии износа $K_h=1$. При износе до 0,3 мм $K_h=1,15$. При износе зубьев свыше 0,3 мм $K_h=1,75$. Коэффициент, учитывающий охлаждение зоны резания.

При работе без охлаждения $K_o=1,34$; с охлаждением $K_o=1,0$.

Значение рассчитанной силы P_z должно быть меньше номинальной тяговой силы выбранного станка.

Мощность протягивания, кВт. Эффективная мощность:

$$N_\varepsilon = \frac{P_z \cdot V_p}{1020 \cdot 60} \quad (1.93)$$

Потребная мощность:

$$N_\pi = \frac{N_\varepsilon}{\eta}, \quad (1.94)$$

где η – КПД станка (по паспортным данным).

Основное технологическое время, мин, определяется по формуле:

$$T_o = \frac{L \cdot K}{1000 \cdot V_p}, \quad (1.95)$$

где L – длина рабочего хода протяжки, мм; K – коэффициент, учитывающий обратный ход ($K=1,4-1,50$).

$$L = l + l_p + l_k + l_1, \quad (1.96)$$

где l —чертёжная длина протягиваемой поверхности, мм; l_p —длина режущей части протяжки, мм; l_k —длина калибрующей части протяжки, мм; l_1 —длина перебега протяжки (10-20 мм).

$$l_p = \left[\frac{h}{2S} + (2 - 4) \right] \cdot t_p \quad (1.97)$$

где h —припуск на обработку, мм; t — шаг режущих зубьев протяжки, мм; S —число калибрующих зубьев протяжки ($S=4-8$); t_p —шаг калибрующих зубьев протяжки, мм.

Тема 2. ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

2.1 Дефекты кристаллической решетки

В идеальной кристаллической решетке атомы расположены в строгом порядке, без учета тепловых колебаний атомов и различных искажений решетки. По существу, такая решетка является лишь моделью для изучения строения кристалла.

Реальный кристалл отличается от идеального наличием тепловых колебаний атомов около положений равновесия, их миграцией (диффузией) и различного рода дефектами, нарушающими правильность решетки. Логично было бы предположить, что внешние границы кристалла, повторяя правильность его внутреннего строения, должны иметь плоские грани. Однако этого не происходит. Кристаллизация из расплава идет одновременно из многих центров кристаллизации, и в процессе роста кристаллов они соприкасаются и мешают росту друг друга. Поэтому их внешняя форма не соответствует внутреннему строению. Такие кристаллы с правильной кристаллической решеткой, но неправильной внешней формой, называются монокристаллами, или кристаллитами (рис. 2.1).

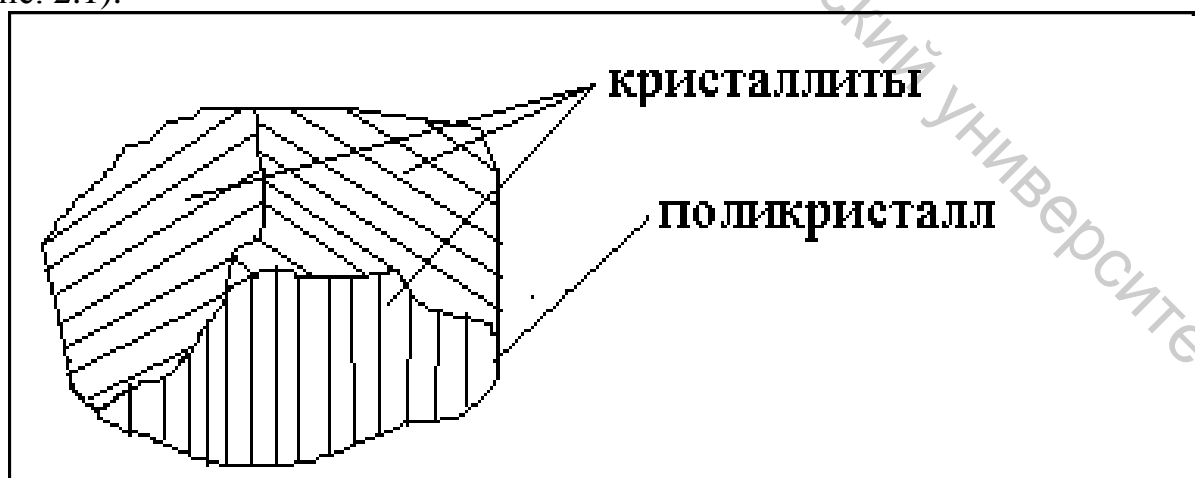


Рисунок 2.1

По своей внешней форме кристаллит не является правильным многогранником, но приближается к нему, имея округлые формы. Такой кристаллит называется зерном. Кристаллиты, имеющие ветвистую, древовидную форму, называются дендритами. Совокупность множества кристаллитов называется поликристаллом. Все металлы являются поликристаллами. Свойства кристалла зависят от природы атомов и сил взаимодействия между ними, а последние — от расстояний между атомами. Поскольку расстояния между атомами различны в разных направлениях, то и свойства кристалла неодинаковы по разным направлениям. Это явление, заключающееся в различии свойств тела по разным направлениям, называется анизотропией. Кристаллические вещества анизотропны, в отличие от аморфных тел (например, смолы), которые являются изотропными, со свойствами, одинаковыми по всем направлениям.

Выше говорилось о том, что атомы в узлах решетки находятся в равновесном положении и обладают минимумом потенциальной энергии, что и обеспечивает строгий порядок в их расположении. Этот порядок может нарушаться, атомы могут покидать узлы решетки и внедряться в ее междоузлия. Для того, чтобы это произошло, атом должен получить избыток энергии, достаточный для преодоления энергетического барьера, удерживающего его в узле решетки. Эта избыточная энергия берется из энергии теплового движения атомов ближайшего окружения. Ближайшие атомы колеблются не строго согласованно, и случайное стечение обстоятельств может привести к такому перераспределению энергии их тепловых колебаний, при котором в некотором очаге появится энергия, достаточная для выброса атома из его равновесного положения. Это перераспределение энергии между ближайшими атомами называется энергетической флуктуацией. Дефекты кристаллической структуры подразделяются на точечные, линейные, поверхностные и объемные. К точечным дефектам относятся вакансии, дислоцированные и примесные атомы. При точечных дефектах нарушение решетки локализуется в отдельных точках и не превышает нескольких межатомных расстояний во всех трех измерениях. К линейным дефектам относятся дислокации. При линейном дефекте искажение решетки в двух измерениях не превышает нескольких атомных расстояний, а в третьем измерении распространяется значительно, например, до границы зерна.

Примеры точечных дефектов показаны на рис. 2.2.

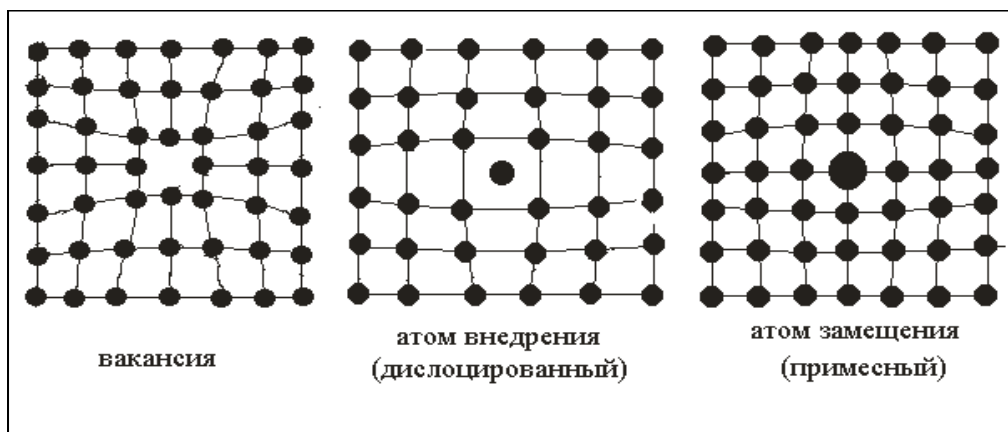


Рисунок 2.2

Основным источником вакансий является свободная поверхность кристалла. Атом поверхностного слоя под воздействием флуктуации может легко выйти из узла решетки и испариться или адсорбироваться на поверхности (см. рис. 2.3). На его месте образуется пустой узел — вакансия. Через некоторое время в эту вакансию может перейти близлежащий атом, в результате чего вакансия переместится во второй слой и т.д. Другими словами, вакансия втягивается вглубь кристалла. Образование вакансии в результате выхода атома на поверхность называется дефектом Шоттки.

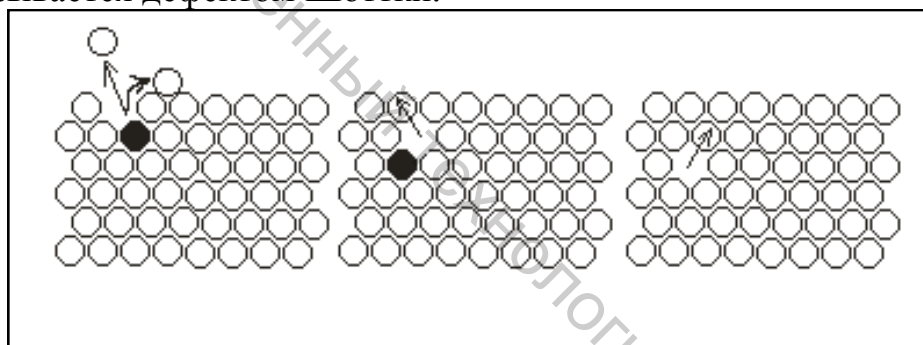


Рисунок 2.3

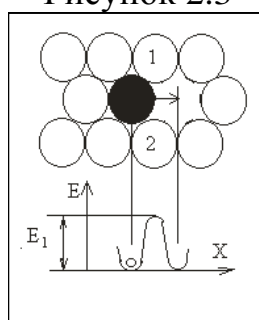


Рисунок 2.4

Источником вакансий являются также границы зерен, пустоты, трещины и дислокации. Концентрация вакансий обычно невелика. Если концентрацию исчислять как число атомов, приходящихся на 1 вакансию, то для золота, например, она составляет 10^{19} при комнатной температуре и увеличивается до 10^4 при температуре плавления, т.е. 1 дислокация приходится на 10000 атомов. Увеличение числа вакансий с повышением температуры связано с повышением амплитуды тепловых колебаний атомов и, соответственно, энергии этих коле-

баний. Возможен выброс атома и в междоузлие решетки, в результате чего образуются вакансии и дислоцированный атом (парный дефект Френкеля). Однако энергетические затраты при образовании такого дефекта существенно выше, чем при выходе атома в вакансию. Рис. 2.4 иллюстрирует изменение энергии атома при выходе из узла плотноупакованной решетки. В узле он обладает минимумом энергии E . Для того, чтобы выйти из узла, он должен «протиснуться» между атомами 1 и 2, преодолеть потенциальный энергетический барьер E_1 . Эту избыточную энергию он получает от соседних атомов и отдает, снова занимая место уже в новом узле. Таким образом, флуктуация — источник образования и вакансий, и междоузельных дислоцированных атомов.

Примеси являются одним из распространенных дефектов структуры реальных кристаллов. Современные способы очистки не позволяют получать абсолютно чистые материалы. В зависимости от природы примесей они могут находиться в кристалле, в междоузлии ячейки (атом внедрения) либо занимать место основного атома в узле ячейки (атом замещения). Т. к. чужеродные атомы по размерам отличаются от атомов основного кристалла, то их присутствие вызывает искажение решетки. Примеси оказывают существенное влияние на химические, оптические, магнитные и механические свойства твердых тел. Данные по исследованию свойств предельно чистых металлов показали, что тщательно очищенное железо химически инертно и не подвергается коррозии, а титан, вольфрам и молибден, являющиеся хрупкими в обычном состоянии, становятся пластичными даже в условиях глубокого охлаждения.

2.2 Движение атомов в кристалле, механизмы диффузии

Атомы не только совершают колебания около положения равновесия, но и меняют свои положения, совершая скачки в вакансии или междоузлия решетки, т.е. перемещаются внутри кристалла. Поскольку направление этих скачков невозможно ни предвидеть, ни угадать, движение атомов носит хаотический характер и называется самодиффузией. На рис. 2.5 показаны возможные механизмы самодиффузии.

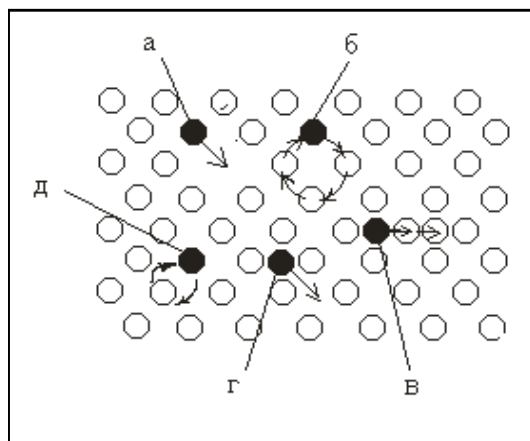


Рисунок 2.5

При вакансионном механизме диффузии (рис. 2.5 а) атом перемещается в соседнюю вакансию. Поскольку в вакансию может «впрыгнуть» любой атом из окружающих, удобнее говорить не о перемещении атомов, а о перемещении вакансии. Это наиболее распространенный механизм диффузии, поскольку требует наименьших энергетических затрат.

Простой обменный механизм (рис. 2.5 д) состоит в том, что два соседних атома меняются местами. Вероятность такого обмена весьма мала по сравнению с вероятностью обменяться местами с вакансией.

При циклическом обменном механизме (рис. 2.5 б) происходит согласованный поворот группы атомов, при котором каждый занимает место предыдущего, а последний — первого. Это снижает энергетические затраты по сравнению с простым обменным механизмом.

Простой междоузельный механизм (рис. 2.5 г) заключается в переходе атома из одного междоузлия в другое. Такой механизм наблюдается у мелких примесных атомов, которым легче «протиснуться» в междоузельное пространство, чем более крупным основным атомам.

При движении по междоузельному механизму вытеснения (рис. 2.5 в) атом попадает в междоузлие, затем выталкивает ближайшего соседа из узла и становится на его место. Вытесненный в междоузлие атом выталкивает следующего соседа и т.д.

Поскольку вакансионный механизм диффузии является основным, интересным представляется характер движения вакансии в кристалле. Она движется не по прямой, а по чрезвычайно запутанной ломаной линии. Теоретически подсчитано, что, например, для золота при температуре, близкой к температуре плавления, время оседлой жизни вакансии составляет 10^{-10} с, число скачков в 1 с — 10^{10} , путь, который проходит вакансия по ломаной линии за 1 с — 3 м, при этом она смещается по прямой от исходного положения всего на 10 мкм. Природе почему-то понадобилось, чтобы вакансия отличалась беспримерной суетливостью.

2.3 Деформация монокристалла

Понятие напряжения и деформации

Под действием внешней нагрузки в кристалле возникают внутренние напряжения, уравнивающие эту нагрузку. Напряжением σ называется отношение приложенной силы к площади поперечного сечения нагруженного тела

$\sigma = \frac{P}{F}$. Но тело имеет множество сечений, у каждого из них своя площадь и,

значит, в каждом — свое напряжение. Например, при растяжении цилиндрического образца с поперечным сечением S силой P в этом сечении возникает

нормальное к сечению напряжение $\sigma = \frac{P}{F}$. В косом сечении под углом α пло-

щадь уже будет $S/\cos\alpha$, а сила P может быть разложена на нормальную к сечению $P\cos\alpha$ и касательную, действующую в плоскости сечения — $P\sin\alpha$ (рис. 2.6).

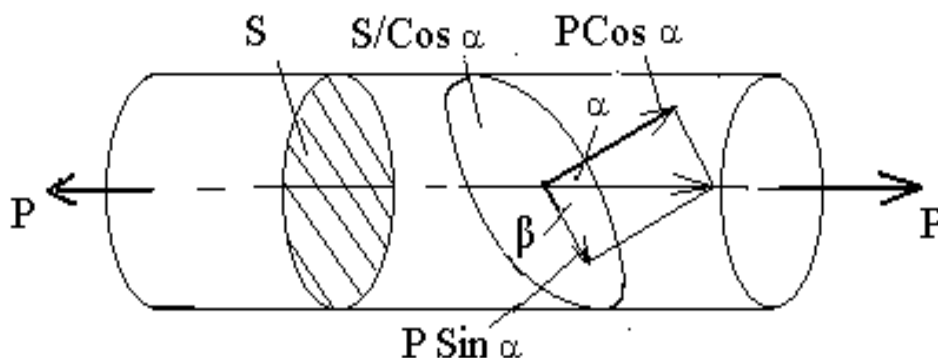


Рисунок 2.6

Соответственно, в сечении будут действовать два напряжения: нормальное

$$\sigma = \frac{P \cos\alpha}{S / \cos\alpha} = \frac{P}{S} \cos^2\alpha \text{ и касательное } \tau = \frac{P \sin\alpha}{S / \cos\alpha} = \frac{P}{S} \sin\alpha \cos\alpha.$$

Поскольку $\alpha = (90^\circ - \beta)$; $\sin\alpha = \sin(90^\circ - \beta) = \cos\beta$, касательное напряжение

$$\tau = \frac{P}{S} \cos\alpha \cos\beta.$$

Обозначив $\sigma_n = \frac{P}{S}$ нормальное напряжение в сечении, перпендикулярном действию внешней силы и $m = \cos\alpha \cos\beta$ (фактор Шмида), получим $\tau = m\sigma_n$.

При $\alpha = 45^\circ$ фактор Шмида $m = 0,5$ (это его максимальное значение). Следовательно, в площадках, наклоненных к направлению действия внешней силы под углом 45° , действуют максимальные касательные напряжения $\tau = 0,5 \sigma_n$.

Если представить наклонную площадку в виде параллельных атомных плоскостей, то действующие в ней нормальные напряжения стремятся оторвать одну плоскость от другой, а касательные — сдвинуть эти плоскости одну относительно другой.

Деформацией называется изменение размеров тела под действием внешней силы. Изменить размеры тела путем отрыва атомных плоскостей друг от друга нельзя, ибо это будет не деформация, а разрушение. Поэтому под действием нормальных напряжений тело не деформируется. Изменение размеров тела может происходить только путем сдвига атомных плоскостей, т.е. под действием касательных напряжений.

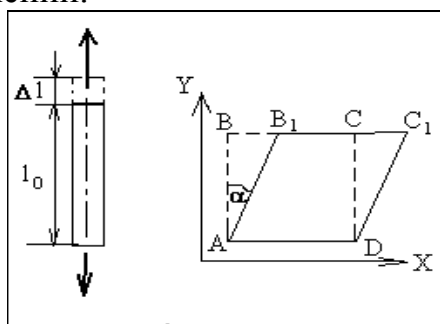


Рисунок 2.7

Различают деформации абсолютную и относительную. На рис. 2.7 показаны абсолютная деформация Δl , как удлинение стержня при его растяжении, и относительная деформация (степень деформации), как отношение абсолютной деформации к начальному размеру: $\varepsilon = \Delta l / l_0$. Относительный сдвиг $\gamma = \operatorname{tg} \alpha$ определяется отношением смещения вдоль оси X к расстоянию вдоль оси Y: $\gamma = \operatorname{tg} \alpha = BB_1 / AB$.

2.4 Механизм сдвиговой деформации

Деформация кристалла под действием внешней нагрузки объясняется сдвиговым процессом. По аналогии со сдвигом карт в колоде, в кристалле происходит направленное скольжение одних тонких слоев кристалла по отношению к другим слоям, как показано на рис. 2.8. Сдвиг происходит по определенным кристаллографическим плоскостям, как правило, по плоскостям наиболее плотной упаковки атомов в направлении наиболее плотного расположения атомов.

Рассматривая решетку монокристалла (рис. 2.9), можно видеть, что плоскости A и A¹ плотнейшей упаковки атомов находятся на большем расстоянии друг от друга, чем плоскости B и B¹ с меньшей плотностью упаковки атомов. Следовательно, межатомные силы взаимодействия между плоскостями A и A¹ меньше, чем между плоскостями B и B¹, и сдвинуть плоскости A и A¹ друг относительно друга легче, чем плоскости B и B¹. Наглядно это можно представить так: шару 1 легче раздвинуть шары 2 и 3 при сдвиге плоскости A, чем шару 4 раздвинуть шары 5 и 6 при сдвиге плоскости B.

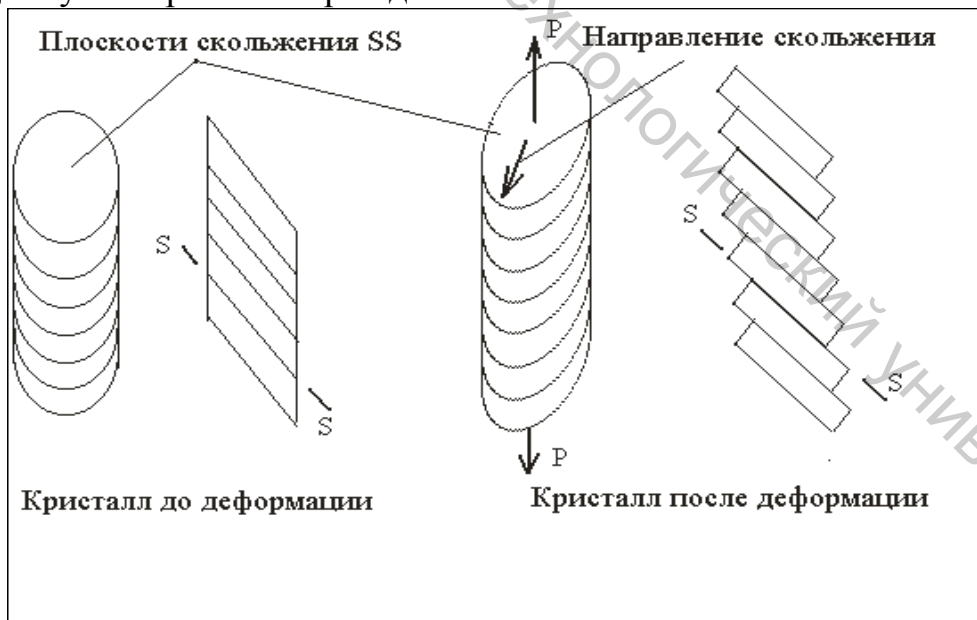


Рисунок 2.8

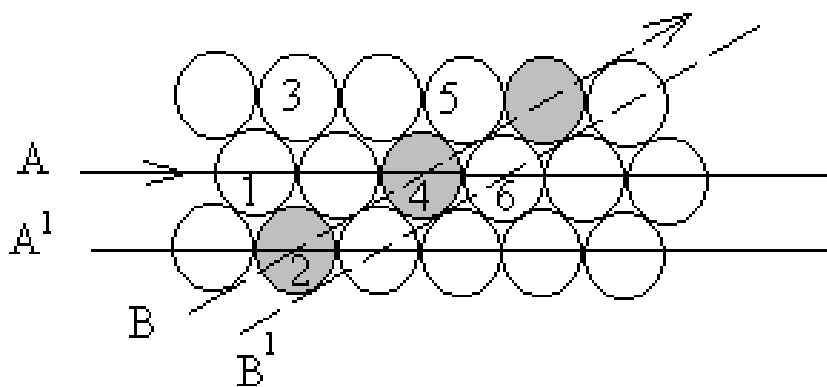


Рисунок 2.9

Деформация может протекать также путем двойникования, схема которого показана на рис. 2.10.

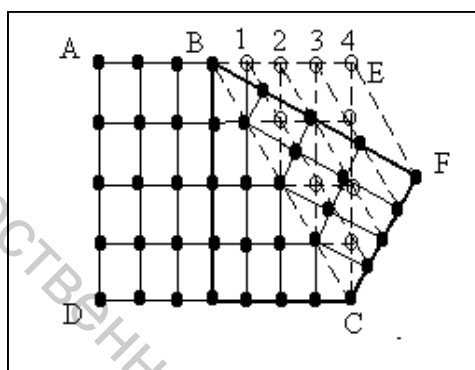


Рисунок 2.10

Из рисунка видно, что при двойниковании каждая атомная плоскость смещается относительно плоскости двойникования BC на расстояния, пропорциональные расстоянию этой плоскости от плоскости двойникования. В результате атомы деформированной части кристалла занимают зеркальное положение относительно плоскости двойникования. Так, область ABCD представляет недеформированную часть кристалла, BEC — часть, испытавшую двойникование.

Атомы плоскости 1 сдвинуты относительно плоскости двойникования BC на часть атомного расстояния. Плоскость 2 сдвинута относительно плоскости 1 на такую же часть атомного расстояния и, следовательно, относительно плоскости двойникования уже на удвоенную часть этого расстояния, плоскость 3 — на утроенную часть и т.д.

Напряжение сдвига атомных плоскостей

Теоретический расчет сдвигающего напряжения произвел Я. Френкель в 1924 г. При этом он исходил из того, что все атомы, находящиеся в плоскости сдвига, смещаются относительно другой атомной плоскости одновременно. Представим себе две атомные плоскости как два ряда шаров, лежащих друг на друге, как это показано на рис. 2.11. Расстояние между плоскостями равно «а», межатомное расстояние — «в».

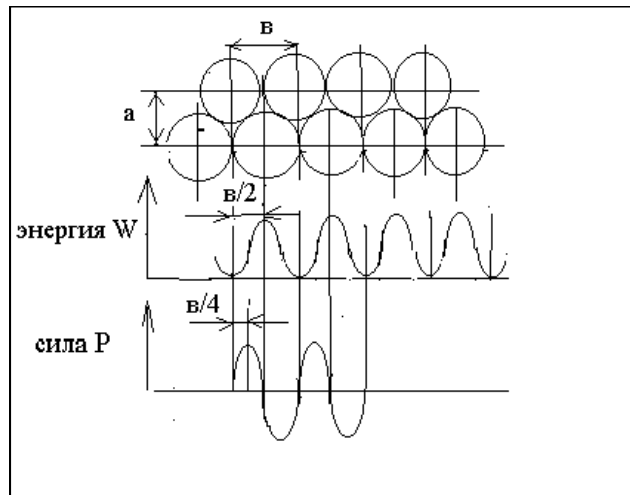


Рисунок 2.11

Каждый атом в своем равновесном положении обладает минимумом энергии. Для его выведения из этого положения нужно приложить силу и затратить энергию. При смещении верхней плоскости на расстояние « v » относительно нижней плоскости каждый атом снова попадает в положение равновесия, неотличимое от исходного, и снова обладает минимумом энергии. Следовательно, его энергия изменяется от минимума до максимума на пути « $v/2$ » и снова от максимума до минимума на пути от « $v/2$ » до « v », т. е. график энергии есть периодическая функция.

Поскольку сила есть производная от энергии по пути $P = \frac{dW}{ds}$, то график силы P тоже является периодической функцией, причем при $v/4$ сила максимальна.

Примем, что сила P сдвига атомной плоскости и соответствующее ей касательное напряжение τ изменяются по синусоиде $\tau = k \sin 2\pi x/v$, где k — коэффициент, x — текущее смещение, v — полное смещение, x/v — относительное смещение атома.

При $x = v/4$, $\sin = 1$ и $\tau = \tau_{\max}$. Следовательно, при $v/4$ имеет место критическое (максимальное) касательное напряжение.

Постоянную k можно найти, рассматривая малые смещения, при которых $\sin \alpha \approx \alpha$ и зависимость касательного напряжения от смещения подчиняется закону Гука: $\tau = G\gamma$, где G — модуль сдвига, $\gamma = x/a$ — относительный сдвиг. Следовательно, в области малых смещений $\tau = k \frac{2\pi x}{v} = G \frac{x}{a}$, откуда $k = \frac{vG}{2\pi a}$. Тогда τ

$$= \frac{vG}{a2\pi} \sin \frac{2\pi x}{v}.$$

Для определения критического сдвигающего напряжения подставим значение $x=v/4$ и получим $\tau_{\text{кр}} = \frac{vG}{2\pi a}$. Межплоскостное расстояние « a » примерно равно межатомному расстоянию в направлении сдвига « v ». Отсюда критическое напряжение $\tau_{\text{кр}} \approx \frac{G}{2\pi}$. Таким образом, при одновременном смещении всех атомов

одного слоя по отношению к другому атомному слою необходимо приложить касательное напряжение $\tau \approx G/6$. Поскольку $G = 10^3 - 10^4$ кг/мм², $\tau_{кр}$ имеет порядок $10^2 - 10^3$ кг/мм². Это теоретическое значение. Экспериментально установлено, что реальное критическое сдвигающее напряжение на 2–3 порядка меньше. Следовательно, представление об одновременном смещении всех атомов одного слоя по отношению к атомам другого слоя противоречит действительности. Чтобы объяснить существенно более низкое экспериментальное критическое напряжение по сравнению с теоретическим, приходится предположить, что при сдвиге соседних слоев межатомные силы преодолеваются не для всех атомов одновременно.

2.5 Движение дислокаций

Представим себе кристалл в виде параллелепипеда, верхняя часть которого сдвинута относительно нижней на одно межатомное расстояние, причем зафиксировано положение, когда сдвиг охватил не всю поверхность скольжения от правой грани до левой, а лишь часть этой плоскости (рис. 2.12).

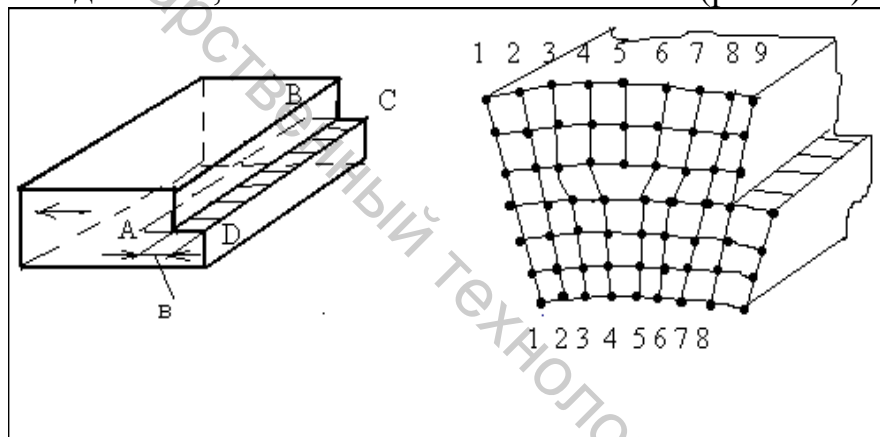


Рисунок 2.12

ABCD — участок плоскости скольжения, в котором произошел сдвиг, АВ — граница этого участка. На поперечном разрезе параллелепипеда видно, что в результате сдвига под плоскостью сдвига содержится n вертикальных атомных плоскостей (8), а над плоскостью сдвига — $n+1$ вертикальных атомных плоскостей (9). Лишнюю неполную атомную плоскость называют экстроплоскостью. Она действует как клин, изгибая решетку вокруг своего нижнего края.

Искажение решетки является не точечным, а линейным, оно распространено вдоль всей линии АВ. Такие линейные несовершенства решетки, как уже отмечалось, называются дислокациями. Над дислокацией атомы в кристалле уплотнены, а под ней — раздвинуты. Атом на самой кромке экстроплоскости имеет меньше соседей, чем другие атомы.

Сдвиг происходит последовательно от атома к атому, и в этом случае усилие сдвига должно быть меньше, чем при одновременном сдвиге всех атомов. Для понимания этого процесса рассмотрим модель движения гусеницы (рис. 2.13) и модель перемещения ковra (рис. 2.14).

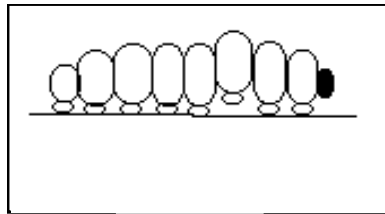


Рисунок 2.13

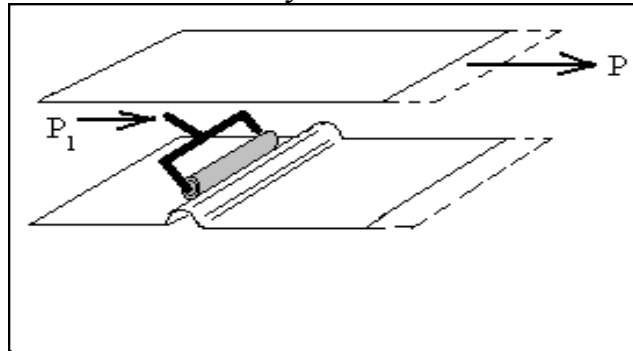


Рисунок 2.14

Гусеница перемещается не путем подъема всех лапок одновременно и перескока на шаг, а путем последовательного подъема одной пары лапок и перестановки их в новое место. Когда все лапки последовательно выполняют эту операцию, гусеница переместится на шаг, и такой режим движения требует от нее меньших усилий. Точно так же происходит перемещение ковра по полу в случае прокатывания на нем складки. Это требует значительно меньших усилий, чем если бы мы тащили ковер целиком.

Возвращаясь к дислокации, можно представить, что экстроплоскость перемещается по плоскости скольжения от одного края кристалла к другому, и, когда она выйдет на его свободную поверхность, верхняя часть кристалла сместится относительно нижней на одно межатомное расстояние «в», (рис. 2.15).

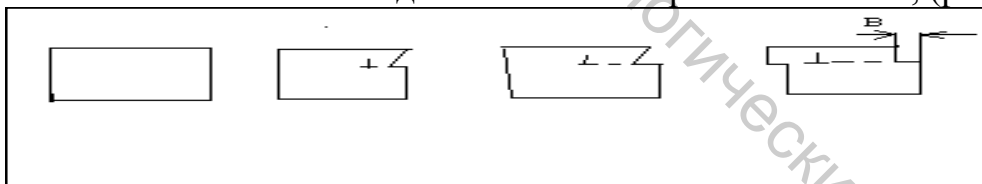


Рисунок 2.15

Рассмотрим механизм перемещения дислокации на атомном уровне (рис. 2.16).

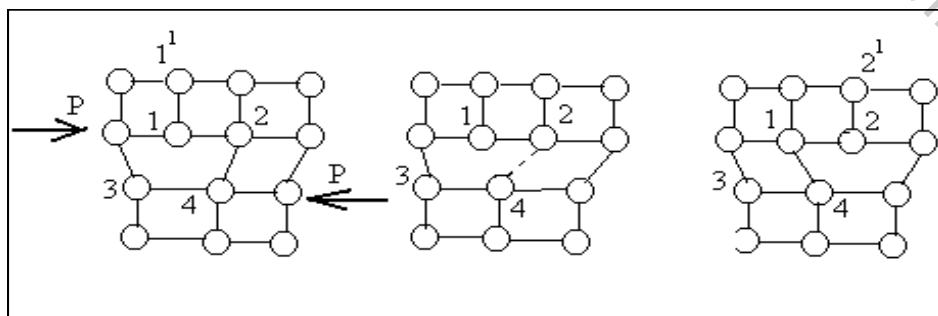


Рисунок 2.16

Как известно, силы взаимодействия атомов зависят от расстояния между ними. В зоне дислокации расстояния атомов 3 и 4 от краевого атома 1экстро

плоскостями $1-1^1$ увеличены, и связи между этими атомами утрачены. Под действием сдвигающей силы P смещение плоскостей приводит к уменьшению расстояния $1-4$ и увеличению расстояния $2-4$, в результате чего связь между атомами 1 и 4 восстанавливается, а между атомами 2 и 4 обрывается. Дислокация перемещается на одно межатомное расстояние.

В полной аналогии с моделью движения гусеницы общее перемещение атомной плоскости происходит путем последовательного перемещения дислокации — аналога лапки гусеницы. Движение дислокации — это процесс последовательного разрыва и восстановления связей кристаллической решетки. Пробег дислокации от одной границы кристалла до другой есть элементарный акт деформации кристалла на одно межатомное расстояние. Из совокупности пробегов дислокаций складывается общая деформация кристаллического тела.

2.6 Нанокристаллические материалы

Кристаллы с размерами менее 10 нм ($1\text{ нм} = 10^{-9}\text{ м}$) по комплексу свойств существенно отличаются от обычных материалов такого же химического состава. Это связано с сильным влиянием поверхностного (граничного) слоя. В нанокристаллических материалах доля граничного слоя быстро возрастает при измельчении зерен от 100 нм до $4-5\text{ нм}$. Считая, что зерна имеют сферическую форму, и полагая толщину слоя 1 нм (это соответствует $2-3$ атомным слоям для большинства металлов), получим следующие соотношения между диаметром зерна и объемной долей поверхностного слоя:

Диаметр зерна, нм	100	50	25	20	10	6	4
Объемная доля поверхностного слоя, %	6	12	24	30	60	100	150

Таким образом, в нанокристаллических материалах, начиная с диаметра зерен 6 нм , объем граничного слоя становится больше объема кристаллов.

Твердость материала при этом возрастает в $2-7$ раз, предел текучести в $2-3$ раза, а временное сопротивление в $2-8$. Нанокристаллические материалы имеют высокие демпфирующие свойства, т. к. из-за различия модулей упругости самих зерен и граничных слоев упругие колебания распространяются неоднородно и существенно рассеиваются. При $20-25^\circ\text{C}$ в нанокристаллических материалах с заметной скоростью развиваются процессы рекристаллизации.

Теплоемкость нанокристаллических сплавов при низких температурах в $1,2-2$ раза выше, чем у соответствующих аналогов из-за высокой теплоемкости граничного слоя. Нанокристаллические сплавы сильно расширяются при нагреве из-за более интенсивного (в $2-2,5$ раза) расширения граничного слоя по сравнению с зернами. У нанокристаллической меди при размерах зерен 8 нм коэффициент теплового расширения вдвое превышает его значение у поликристаллической меди.

Удельное электросопротивление у нанокристаллических материалов выше, чем у соответствующих аналогов, т. к. электроны проводимости сильнее

рассеиваются на границах зерен. Так, например, у нанокристаллических меди, никеля и железа с размерами зерен 100–200 нм удельное электросопротивление при 20°C возрастает соответственно на 15, 35 и 55%. Уменьшение диаметра зерна меди до 7 нм повышает удельное электросопротивление в несколько раз. Имеются и другие особые свойства нанокристаллических материалов.

Нанокристаллические порошки металлов, карбидов, нитридов, оксидов и других материалов получают физическими и химическими методами: испарением материалов в инертной или активной газовой среде; размолотом с интенсивным подводом энергии в зону измельчения; синтезом порошка с использованием плазмы, лазерного нагрева, термического разложения веществ электролизом.

Частицы получаемых порошков являются неравновесными, в них запасена избыточная энергия по сравнению с обычным крупнозернистым материалом. Значительная доля упругой энергии порошковых частиц обусловлена, во-первых, вкладом поверхностного слоя, во-вторых, под влиянием поверхностного слоя материал частиц испытывает сжатие, и кристаллическая решетка оказывается упруго искаженной (в частности, при диаметре зерна менее 10 нм и поверхностном натяжении 2 Н/м давление достигает 1 ГПа).

Нанокристаллические порошки плохо прессуются. В формованном изделии остаточная пористость по объему достигает 10%, у металлических нанокристаллических материалов ее удается сократить до 3% (об.), в керамических материалах (у которых порошки прессуются еще хуже) остаточная пористость составляет 15% (об.). Из-за пористости свойства порошковых нанокристаллических материалов непостоянны. В то же время получение и переработка нанокристаллических порошков является наиболее универсальным методом создания нанокристаллической структуры в различных материалах.

2.7 Микроструктура деформированных поликристаллов

Увеличение напряжения сверх предела текучести и пластическая деформация поликристалла приводит к тому, что зерна получают вытянутую форму в направлении наиболее интенсивного течения металла. Определенная ориентировка вытянутых в результате деформации зерен называется полосчатостью микроструктуры (рис. 2.17).

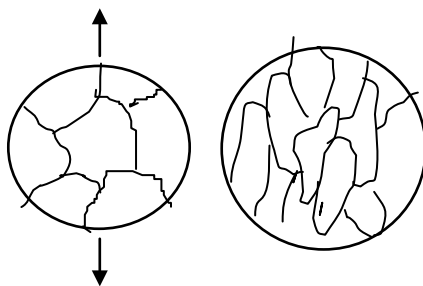


Рисунок 2.17

Одновременно с изменением формы зерен в процессе деформации происходит поворот кристаллографических осей отдельных зерен в пространстве. На

рис. 2.18 видно, что сдвиг по плоскостям скольжения должен приводить к смещению торцов образца. Но при растяжении образца торцы не смещаются, и сдвиг в этом случае возможен только при повороте плоскостей скольжения в направлении деформации растяжения.

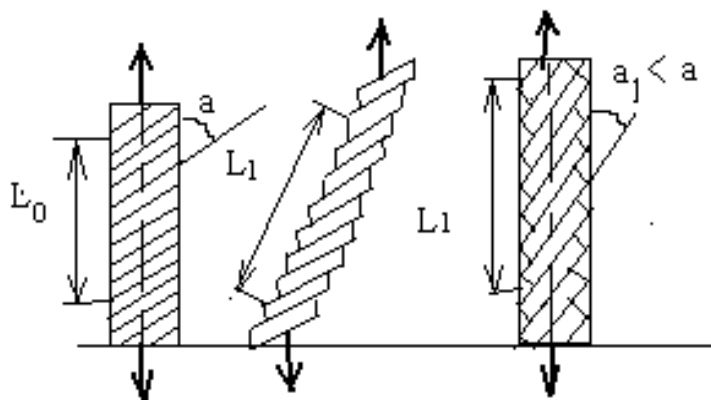


Рисунок 2.18

Таким образом, при значительной деформации поликристалла возникает преимущественная ориентировка кристаллографических осей всех зерен, которая называется текстурой. Это приводит к анизотропии свойств поликристалла.

Разная ориентировка плоскостей скольжения в зернах поликристалла и связанная с этим разная величина упругой деформации, соответствующей началу пластической деформации в отдельных зернах, приводят при разгрузке к возникновению остаточных напряжений второго рода. На рис. 2.19 показаны два смежных зерна, по-разному ориентированные в отношении действующей нагрузки. В слабом зерне, которое деформируется первым, уже прошла пластическая деформация, тогда как в сильном зерне деформация еще упругая.

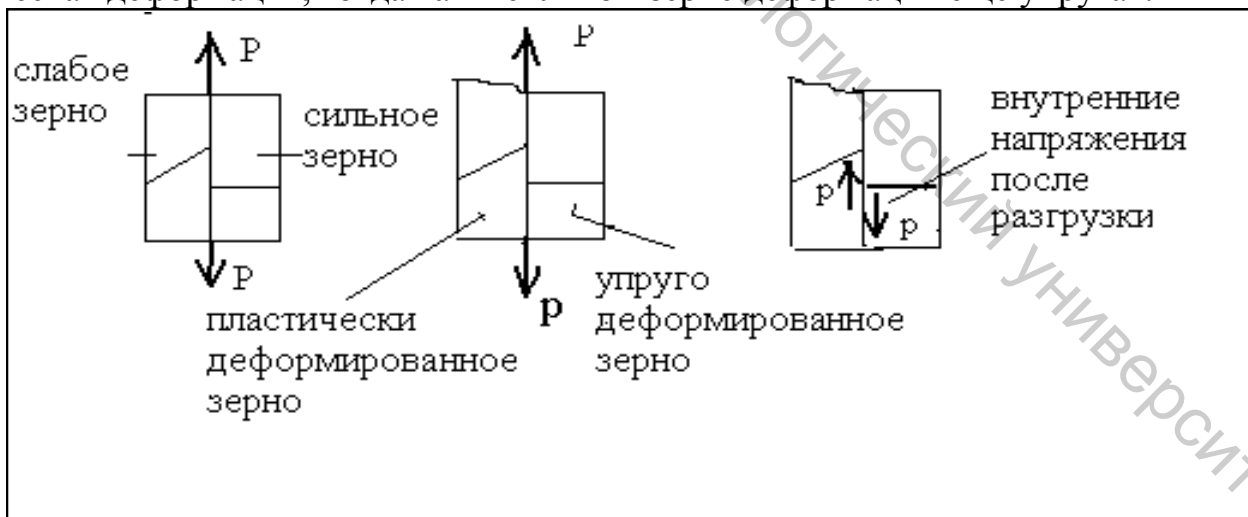


Рисунок 2.19

При снятии внешней нагрузки в слабом зерне имеет место остаточная деформация, и ввиду сплошности тела оно не позволяет сильному зерну полностью снять его упругую деформацию. Следовательно, сильное зерно остается под действием остаточных растягивающих напряжений со стороны слабого

зерна, тогда как на слабое зерно со стороны сильного действуют остаточные сжимающие напряжения.

Остаточные напряжения условно делятся на три рода. Напряжения первого рода уравниваются между отдельными частями тела (например, переход от деформированной части заготовки к недеформированной). Напряжения второго рода уравниваются между отдельными зернами поликристалла. Напряжения третьего рода уравниваются между отдельными группами атомов внутри зерна (например, дислокации).

Неодновременное включение зерен в пластическую деформацию и возникновение при разгрузке остаточных напряжений второго рода приводят к следующим особенностям деформирования.

1. Нелинейность зависимости деформации от напряжения при нагружении выше предела пропорциональности объясняется тем, что часть зерен начинает деформироваться пластически.
2. Упругое послепействие, которое состоит в том, что образец под действием постоянной нагрузки, не превышающей предел текучести, с течением времени получает дополнительную деформацию, а после снятия внешних сил имеет некоторую остаточную деформацию, со временем уменьшающуюся или даже исчезающую. В данном случае в слабых зернах имеют место пробеги дислокаций сначала в одну, затем в другую сторону.
3. Релаксация напряжений, заключающаяся в том, что с течением времени убывает сила (напряжение), необходимая для поддержания постоянной деформации образца. Объясняется это тем, что в результате пробега дислокаций в слабых зернах доля упругой деформации убывает.
4. Упругий гистерезис — явление, характеризующееся тем, что линия нагружения на графике «сила–деформация» не совпадает с линией разгрузки, образуя петлю гистерезиса, которая характеризует энергию, выделяющуюся в процессе деформации в виде тепла.

2.8 Упрочнение поликристалла

С увеличением степени пластической деформации увеличиваются все показатели сопротивления деформированию: пределы упругости, текучести, прочности и твердость металла. Одновременно снижаются показатели пластичности (рис. 2.20).

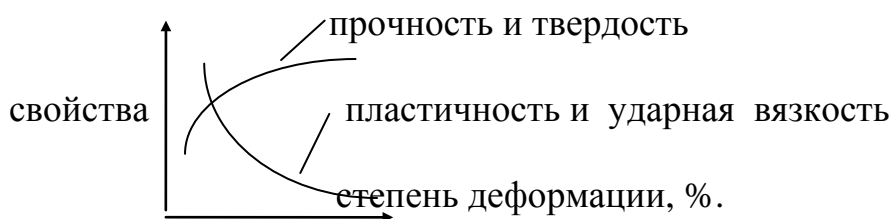


Рисунок 2.20

Например, для стали Ст3 при $\varepsilon=70\%$ увеличение прочности наблюдается примерно в два раза, с 50 до 95 кг/мм², а относительное удлинение понижается примерно в 15 раз, с 30 до 2%.

Совокупность явлений, связанных с изменением механических характеристик и физико-химических свойств металлов в процессе пластической деформации, называется упрочнением (наклепом).

Упрочнение объясняется прежде всего тем, что с увеличением степени деформации на несколько порядков увеличивается число дислокаций. В отожженном металле число дислокаций составляет 10^7-10^8 на 1 см², в сильно деформированном — $10^{11}-10^{12}$ на 1 см². При увеличении числа дислокаций их свободное перемещение сильно затрудняется взаимным влиянием, особенно на участках пересечения плоскостей скольжения, где скапливаются дислокации одинакового знака.

Особо эффективным барьером для дислокаций являются границы зерен, а т.к. при деформации происходит измельчение зерен и блоков, то увеличивается общая площадь границ, где происходит торможение дислокаций.

Механические свойства металла описываются диаграммами «напряжение–деформация», типовой вид которых для одноосного растяжения цилиндрического образца показан на рис. 2.21. При этом диаграммы могут быть построены в условных напряжениях (рис. 2.21 а) или в истинных напряжениях (рис. 2.21 б).

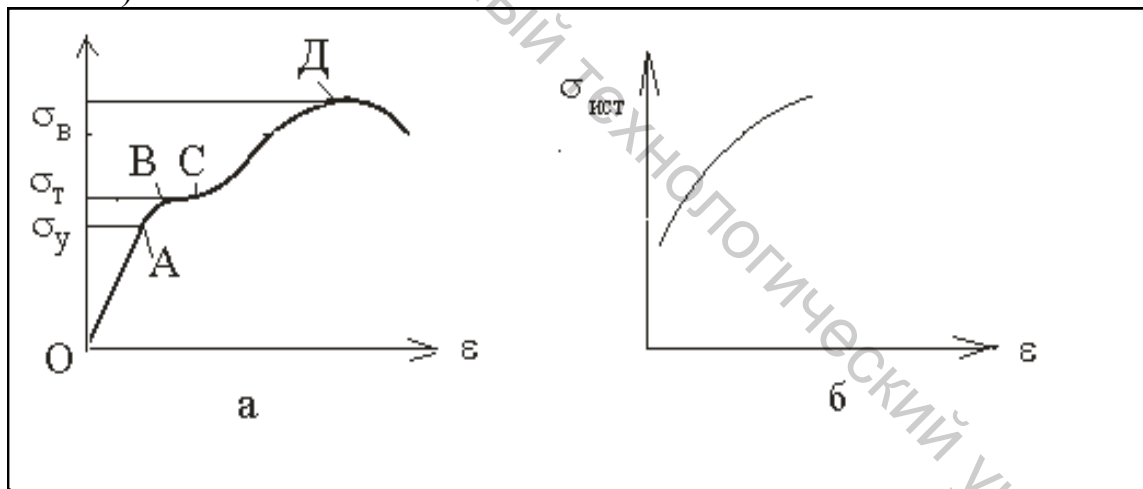


Рисунок 2.21

Степень деформации при испытании образца на растяжение определяется либо как относительное удлинение $\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$, либо как относительное сужение $\psi = \frac{F-F_0}{F_0}$, где L_0 и L — начальная и конечная длина образца, F_0 и F — начальная и конечная площадь поперечного сечения образца (рис. 2.22).

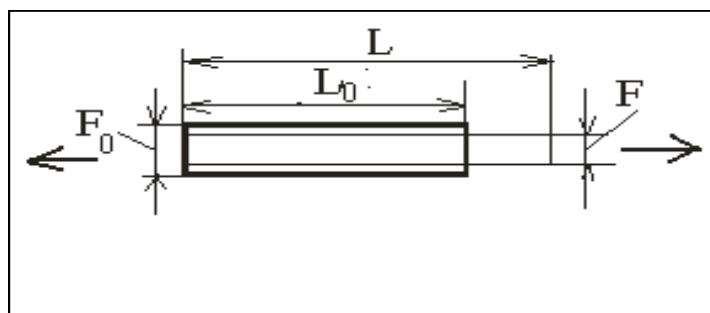


Рисунок 2.22

Условным напряжением называется отношение действующей силы к исходному сечению образца во всем интервале деформаций, вплоть до разрушения.

Истинным напряжением называется отношение действующей силы к истинному значению площади поперечного сечения образца в каждый момент времени, учитывая изменение этой площади в процессе деформации. Так, например, при растяжении образца его сечение постоянно уменьшается, а с некоторого момента образуется местная шейка, по которой и происходит разрушение.

2.9 Деформация при повышенных температурах

Возврат и рекристаллизация

Ранее было сказано, что при холодной деформации зерна получают разную по величине упругую деформацию, в результате чего после снятия внешних сил в металле возникают остаточные напряжения.

Если холоднодеформированное, т.е. упрочненное, тело нагреть, то происходит процесс, обратный упрочнению, — разупрочнение. Процесс разупрочнения при нагреве до температуры $(0,25-0,3) T_{пл}$ называется возвратом, а при нагреве выше $0,4 T_{пл}$ — рекристаллизацией. Здесь $T_{пл}$ — абсолютная температура в градусах Кельвина. При нагреве до температуры возврата амплитуда тепловых колебаний атомов и их подвижность возрастают настолько, что становится возможным переход атомов из неравновесного положения в равновесное. В результате искаженная при холодном деформировании решетка частично восстанавливается, упругие деформации отдельных зерен уменьшаются, и тем самым снимаются остаточные напряжения, возникшие при холодном деформировании.

Для прохождения процесса возврата, т.е. снятия остаточных напряжений и восстановления упруго искаженной кристаллической решетки, проводят термическую обработку, называемую низкотемпературным отжигом. Возврат приводит к некоторому уменьшению сопротивления деформированию и к увеличению пластичности материала. Если проводить деформирование при температурах возврата, то интенсивность упрочнения снижается по сравнению с холодным деформированием. Размеры и форма зерен при возврате не меняются, наблюдается текстура деформации.

Термообработка при более высоких температурах называется высокотемпературным (рекристаллизационным) отжигом и приводит к практически полному разупрочнению: зерна вытянутой формы становятся равноосными, уничтожаются текстура деформации и связанная с ней анизотропия свойств, значительно снижается сопротивление деформированию, увеличивается пластичность, полностью снимаются остаточные напряжения.

Рекристаллизация — это процесс зарождения и роста новых, т. е. неупрочненных, зерен из ориентированных вытянутых упрочненных зерен. Это связано с тем, что увеличение температуры поднимает энергетический потенциал атомов настолько, что последние получают возможность перегруппировок и интенсивного обмена местами.

Различают две стадии рекристаллизации — первичную и собирательную, которые протекают последовательно. Первичная стадия заключается в образовании зародышей и росте новых неупрочненных зерен. Зародышами новых зерен становятся имеющиеся в деформированном металле ячейки с относительно правильной решеткой. К правильным ячейкам-зародышам пристраиваются близлежащие атомы искаженной решетки, и начинает расти новое зерно с правильной решеткой за счет поглощения атомов деформированного зерна. Вследствие одинаковых возможностей роста новых зерен во всех направлениях новые зерна, образующиеся из зародышей, равноосны. Собирательная рекристаллизация заключается в объединении первичных мелких зерен в крупные зерна.

Рекристаллизация происходит во времени и с некоторой скоростью, величина которой зависит от температуры и степени деформации. Чем выше то и другое, тем выше скорость рекристаллизации.

Если проводить деформирование металла при повышенных температурах, то пластическая деформация тела сопровождается протеканием двух противоположных процессов — упрочнения и разупрочнения. Величина упрочнения определяется физической природой материала и степенью деформации, степень разупрочнения — полнотой прохождения процесса рекристаллизации, зависящей от времени и скорости рекристаллизации. Совокупность значений температуры, скорости и степени деформации называют термомеханическим режимом обработки давлением. От него зависит конечная кристаллическая структура, которую будет иметь металл после деформирования.

Размеры зерен, образующихся в результате рекристаллизации, зависят от температуры T_0 , степени ε и скорости v_d деформации. Величина зерна зависит также от времени выдержки металла при температуре выше $T_{\text{рекр}}$. На рис. 2.23 представлена объемная диаграмма рекристаллизации, показывающая размер зерна в зависимости от температуры и степени деформации.

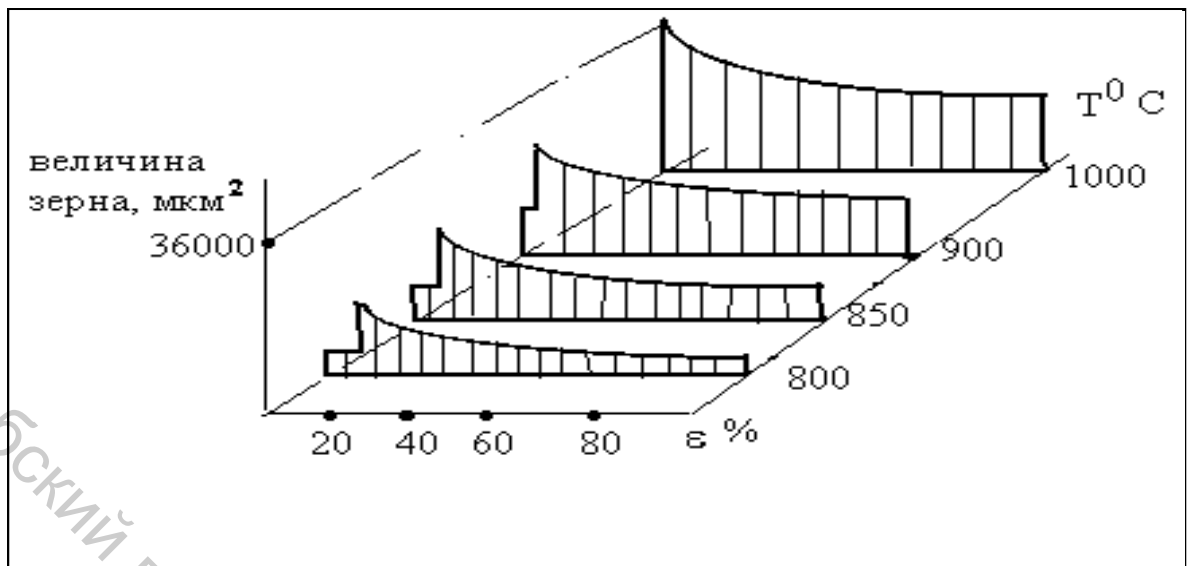


Рисунок 2.23

Из диаграммы видно, что размер зерна уменьшается с увеличением степени деформации и увеличивается с увеличением температуры.

Особенностью процесса рекристаллизации является наличие критической степени деформации (не более 8-10 %), при которой наблюдается резкий рост размеров рекристаллизованных зерен, причем с повышением температуры критическая степень деформации уменьшается.

Это явление объясняется тем, что при малых степенях деформации рекристаллизация происходит в результате внутрикристаллитных процессов без нарушения оболочки зерен и межкристаллитного вещества. Вследствие этого увеличение размеров зерен затруднено.

При критических степенях деформации число центров кристаллизации остается небольшим, а межкристаллитное вещество частично разрушается, в результате чего соседние кристаллиты соприкасаются между собой и срастаются в крупные зерна. Дальнейшее повышение степени деформации приводит к увеличению числа центров кристаллизации, а следовательно, и числа рекристаллизованных зерен, что при данном объеме тела влечет за собой уменьшение размеров зерен.

С увеличением температуры прочность межкристаллитного вещества все более уменьшается, и непосредственное соприкосновение кристаллитов происходит при все более малых степенях деформации. Этим объясняется то, что с повышением температуры критическая степень деформации смещается к началу координат.

Что касается относительного роста зерна с увеличением температуры при всех степенях деформации, то это объясняется тем, что с увеличением температуры увеличиваются подвижность атомов и возможность их перехода от деформированных к новым равноосным зернам.

Рост новообразованных равноосных зерен происходит не только за счет слияния нескольких мелких зерен в одно крупное, но и за счет перехода атомов одного зерна через границу раздела к другому зерну. Причем на одном участке

зерно может расти за счет другого зерна, а на другом участке поглощаться другим соседним зерном.

В результате рекристаллизационного отжига (вид термообработки поковок) металл, имеющий текстуру деформации, меняет ее на текстуру рекристаллизации, при которой равноосные рекристаллизованные зерна имеют одинаковые направления кристаллографических осей в пространстве. Это объясняется преимущественной ориентировкой кристаллографических осей у зародышей зерен.

Величина зерна в конечном продукте играет существенную роль в части механических свойств металла. Мелкозернистая структура повышает механическую прочность, усталость и ударную вязкость металла. Поэтому при пластическом деформировании и последующей термообработке необходимо выбирать такие режимы обработки, при которых образовывалась бы мелкозернистая структура.

2.10 Холодная и горячая деформация металлов

Упрочнение (наклеп) и разупрочнение (рекристаллизация) при обработке давлением идут во времени с определенными скоростями. В зависимости от того, какой процесс будет преобладающим, результат деформации будет различным. По С.И. Губкину, различают холодную, неполную холодную, неполную горячую и горячую пластические деформации.

Холодную деформацию проводят при температурах ниже температуры возврата, она сопровождается упрочнением и изменением структуры металла. Возврат и рекристаллизация полностью отсутствуют. Неполную холодную деформацию проводят при температурах возврата — $(0,25-0,3)T_{пл}$. Рекристаллизация отсутствует, но процесс возврата (снятие напряжений) успевает произойти. Ресурс пластичности у металла выше, а упрочнение практически соответствует упрочнению при холодной обработке.

Неполную горячую деформацию проводят при температурах, близких к температуре начала рекристаллизации $(0,4 T_{пл})$. Рекристаллизация протекает частично. Металл одновременно содержит два типа микроструктур, в поковке наряду с упрочненными деформированными зернами имеются и разупрочненные рекристаллизованные. Это приводит к неравномерности деформаций при обработке.

Горячая деформация проводится при температурах выше температуры рекристаллизации. Рекристаллизация успевает произойти полностью, т.е. деформированные искаженные зерна полностью заменяются на новые равноосные зерна. В результате металл получает полностью рекристаллизованную равноосную структуру без каких либо следов упрочнения.

Горячая обработка имеет определенные преимущества и недостатки по сравнению с холодной. Основные преимущества состоят в следующем.

1. Меньшая опасность разрушения. Благодаря процессу рекристаллизации становится возможным весьма значительное пластическое формоизменение

заготовки до наступления разрушения. Существует ряд металлов (цинк, вольфрам, молибден и др.), которые ввиду чрезмерной хрупкости в холодном состоянии возможно обрабатывать только в горячем состоянии.

2. Возможность применения оборудования меньшей мощности, т. к. в горячем состоянии отсутствует упрочнение и снижается критическое касательное напряжение, необходимое для скольжения.
3. Устранение промежуточного отжига. При холодной деформации и значительном формоизменении накапливаются повреждения, микротрещины и др., что приводит к разрушению металла. Это заставляет повышать ресурс пластичности введением в техпроцесс промежуточных отжигов. При горячем деформировании отжиг происходит в процессе самой операции.
4. Возможность получать мелкозернистую структуру, которая повышает прочность, ударную вязкость и усталостную прочность металла по сравнению с крупнозернистой структурой. Для этого горячую обработку нужно заканчивать при температурах, лишь немного превышающих минимальную температуру рекристаллизации. В этом случае образовавшиеся новые рекристаллизованные зерна не успевают вырасти, и структура получается мелкозернистой.
5. Текстура и анизотропия свойств металла, деформированного в горячем состоянии, всегда меньше выражены, чем в тех же самых металлах, деформированных в холодную.

К недостаткам горячего деформирования следует отнести следующее.

1. Трудность поддержания постоянной высокой температуры.
2. Низкое качество поверхности.
3. Снижение точности размеров поковок, необходимость учета усадки, уга-ра.
4. Неоднородность структуры и свойств поковок.

2.11 Основные законы деформирования

Закон наименьшего сопротивления

Любая материальная частица деформируемого тела, имеющая возможность движения в разных направлениях, движется в направлении наименьшего сопротивления.

Для случая осадки между параллельными бойками перемещение любой точки тела в плоскости, перпендикулярной действию внешней силы, происходит по кратчайшей нормали к периметру сечения. Максимальную конечную деформацию тело получит в тех направлениях, по которым будет передвигаться наибольшее количество частиц.

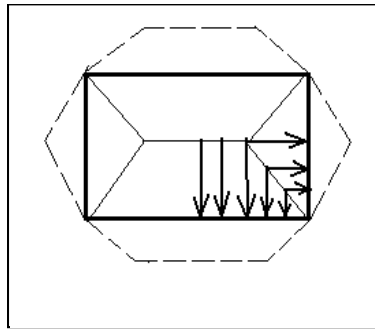


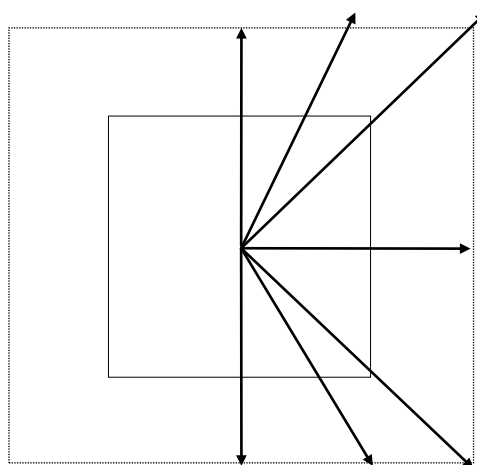
Рисунок 2.24

Для призмы, изображенной на рис. 2.24, в плоскости, перпендикулярной действию силы, согласно принципу перемещения точек по кратчайшей нормали, прямоугольник можно разделить на два треугольника и две трапеции. Граничные линии между ними представляют собой линии раздела течения металла, т. к. нормали из этих точек в двух направлениях будут одинаковы.

Учитывая количество точек, лежащих на обозначенных стрелками направлениях течения, можно предполагать, что после некоторой осадки конечная форма тела получит вид, показанный пунктиром. При увеличении степени деформации периметр поперечного сечения тела стремится к эллипсу, а эллипс в дальнейшем преобразуется в круг, после чего движение точек будет происходить по радиусам.

Здесь реализуется принцип наименьшего периметра: любая форма поперечного сечения призматического или цилиндрического тела при осадке с наличием контактного трения стремится принять форму, имеющую при данной площади наименьший периметр (стремится к кругу). Принцип наименьшего периметра справедлив, если величина коэффициента контактного трения значительна.

При осадке прямоугольного параллелепипеда между плоскими бойками без контактного трения (рис. 2.25) движение частиц носит радиальный характер, и поперечные сечения в процессе деформации остаются подобными исход-



ному.

Рисунок 2.25

Из закона наименьшего сопротивления вытекает принцип минимума полной энергии деформации. Его можно сформулировать так: **любое ограничение течению металла увеличивает энергию деформации**, т.е. минимум энергии затрачивается тогда, когда формоизменение происходит без ограничения течения, по линиям наименьшего сопротивления.

Рассмотрим осадку в кольцах (рис. 2.26).

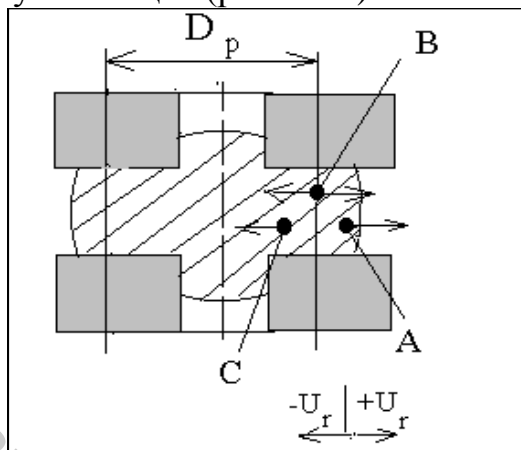


Рисунок 2.26

Кинематически возможные направления перемещения точек А, В и С – это $+U_r$ и $-U_r$. Опыт показывает, что точка А имеет перемещение $+U_{ra}$, а точка С — $-U_{rc}$, т. е. часть металла течет к периферии, а часть к центру. Частицы типа точки В, где $U_r = 0$, образуют поверхность раздела течения.

Теперь ограничим возможность течения к периферии, надев наружное кольцо, или ограничим возможность течения к центру, заглушив отверстия в кольцах (рис. 2.27). В этих случаях для частиц остается только одно возможное направление перемещения.

В случае отсутствия ограничения, когда частица А имела две степени свободы, она перемещалась к периферии по направлению $+U_r$, что является для нее линией наименьшего сопротивления.

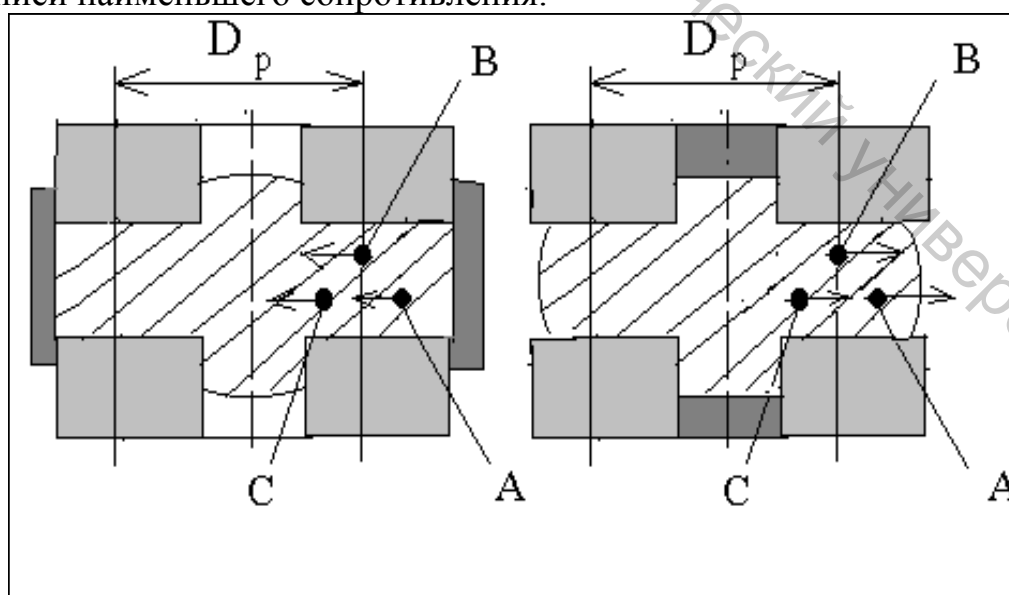


Рисунок 2.27

При введении наружного ограничения (кольцо) частица A движется к центру. Теперь для нее направлением наименьшего сопротивления является направление $-U_r$, но это направление уже не является направлением абсолютно наименьшего сопротивления. Для деформации на Δh при одной степени свободы течения требуются большее усилие и, следовательно, большая энергия, чем при двух степенях свободы.

Пример показывает, что между силой и характером формоизменения существует связь, т. е. $A_d = f(D_p)$, где A_d — работа деформирующей силы на пути Δh ; D_p — линия раздела ($U_r = 0$). Исследуя эту функцию на экстремум, можно отыскать значение D_p (линия раздела), соответствующее минимуму работы A_d . Обеспечив течение металла именно с этой линии раздела, можно добиться наилучшего протекания процесса.

Условие постоянства объема

Поскольку плотность металла в результате пластической деформации меняется незначительно, считается, что объем тела до деформации равен объему тела после деформации. В этом состоит закон постоянства объема. Однако в процессе деформации объем тела уменьшается, т. к. пластическая деформация всегда сопровождается упругой деформацией. После окончания деформации упругая деформация исчезает, и тело восстанавливает прежний объем. Зависимость упругой деформации от напряжения подчиняется закону Гука: $\sigma = E\varepsilon$. В большинстве операций обработки давлением при значительной пластической деформации упругой деформацией можно пренебрегать. Однако в ряде операций, например, при гибке в холодную, упругую деформацию необходимо учитывать, задавая угол в инструменте (штампе) отличным на угол пружинения от требуемого угла готовой детали.

Скоростью деформации называется изменение степени деформации в единицу времени или относительное смещение объема в единицу времени: $\delta\bullet = d\delta/dt = dV_c/Vdt$. Для малых степеней деформации $\varepsilon\bullet = d\varepsilon/dt$. При постоянной скорости, а также для средней скорости $\delta\bullet = \delta/t$ и $\varepsilon\bullet = \varepsilon/t$.

От скорости деформации следует отличать скорость деформирования (скорость движения деформирующего инструмента), а также скорость смещения тех или иных точек тела в процессе деформирования. Рассмотрим влияние скорости деформации на пластичность и сопротивление деформированию.

Обычно определение механических свойств металла проводят на испытательных машинах при скоростях деформирования порядка 10 мм/с. Реальные технологические процессы проводят на прессах со скоростями 100–500 мм/с, а на молотах 5–10 м/с, т. е. скорости деформации и деформирования существенно выше, чем при испытаниях.

С увеличением скорости деформации напряжение текучести материала возрастает, а пластичность падает. При холодной деформации это влияние скорости на механические характеристики материала значительно ниже, чем при

горячей обработке. Поэтому формулы, описывающие зависимость свойств от скорости деформации, разные для холодного и горячего деформирования.

Закон неравномерности деформаций и напряжений

Равномерной называется деформация, показатели которой не зависят от координат. Пример равномерной деформации — осадка цилиндрической заготовки на плоских бойках при отсутствии контактного трения.

Однако большинство операций обработки давлением характеризуются неравномерностью деформации, которая вызывается следующими факторами.

1 Геометрические факторы

Рассмотрим осадку цилиндра диаметром D (рис. 2.28). Из-за несоответствия формы заготовки и инструмента деформация в различных вертикальных сечениях получается неодинаковой: в сечении A_0A_2 она максимальна (ΔH), в окрестностях точки B тело совсем не деформировано (точка B просто переместилась в точку B_1): $\varepsilon_A = \Delta h / h_0, \varepsilon_B = 0$.

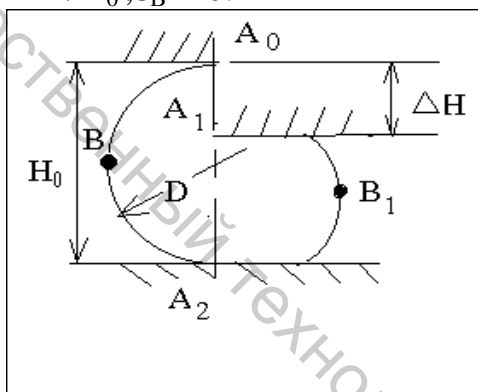


Рисунок 2.28

Рассмотрим другой пример, где осадка производится в конических бойках (рис. 2.29).

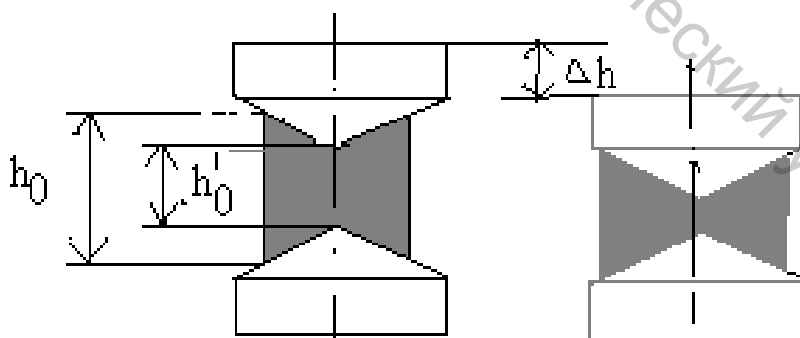


Рисунок 2.29

Здесь форма заготовки полностью соответствует форме инструмента. Однако особенности самой формы бойков делают относительную деформацию неравномерной по радиусу заготовки, хотя абсолютная деформация Δh одинакова для всех точек. На периферии $\varepsilon_0 = \Delta h / h_0$, а в центре $\varepsilon_1 = \Delta h / h_0^1$. Т.к. $h_0^1 < h_0$, то $\varepsilon_1 > \varepsilon_0$.

На практике из-за несоответствия форм инструмента и заготовки чаще всего встречаются случаи, когда неравномерны и абсолютная и относительная деформации.

Неравномерность деформации, обусловленная действием геометрических факторов, проявляется также в операциях листовой штамповки. Например, при гибке волокна получают разную деформацию по радиусу r и по знаку (рис. 2.30).

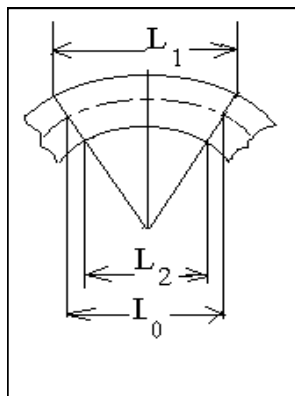


Рисунок 2.30

Как видно из рисунка, наружные волокна имеют длину L_1 большую, а внутренние волокна длину L_2 меньшую, чем длина L_0 нейтрального волокна.

$$\varepsilon_1 = \frac{L_1 - L_0}{L_0}, \quad \varepsilon_2 = \frac{L_2 - L_0}{L_0}.$$

Другой пример, при пробивке отверстия очаг пластической деформации сосредоточен в узкой зоне у самой кромки пуансона и матрицы, причем интенсивность деформации на самой кромке настолько велика, что приводит к местному разрушению заготовки.

2 Физические факторы

При осадке заготовки на плоских бойках ее форма соответствует форме инструмента, и все сечения получают одинаковые деформации $\varepsilon = \Delta h/h_0$.

Однако опыт показывает, что деформация по объему заготовки распределяется неравномерно. Вблизи торцов локальная относительная деформация $\varepsilon_{\text{л}}$ намного меньше (рис. 2.31), чем средняя, по объему: $\varepsilon_{\text{ср}} = (H_0 - H)/H_0$, а в средней части заготовки она, наоборот, значительно превосходит $\varepsilon_{\text{ср}}$. Это объясняется влиянием трения на контактных поверхностях.

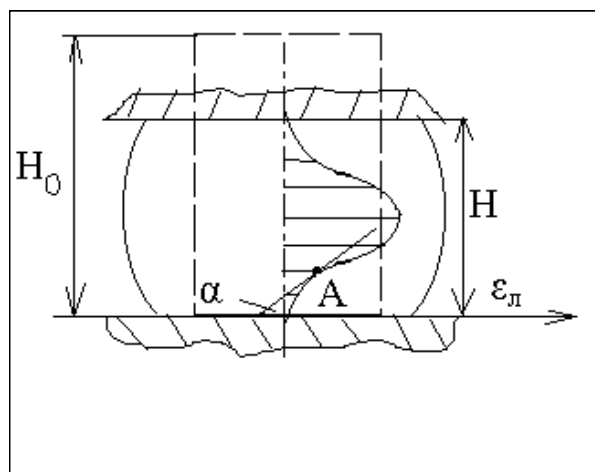


Рисунок 2.31

Для оценки неравномерности деформации пользуются коэффициентом $K_n = \epsilon_l / \epsilon_{cp}$, где $\epsilon_l = \Delta a / a$ — относительная локальная деформация, a — база координатной сетки, Δa — изменение базы после деформации.

Другой показатель неравномерности — градиент неравномерности деформации $\Gamma_n = \operatorname{tg} \alpha$, где α — угол наклона касательной к кривой $\epsilon_l = f(z)$ в точке A . Однако для определения K_n и Γ_n необходимо знать эту функцию. Неравномерность деформации связана с неравномерным необратимым изменением отдельных частей тела.

Пусть в деформируемом теле (рис. 2.32 а) две части A и B разграничены условной поверхностью mn . Предположим, что эти две части в результате приложения внешней силы получают различные изменения размеров. Если бы элементы A и B могли изменять свою форму обособленно друг от друга, то в результате деформации они приняли бы вид, как на рис. 2.32 б. Однако при деформации соблюдается условие сплошности тела и частицы «к» элемента A взаимодействуют с частицами «к» элемента B .

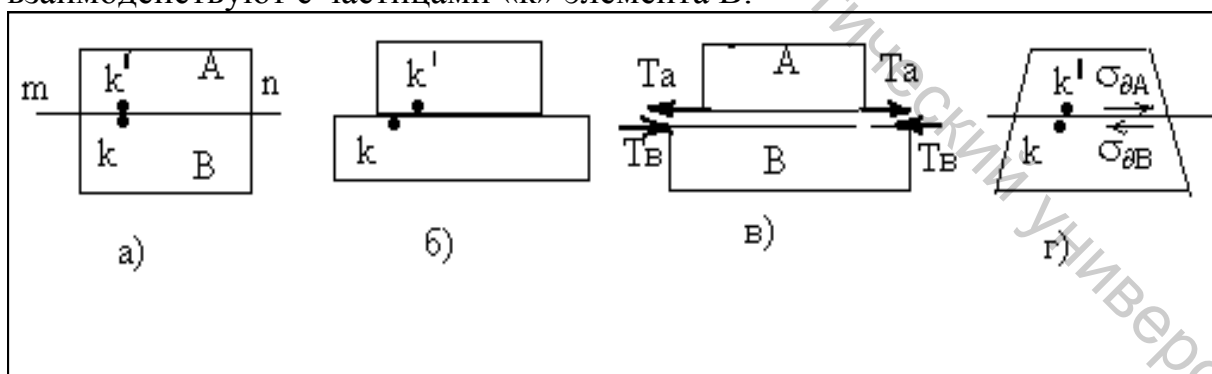


Рисунок 2.32

Поэтому элемент B передает на элемент A силы T_a , стремящиеся увеличить размеры A , а элемент A , наоборот, передает на элемент B силы T_b , стремящиеся сдержать его деформацию (рис. 2.32 в). Таким образом, на границе элементов, деформирующихся с разной интенсивностью, возникают взаимно уравновешивающиеся внутренние напряжения σ_{0A} и σ_{0B} (рис. 2.32 г). Их называют *дополнительными* напряжениями, т.к. они не зависят от схемы напряженного состояния, определяемой внешними силами, а возникают как следствие

разницы в деформациях отдельных элементов тела. Дополнительные напряжения так же, как и остаточные, разделяют на три рода. *Это и есть закон неравномерности деформаций и дополнительных напряжений.* Для снижения неравномерности деформаций стремятся, чтобы заготовка соответствовала форме инструмента, используют современные нагревательные устройства и средства механизации подачи заготовок, исключая подстуживание заготовок (избегают неравномерности температурного поля), силы контактного трения уменьшают подбором смазок.

Для того, чтобы уменьшить стадию до штамповки (окончательное формоизменение), с помощью заготовительных ручьев приближают форму заготовки к форме готовой детали, при проектировании штампов избегают резких переходов между поверхностями поковки.

Закон подобия

Постановка эксперимента на натуральных изделиях сопряжена с большими затратами. Поэтому часто исследования проводят на моделях, размеры которых значительно меньше размеров изделия, и переносят результаты на процесс, подлежащий освоению. Чтобы данные, полученные в лаборатории на модели, можно было распространить на натуральный объект, необходимо выполнить ряд условий, вытекающих из закона подобия.

Закон подобия устанавливает соответствие силовых условий деформации двух тел разных размеров (модели и натуре), если тела геометрически и физически подобны, а их формоизменение осуществляется в определенных условиях.

При деформации модели и натуре удельные силы должны быть одинаковы; деформирующие силы должны соотноситься, как квадраты отношений сходственных размеров; работы деформации должны соотноситься, как кубы отношений сходственных размеров.

Тела считаются геометрически подобными, если имеют одинаковую форму и постоянное отношение сходственных размеров: $L_n/L_m = V_n/V_m = H_n/H_m = n$. Величина n называется константой подобия. Отношение поверхностей натуре и модели равно квадрату, а объемов — кубу константы подобия. Геометрическое подобие должно выполняться для всех стадий процесса деформирования. Требование геометрического подобия модели и натуре приводит к необходимости геометрического подобия деформирующих инструментов.

Физическое подобие включает следующие требования: физико-химические и механические свойства модели и натуре должны быть одинаковыми в исходном состоянии и в любой момент деформации; температурные режимы деформации модели и натуре должны быть одинаковыми в любой момент деформации; скорости и степени деформации модели и натуре должны быть одинаковыми; трение на контактных поверхностях модели и натуре должно быть одинаковым.

Эти требования выполняются, если материал и шероховатость рабочих поверхностей штампов, качество смазки, скорость скольжения материала по

инструменту одинаковы для модели и природы. Отсюда вытекает необходимость равенства скоростей деформирования модели и природы.

Приведенные требования физического подобия противоречивы. Например, равенство степеней и скоростей деформации требует равенства времени деформации. Если времена не равны, то процессы упрочнения и рекристаллизации при горячей деформации в модели и природе протекают неодинаково. Поэтому при деформации с нагревом соблюдение условия равенства времен деформации необходимо. Но, с другой стороны, при равенстве времен нельзя выполнить требование одинаковости температур, т.к. имеет место разная теплоотдача модели и природы в инструмент (из-за разных объемов и площадей поверхностей). Есть и другие противоречия.

Например, для тождественного распределения температуры в модели и природе необходимо, чтобы время их деформации удовлетворяло условию $t_m = t_n/n^2$, т.к. время деформации пропорционально площади поверхности, а поверхности модели и природы соотносятся как n^2 . Отсюда следует равенство $\varepsilon_m = \varepsilon_n/n^2$, которое противоречит требованию о равенстве скоростей деформации.

Таким образом, точное моделирование операций пластического деформирования неосуществимо. Погрешность, вносимая при невыполнении каких-либо требований физического подобия, может быть учтена коэффициентами несоответствия, т.е. поправочными коэффициентами, которые определяются опытным путем. Например, несоответствие в скоростях деформации модели и природы можно учесть скоростным коэффициентом Ψ_c , а различия в условиях теплопередачи и температуры конца деформации — с помощью масштабного коэффициента Ψ_m .

Тема 3. Основы теории электрофизических и электрохимических методов обработки (ЭФЭХ)

3.1 Характеристика электрофизических и электрохимических методов обработки

Эти методы предназначены в основном для обработки заготовок из очень прочных, весьма вязких, хрупких и неметаллических материалов.

Эти методы имеют следующие преимущества:

– отсутствует силовое воздействие инструмента на заготовку (или очень мало и не влияет на суммарную погрешность обработки);

– позволяют менять форму поверхности заготовки и влияют на состояние поверхностного слоя: наклеп обработанной поверхности не образуется, дефектный слой незначителен; повышаются коррозионные, прочностные и другие эксплуатационные характеристики поверхности;

– можно обрабатывать очень сложные наружные и внутренние поверхности заготовок.

ЭФЭХ методы обработки являются универсальными и обеспечивают непре-

рывность процессов при одновременном формообразовании всей обрабатываемой поверхности. Эти методы внедряются в различных отраслях промышленности.

3.2 Электроэрозионные методы обработки

Эти методы основаны на явлении эрозии электродов из токопроводящих материалов при пропускании между ними импульсного электрического тока.

Разряд между электродами происходит в газовой среде или при заполнении межэлектродного пространства диэлектрической жидкостью – керосин, минеральное масло.

При наличии разности потенциалов на электродах происходит ионизация межэлектродного пространства. При определенном значении разности потенциалов образуется канал проводимости, по которому устремляется электроэнергия в виде импульсного искрового или дугового разряда.

На поверхности заготовки температура возрастает до $10000 \dots 12000$ °С. Происходит мгновенное оплавление и испарение элементарного объема металла, и на обрабатываемой поверхности образуется лунка.

Удаленный металл застывает в диэлектрической жидкости в виде гранул диаметром $0,01 \dots 0,005$ мм.

При непрерывном подведении к электродам импульсного тока процесс эрозии продолжается до тех пор, пока не будет удален весь металл, находящийся между электродами на расстоянии, при котором возможен электрический пробой ($0,01 \dots 0,05$ мм) при заданном напряжении.

Для продолжения процесса необходимо сблизить электроды до указанного расстояния. Электроды сближаются автоматически с помощью следящих систем.

3.2.1 Электроискровая обработка

Схема электроискровой обработки представлена на рис. 3.1.

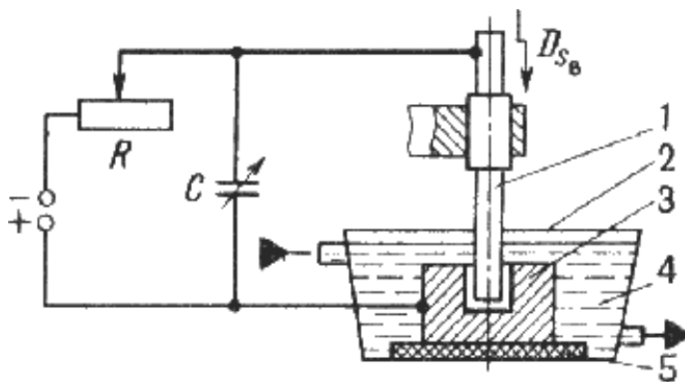


Рисунок 3.1– Схема электроискрового станка:

1 – электрод-инструмент; 2 – ванна; 3 – заготовка-электрод; 4 – диэлектрическая жидкость; 5 – изолятор

При электроискровой обработке используют импульсные искровые разряды между электродами (обрабатываемая заготовка (анод) – инструмент (катод)).

Конденсатор C заряжается через резистор R от источника постоянного тока напряжением 100...200 В. Когда напряжение на электродах 1 и 3 достигает пробойного, образуется канал, через который осуществляется искровой разряд энергии, накопленной конденсатором.

Продолжительность импульса 20...200 мкс.

Точность обработки до 0,002 мм, $R_z = 0,63...0,16$ мкм.

Для обеспечения непрерывности процесса (зазор = const) станки снабжаются следящей системой и системой автоматической подачи инструмента.

Получают сквозные отверстия любой формы поперечного сечения, глухие отверстия и полости, отверстия с криволинейными осями, вырезают заготовки из листа, выполняют плоское, круглое и внутреннее шлифование.

Изготавливают штампы и пресс-формы, фильеры, режущий инструмент.

Схемы электроискровой обработки представлены на рис. 3.2.

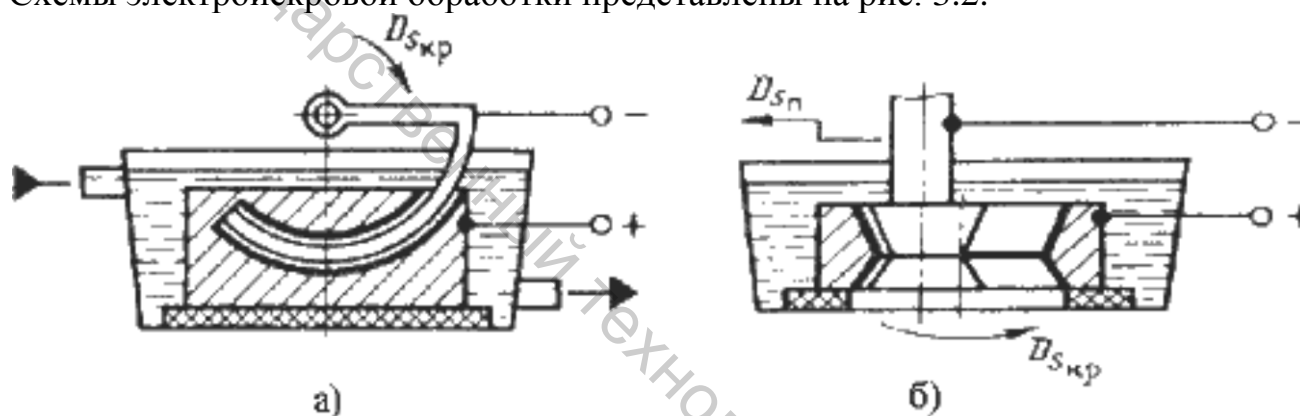


Рисунок 3.2– Схемы электроискровой обработки:

а) прошивание отверстия с криволинейной осью; б) шлифование внутренней поверхности фильеры

Электроискровую обработку применяют для упрочнения поверхностного слоя металла. На поверхность изделия наносят тонкий слой металла или композиционного материала. Подобные покрытия повышают твердость, износостойкость, жаростойкость, эрозионную стойкость и так далее.

3.2.2 Электроимпульсная обработка

При электроимпульсной обработке используют электрические импульсы большой длительности (5...10 мс), в результате чего происходит дуговой разряд.

Большие мощности импульсов от электронных генераторов обеспечивают высокую производительность обработки.

Электроимпульсную обработку целесообразно применять при предварительной обработке штампов, турбинных лопаток, фасонных отверстий в детали из коррозионно-стойких и жаропрочных сплавов.

Схема обработки показана на рис.3.3.

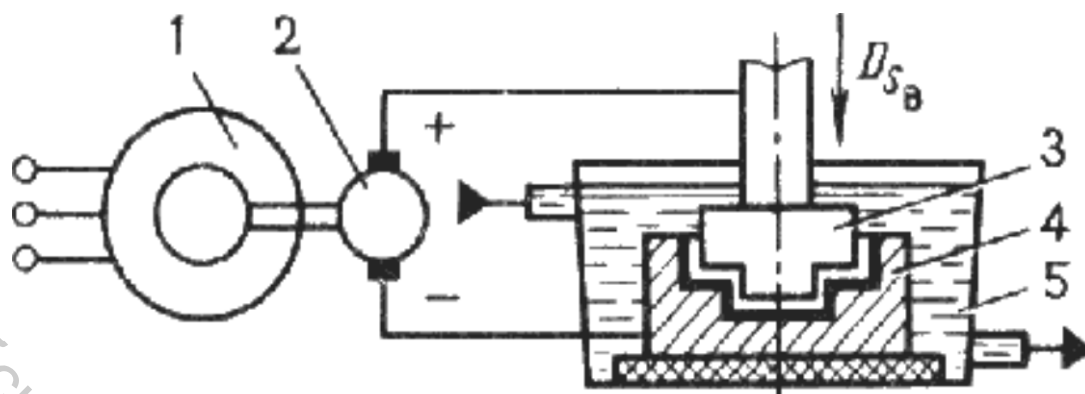


Рисунок 3.3– Схема электроимпульсной обработки:

1 – электродвигатель; 2 – импульсный генератор постоянного тока; 3 – инструмент-электрод; 4 – заготовка-электрод; 5 – ванна

3.2.3 Электроконтактная обработка

Электроконтактная обработка основана на локальном нагреве заготовки в месте контакта с электродом-инструментом и удалении размягченного или расплавленного металла из зоны обработки механическим способом: относительным движением заготовки или инструмента.

Источником теплоты служат импульсные дуговые разряды.

Этот вид обработки рекомендуется для крупных деталей из углеродистых и легированных сталей, чугуна, цветных сплавов, тугоплавких и специальных сплавов (рис.3.4).

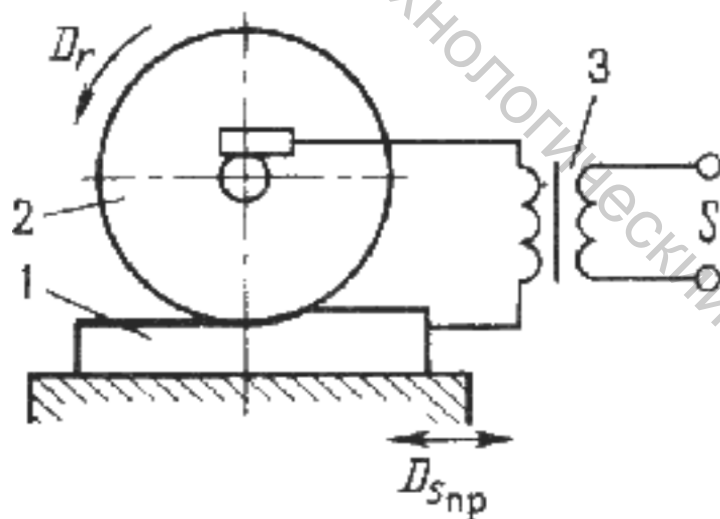


Рисунок 3.4 – Схема электроконтактной обработки плоской поверхности:

1 – обрабатываемая заготовка; 2 – инструмент-электрод; 3 – трансформатор

Этот метод применяют для зачистки отливок от заливов, отрезки литниковых систем, зачистки проката, шлифования коррозионных деталей из труднообрабатываемых сплавов.

3.3.2 Электрохимическая размерная обработка

Электрохимическая размерная обработка выполняется в струе электролита, прокачиваемого под давлением через межэлектродный промежуток.

Электролит растворяет образующиеся на поверхности заготовки анода соли и удаляет их из зоны обработки. Высокая производительность процесса заключается в том, что одновременно обрабатывается вся поверхность заготовки.

Участки, не требующие обработки, изолируют. Инструменту придают форму, обратную форме обрабатываемой поверхности. Формообразование происходит по методу копирования (рис. 3.6).

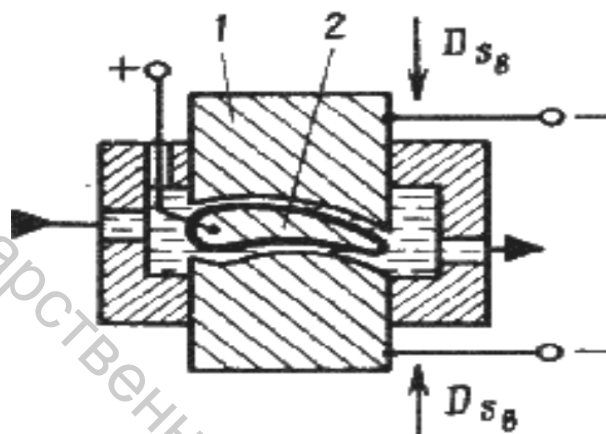


Рисунок 3.6 – Схема электрохимической размерной обработки:

1 – инструмент – катод; 2 – заготовка – анод

Точность обработки повышается при уменьшении рабочего зазора. Для его контроля используют высокочувствительные элементы, которые встраивают в следующую систему.

Этот способ рекомендуют для обработки заготовок из высокопрочных сталей, карбидных и труднообрабатываемых материалов. Также можно обрабатывать тонкостенные детали с высокой точностью и качеством обработанной поверхности (отсутствует давление инструмента на заготовку).

3.4 Комбинированные методы обработки

3.4.1 Электроабразивная и электроалмазная обработка

При таких видах обработки инструментом служит шлифовальный круг из абразивного материала на электропроводящей связке (бакелитовая связка с графитовым наполнителем).

Между анодом – заготовкой и катодом – шлифовальным кругом имеется зазор, куда подается электролит. Продукты анодного растворения удаляются абразивными зернами; шлифовальный круг имеет вращательное движение, а заготовка – движение подачи, которые соответствуют процессу механического шлифования (рис. 3.7).

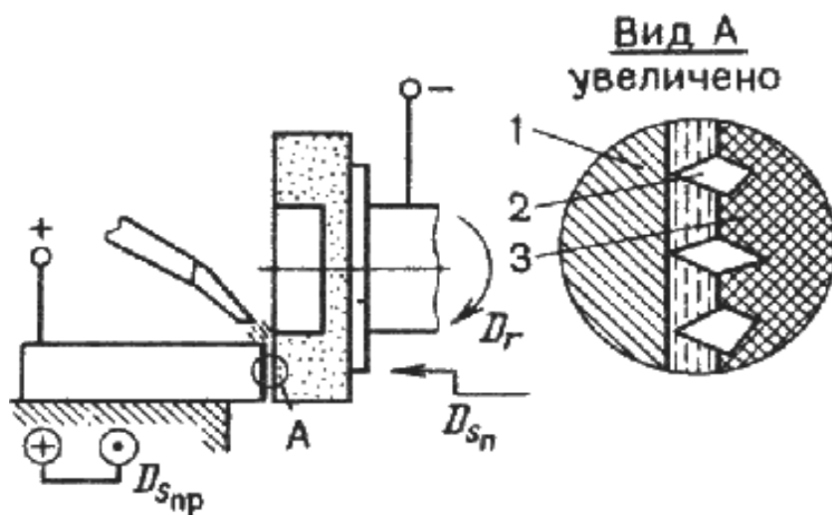


Рисунок 3.7 – Схема электроабразивного шлифования:

1 – заготовка; 2 – абразивные зерна; 3 – связка шлифовального круга

Введение в зону резания ультразвуковых колебаний повышает производительность в 2...2,5 раза при улучшении качества поверхности. Эти методы применяются для отделочной обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов, а также нежестких заготовок, так как силы резания незначительны.

3.5 Анодно-механическая обработка

Анодно-механическая обработка основана на сочетании электротермических и электромеханических процессов и занимает промежуточное место между электроэрозионным и электрохимическим методами.

Заготовку подключают к аноду, а инструмент – к катоду. В качестве инструмента используют металлические диски, цилиндры, ленты, проволоку.

Обработку ведут в среде электролита (водный раствор жидкого натриевого стекла).

Рабочие движения – как при механической обработке резанием.

Электролит в зону обработки подают через сопло (рис. 3.8).

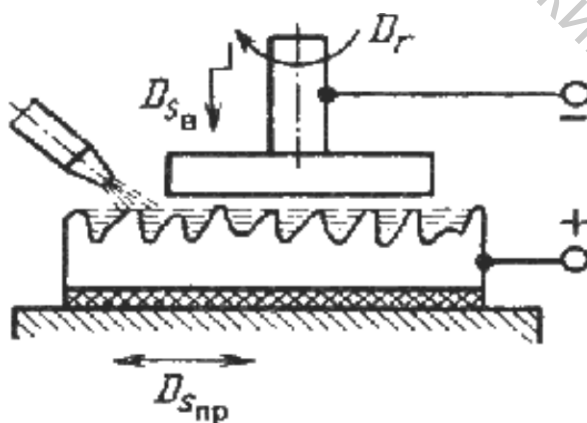


Рисунок 3.8 – Схема анодно-механической обработки плоской поверхности

При пропускании через раствор электролита постоянного электрического тока происходит процесс анодного растворения, как при электрохимической

обработке.

При соприкосновении инструмента с микронеровностями заготовки происходит электроэрозия, присущая электроискровой обработке. Металл заготовки в месте контакта с инструментом разогревается и разжижается. Продукты электроэрозии и анодного растворения удаляются при относительных движениях инструмента и заготовки.

Этим способом обрабатывают заготовки из высокопрочных и труднообрабатываемых сплавов, вязких материалов.

Этим способом разрезают заготовки на части, прорезают пазы и щели, обрабатывают поверхности тел вращения, шлифуют плоские поверхности и поверхности, имеющие форму тел вращения, полируют поверхности, затачивают режущий инструмент.

3.6 Лучевые методы обработки

3.6.1 Электроннолучевая обработка

Электроннолучевая обработка основана на превращении кинетической энергии направленного пучка электронов в тепловую энергию. Высокая плотность энергии сфокусированного электронного луча позволяет обрабатывать заготовку за счет нагрева, расплавления и испарения материала с локального участка.

Схема электроннолучевой обработки представлена на рис. 3.9.

Электронный луч образуется за счет эмиссии электронов с нагретого в вакууме катода. Он с помощью электростатических и электромагнитных линз фокусируется на заготовке.

При размерной обработке установка работает в импульсном режиме, что обеспечивает локальный нагрев заготовки.

Электроннолучевой метод эффективен при обработке отверстий диаметром 1...0,010 мм, при прорезании пазов, резке заготовок, изготовлении тонких пленок и сеток из фольги, изготовлении заготовок из труднообрабатываемых металлов и сплавов, керамики, кварца, полупроводникового материала.

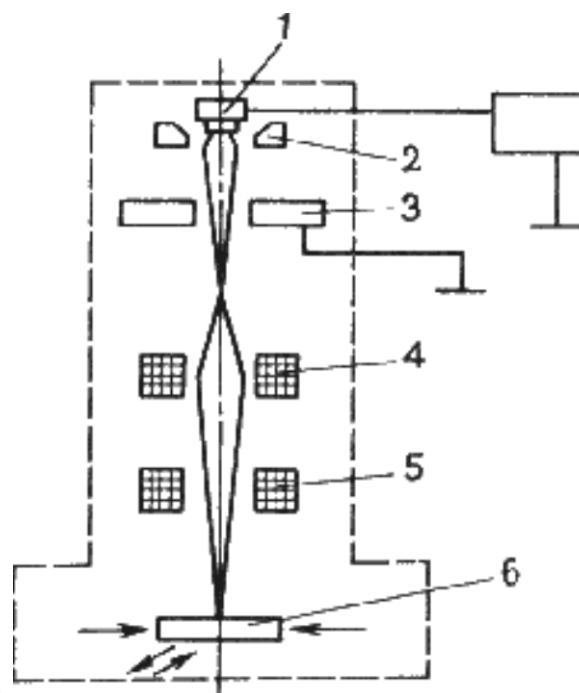


Рисунок 3.9 – Схема установки для электроннолучевой сварки:
 1 – катод электронной пушки; 2 – электрод; 3 – анод; 4 и 5 – отклоняющая магнитная система; 6 – заготовка

3.6.2 Лазерная обработка

Лазерная обработка основана на тепловом воздействии светового луча высокой энергии на поверхность заготовки. Источником светового излучения служит лазер – оптический квантовый генератор.

Энергия светового луча невелика (20...100 Дж), но она выделяется в миллионные доли секунды и сосредотачивается в луче диаметром 0,01 мм. Поэтому температура в зоне контакта 6000...8000 °С.

Слой металла мгновенно расплавляется и испаряется. С помощью этого метода осуществляется прошивание отверстий, разрезание заготовки, прорезание пазов в заготовках из любых материалов (фольга из тантала, вольфрама, молибдена). Также с помощью этого метода можно осуществить контурную обработку по сложному периметру.

3.7 Плазменная обработка

Сущность обработки заключается в том, что плазму направляют на обрабатываемую поверхность.

Плазменная струя представляет собой направленный поток частично или полностью ионизированного газа, имеющего температуру 10000...20000 °С. Плазму получают в плазменных горелках, пропуская газ через столб сжатой дуги. В качестве плазмообразующих газов используют азот, аргон, водород, гелий, воздух и их смеси.

С помощью этого метода прошиваются отверстия, вырезаются заготовки из листового материала, производится точение в заготовках из любых материалов.

При прошивании отверстий и разрезке головку устанавливают перпендикулярно к поверхности заготовки, при строгании и точении – углом $40...60^{\circ}$.

Плазменное напыление

Этот вид обработки осуществляется с целью упрочнения поверхности.

В камеру плазматрона подается порошкообразный конструкционный материал и инертный газ под давлением.

Под действием дугового разряда конструкционный материал плавится и переходит в состояние плазмы; струя плазмы сжимается в плазматроне газом. Выходя из сопла, струя направляется на обрабатываемую заготовку.

Тема 4. Основы теории гидроабразивной резки

Установки гидроабразивной резки (далее ГАР) начали использоваться не так давно и пока еще не нашли широкого применения.

Сам принцип гидроабразивной резки был разработан в США более 30 лет назад двумя инженерами др. Д.Ольсеном и др. Д.Чангом. Именно др. Д.Ольсен впервые в мире изготовил в 1973 г. т.н. гидравлический мультипликатор – надежный насос, способный создать поток воды с напором более 4000 атм. и расходом до 4 л/мин.

Основой принципа гидроабразивной резки металлов и материалов является способ разделения металлов и материалов с помощью водяной струи высокого давления. Вода, сжатая до давления до 3800 атм. первым основным компонентом системы, т.н. плунжерным насосом высокого давления, проходит через водяное сопло, образующее струю диаметром около 0.1 мм, которая попадает в т.н. смесительную камеру. В смесительной камере струя воды «подсасывает» абразив – гранатовый песок с частицами размером около 0.4 мм и далее проходит через второе, твердосплавное сопло с внутренним диаметром до 1 мм. Из этого сопла струя воды с абразивом выходит со скоростью около 1200 м/сек и попадает на поверхность разрезаемого материала. После резки этого материала остаточная энергия струи гасится специальной водяной ловушкой. Второй составной частью установки является координатный стол, позволяющий перемещать режущую головку с высокой точностью в трех координатах.

1 Основные преимущества метода гидроабразивной резки

Основными преимуществами метода гидроабразивной резки являются:

- возможность резки криволинейных поверхностей с высокой точностью с использованием системы CAD-CAM;

- возможность резки самых разнообразных, в т.ч. и сверхтвердых, материалов (высокопрочные сплавы, стекло, керамика, углепластики и другие композитные материалы и т.п.) с высокой скоростью;
- возможность обработки сразу “под размер” достаточно больших деталей (до 2.5 метров и более, что исключает необходимость последующей мехобработки);
- возможность осуществления резки с самыми разными скоростями – от 1 мм/мин до 5000 мм/мин и более, в зависимости от типа и толщины разрезаемого материала;
- обеспечение достаточно высокого качества разрезаемой поверхности;
- возможность фасонной резки достаточно толстых материалов (сталь – до 400 мм, бетон, в т.ч. с арматурой – до 1000 мм);
- полная взрыво- и пожаробезопасность реза, что позволяет резать взрывчатые вещества, нефте- и газосодержащие емкости и трубопроводы и т.п.;
- низкая температура реза, что позволяет избежать недопустимого в отдельных случаях нагрева разрезаемого материала и материалов;
- возможность резки чистой водой (без абразива) разнообразных мягких материалов – полиуретан, поролон, пластмассы и т.п.;
- универсальность установки, позволяющая резать на одной установке самые разнообразные материалы;
- малое количество потребляемой при резке воды;
- возможность осуществления резки на расстоянии до 200 м от насоса;
- возможность резки самых разнообразных “сэндвичей”, которые иными способами не режутся в принципе;
- конструкционная (но не технологическая) простота установки, позволяющая ей работать по 24 часа в сутки в течение 10 и более лет в сутки с малыми останковками на ремонт и сервис.

2 Сравнение метода гидроабразивной резки с другими методами обработки материала

По своему назначению УГАР более всего близки к вертикальным фрезерным станкам, поэтому обычно их работу сравнивают со следующими методами обработки металлов и материалов:

- 2.1 лазер;
- 2.2 фрезерование;
- 2.3 плазма;
- 2.4 прессование (пробивные прессы);
- 2.5 электроискровая обработка.

Ниже приводится сравнение УГАР с этими методами обработки металлов с объяснением, почему и в чем гидроабразивный метод превосходит иные. С

целью более объективной информации мы приводим также и сильные стороны каждого из этих сравниваемых методов.

2.1 Сравнение с лазером

Сильные стороны лазерной резки.

- Очень высокие скорости резки тонких, не отражающих свет материалов, таких, как тонкие металлические листы.
- Высокая точность резки тонких материалов (± 0.025 мм и выше).

Сильные стороны резки на УГАР в сравнении с лазером.

- Возможность высокоточного (± 0.08 to ± 0.1 мм) изготовления деталей толщиной до 80 мм и резки гораздо более толстых материалов практически любого вида.
- Холодный рез без оплавления материалов.
- Полное отсутствие изменения свойств зоны вблизи резки, в отличие от лазера, который выжигает легирующие материалы при резке нержавеющей сталей, в результате чего такая сталь через определенное время в этой зоне ржавеет.
- Отсутствия зоны термического влияния, что исключает необходимость последующей мехобработки деталей.
- Полное отсутствие каких-либо вредных газов.

Необходимо отметить также, что современные мощные лазеры, которые способны резать даже стекло, в среднем в два и даже три раза дороже УГАР. Фактически единственное преимущество их – это более быстрая резка тонких листов. Однако если эти листы сложить в стопку, то и это преимущество исчезает. Специально для резки тонких листов OMAX разработал программу, которая дает оптимальное количество листов в стопке, дающее наиболее высокие скорости резки одного листа. Тем самым единственное преимущество лазера исчезает.

2.2 Сравнение с точным фрезерованием

Сильные стороны обрабатывающих фрезерных центров.

- Давно знакомая и изученная технология.
- Возможность изготовления трехмерных деталей.
- Высокая скорость обработки больших серий деталей.

Сильные стороны резки на УГАР в сравнении с фрезерованием.

- Очень быстрое и простое перепрограммирование, не требующее наличия квалифицированного программиста.
- Очень малые нагрузки на деталь при обработке, что облегчает обработку сложных деталей, особенно с тонкими стенками.
- Наличие только одного режущего устройства, что делает ненужным закупку и поддержку в рабочем состоянии большого количества фрез.
- Гораздо большие размеры обрабатываемых деталей при равных ценах на оборудование.
- Практическое полное отсутствие заусенцев.
- Минимальное количество стружки и полная ее экологическая безопасность (отсутствие масла и СОЖ).

2.3 Сравнение с плазменной резкой

Сильные стороны резки плазмой.

- Относительно низкие капитальные затраты.
- Быстрые скорости резки, в особенности для малых толщин.

Сильные стороны резки на УГАР в сравнении с плазмой.

- Полное отсутствие плавления при резке, что исключает появление окалин, окисленного металла и т.п.
- Отсутствие зон термического влияния, что исключает необходимость в последующей металлообработке.
- Широкий диапазон разрезаемых материалов и их толщин.
- Более высокая точность при резке криволинейных деталей.
- Полное отсутствие создания вредных газов и соединений (из-за чего плазменные аппараты на Западе полностью переведены сейчас на работу под слоем воды).

2.4 Сравнение с пробивными прессами

Сильные стороны пробивных прессов.

- Давно знакомая и изученная технология.
- Высокая скорость обработки больших серий деталей.
- Относительно низкие капитальные затраты (однако без учета стоимости изготовления новых пуансонов и матриц).

Сильные стороны резки на УГАР в сравнении с пробивными прессами.

- Очень быстрое программирование резки новых типов деталей.
- Полное отсутствие повреждения краев близко расположенных отверстий (толщина перемычки между двумя отверстиями может быть 0,5мм и даже меньше).
- Отсутствие заусенцев.
- Возможность работы в широком диапазоне толщин металла.
- Возможность работы в широком диапазоне видов материалов.
- Отсутствие необходимости в широком наборе инструмента.

2.5 Сравнение с электроискровым методом

Сильные стороны электроискрового метода.

- Исключительно высокая точность обработки (до ± 0.025 mm).
- Возможность точной обработки очень толстых (свыше 30 см) металлов.

Сильные стороны резки на УГАР в сравнении с электроискровым методом.

- Гораздо более высокая (от пяти до десяти раз) скорость резки.
- Отсутствие зоны термического влияния.
- Возможность работы как с проводящим, так и с непроводящими материалами.
- Отсутствие необходимости начального сверления отверстия для начала процесса резки.

Описание основных компонентов УГАР

Описание координатного стола

Установки гидроабразивной резки (далее УГАР) – рис.4.1, 4.2 состоят из двух основных частей – координатного стола и насоса сверхвысокого давления.



Рисунок 4.1 – Установка УГАР



Рисунок 4.2 – Установка УГАР

Консольные столы изготавливают с тремя размерами рабочих столов – 610 x 610 мм, 1430 x 660 мм и 2540 x 1400 мм. Консольный тип стола имеет ряд пре-

имущества перед мостовым типом: такие столы поставляются в уже собранном готовом виде, не требуют монтажа, не боятся внешних вибраций, свободно могут переноситься с место на место и, главное, обладают жесткостью, обеспечивающей высокую точность резки. Мост стола закреплен жестко на станине, которая является одновременно ловушкой струи и поэтому содержит не менее от одной до трех тонн воды. Такой вес обеспечит массивность всей конструкции и придаст ей особую жесткость.

На мосте стола, жестко прикрепленном к ловушке, располагается передвижное плечо установки, а на нем – режущая головка, способна перемещаться по оси Z. На плече укреплен небольшой контейнер с абразивом. На конце плеча расположена режущая головка (см. рис. 4.3).



Рисунок 4.3– Режущая головка

Описание насосов

Используются насосы мультипликаторного и прямого типа. В них, как и в гидравлических мультипликаторах, высокое давление создается в т.н. цилиндрах ВД путем перемещения в них поршней. Однако, в отличие от мультипликаторной схемы, возвратно-поступательное перемещение этих поршней осуществляется путем применения обычного кривошипно-шатунного механизма, в котором вал вращается от электродвигателя с редуктором.

Такой привод (иначе называется «прямого действия») обеспечивает ряд преимуществ перед мультипликаторной схемой, основными из которых являются следующие:

- В насосах ВД при достигаемых в них давлениях вода, двигаемая поршнем ВД, сжимается до 15% от своего объема. Поскольку в конечной точке движения поршня не весь объем воды выходит из цилиндра ВД через соответствующий клапан, оставшаяся в цилиндре ВД при отходе поршня разжимается, увеличиваясь в объеме и, соответственно, высвобождая накопленную в ней кинетическую энергию. В мультипликаторных насосах эта энергия переходит в тепло, передаваемое маслу гидросистемы насоса, что, в свою очередь, приводит к необходимости охлаждения этого масла и, соответственно, уменьшению КПД установки. В насосах с прямым приводом эта кинетическая энергия переходит в энергию вращения маховика. Поэтому эти насосы не требуют охлаждения, их КПД много выше, а приведенная мощность таких насосов значительно меньше, чем у насосов мультипликаторного типа.
- В насосах прямого действия отсутствует сложная гидравлическая система, что делает их более простыми и менее дорогими.
- В мультипликаторных насосах поршень перемещается с частотой около одного хода в секунду, что вызывает необходимость применения в них т.н. аккумулятора – сосуда, в котором происходит выравнивание давления, т.к. в каждом из двух цилиндров ВД давление падает от максимального до нуля. Но даже при наличии аккумулятора давление на входе колеблется в пределах 10% от номинала, т.е. приблизительно на 400 атм., что вызывает неравномерность в работе насоса. В то же время поршни насоса прямого действия двигаются с частотой 30 раз в секунду, что исключает необходимость в аккумуляторе и дает практически равномерное давление воды в системе. Это также улучшает качество резки и снижает стоимость установки.
- Насосы прямого действия, в отличие от мультипликаторных насосов, могут плавно менять свое давление от максимума до нуля, что расширяет возможности их применения.
- Насосы прямого действия гораздо более просты в обслуживании и не требуют работы квалифицированных гидравликов.

Таблица 4.1 – Основные данные насосов

Модель	P2040V	P3050V	P4055V
Давление, атм.	0-2750	0-3450 атм.	0-3790 атм.
Напор, л/мин.	1.5 – 2.8	1.5 – 3.2	1.7 – 4.0
Вес, кг	848		885
Мощность, КВт	15	22	30
Габариты, мм	1840 x 920 x 905	1840 x 920 x 905	1840 x 920 x 905

Все насосы имеют следующие устройства:

- предохранительный клапан;
- консольный пульт управления с дополнительным источником питания, дисплеем и аварийным выключателем;
- автоматический запорный клапан для случая отключения питания;
- бустерный насос.

Насос требует минимального давления воды на входе. При пуске насоса не наблюдается пик тока. Имеется встроенная система водяного охлаждения уплотнений насоса. Насос имеет низкий уровень шума и вибрации. Все компоненты насоса легкодоступны для обслуживания и ремонта.

Математическое обеспечение работы УГАР

Одной из программ является программа Intelli-Nest, встроенная непосредственно в контроллер. Она обеспечивает автоматический выбор оптимального размещения вырезаемых деталей на поверхности заготовки, имея в виду как экономию материала, так и уменьшение «холостого хода» режущей головки.

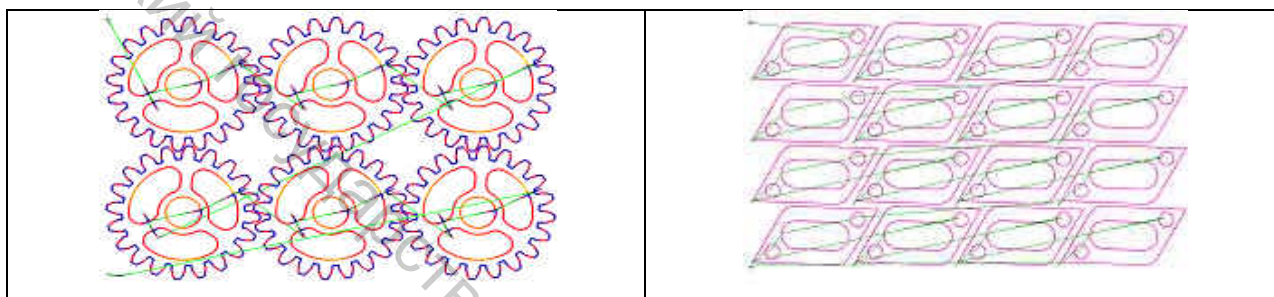


Рисунок 4.4 –Пример размещения заготовок на листе при помощи программы Intelli-Nest

Intelli-Pierce

Программа Intelli-Pierce обеспечивает наиболее быстрое пробивание (прошивание) отверстий в металле для начала резки внутренних контуров, включая и определение оптимального места этого прошива. При этом используется т.н. динамическое прошивание, при котором интенсивность струи колеблется с определенной частотой, что ускоряет процесс пробивания отверстия и тем самым снижает общее время резки, особенно при резке многочисленных одинаковых деталей. Само общее время прошивки указывается в отчете о работе отдельным показателем.

Intelli-Taper

Программа Intelli-Taper обеспечивает нахождение оптимальной скорости резки на каждом участке. При этом контроллер автоматически анализирует положение приблизительно 80 точек на каждый миллиметр длины реза.

Система подачи абразива

На установке стоит небольшой контейнер с абразивом, который необходимо пополнять в среднем раз в час. Однако для непрерывной работы можно приобрести автоматическую систему подачи абразива на 230 кг, которую необ-

ходимо пополнять приблизительно один раз в день. Устройство может располагаться на расстоянии до 6 метров от стола.

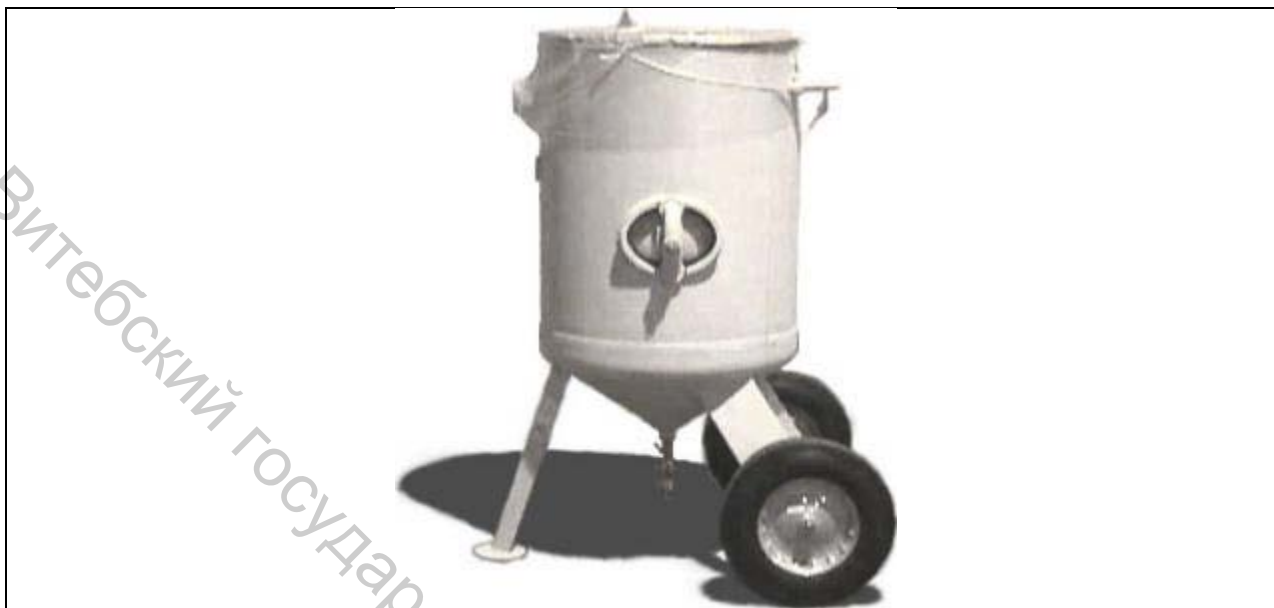


Рисунок 4.5 – Автоматическая система подачи абразива

Тема 5. ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

5.1 Технологический процесс изготовления деталей из порошков

Технологический процесс изготовления деталей или заготовок из порошков включает следующие операции:

Этап 1. Приготовление шихты требуемого состава.

Этап состоит из операций:

- получение порошков (металлических или неметаллических, например, керамических);
- сепарация порошковых материалов;
- перемешивание порошковых материалов;
- получение сырьевой субстанции (пресс-порошок, шликер).

Этап 2. Получение уплотненного полуфабриката.

Этап состоит из операций:

- дозирование сырьевой субстанции (пресс-порошка, гранул, шликера);
- формообразование полуфабриката, осуществляемое способами:
 - * прессования собственно порошков (металлические изделия);
 - * прессования гранулированных пресс-порошков (керамические изделия);
 - * шликерного литья;
 - * обработки предварительно уплотненного полуфабриката резанием.

Этап 3. Спекание.

Спекание заключается в термообработке компактированного материала по специальному режиму.

Этап 4. Вторичная обработка давлением.

Заключается в выполнении одной из следующих операций: прессование, чеканка, калибровка, выдавливание, ковка, прокатка, штамповка.

Этап 5. Механическая обработка заготовки резанием.

Этап 6. Нанесение декоративных, защитных или функциональных покрытий.

5.2 Измельчение порошковых материалов

Методы получения порошков делят на механические, обычно используемые при переработке отходов, и физико-химические, дающие возможность получить очень чистые шихтовочные материалы. При использовании механических методов материал измельчается в порошок без изменения химического состава. При физико-химических методах изменяется химический состав исходного сырья (восстановление оксидов металлов газами или твердым восстановителем, электролиз водных растворов солей или распыленных сред).

Порошки минералов используются для изготовления керамики, гранулы или порошки полимеров являются исходным сырьем для получения деталей из термопластичных или терморезистивных пластмасс.

Измельчение исходных материалов механическими способами.

Измельчение механическими способами проводят в сухом и мокром состоянии. При сухом помоле по мере возрастания дисперсности порошка дробящий эффект становится все менее заметным, так как образующиеся тонкие частицы защищают крупные от ударов. При мокром помоле (в виде суспензии) отношение «твердая фаза — жидкость» принимается в пределах 1:2...1:6. Жидкость оказывает расклинивающее действие в дефектах кристаллов и препятствует срастанию трещин. В качестве среды для помола применяют воду и органические вещества.

Размольное оборудование обычного типа применяется для измельчения как минералов, так и металлов.

Наиболее грубое (предварительное) измельчение добытых в рудниках или полученных в электропечах минералов для изготовления деталей из керамики производят в щековых дробилках (рис. 5.1).

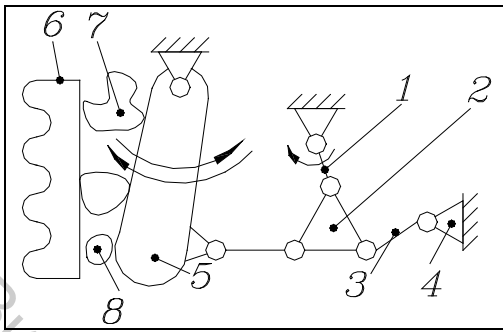


Рисунок 5.1—Щековая дробилка

Вращение сообщается кривошипу 1. Шатун 2 совершает сложное движение: он взаимодействует с двумя распорками 3. Одна из них связана с опорой 4, а другая — с подвижной плитой 5, которая совершает возвратно-вращательное движение. В промежуток между подвижной 5 и неподвижной 6 плитами подаются куски минерала 7, которые под действием динамической нагрузки измельчаются и выходят из дробилки в виде частиц 8 размером от 10 до 100 мм.

Дальнейшее измельчение производится с помощью молотковых дробилок. (рис. 5.2)

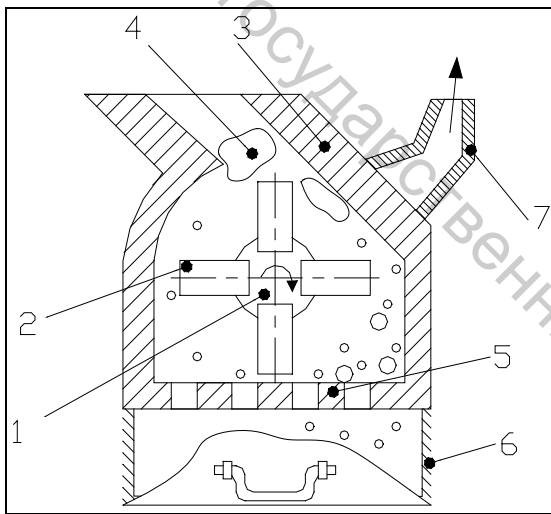


Рисунок 5.2—Молотковая дробилка

Эта разновидность размольного оборудования содержит ротор 1, вращающийся с большой скоростью. На роторе установлены молотки 2 из износостойкого материала. Молотковая дробилка содержит также отбойную плиту 3. Измельчаемые частицы 4 направляются ротором на отбойную плиту и за счет хрупкого разрушения измельчаются. Измельченные частицы проходят через решетку 5 и собираются в емкости 6.

Крупность дробления регулируется в пределах 1–10 мм изменением количества подаваемого материала, зазором между отбойной плитой и молотками, а также размером и числом отверстий в решетке. По-

мимо частиц указанной грануляции, молотковая дробилка позволяет получать также тонкодисперсный порошок (пыль). С этой целью дробилка содержит раструб 7, через который производится отсасывание воздуха с содержащейся в нем пылью. Размер частиц пыли составляет 0,1–10 мкм.

Баланс энергий при измельчении каждой частицы:

$$W = A_{упр} + A_{пласт} + A_s + \sum_{i=1}^n W_{ki}, \quad (5.1)$$

- где $A_{упр}$ — работа упругой деформации;
 $A_{пласт}$ — работа пластической деформации;
 A_s — полезная работа диспергирования (образования новых поверхностей);

$\sum_{i=1}^n W_{ki}$ — суммарная кинетическая энергия частиц, образовавшихся в результате разрушения исходной частицы (n — количество этих частиц).

Диспергирование — образование новых поверхностей, причем если одна частица разделилась, например, надвое, то $S_0 < S_1 + S_2$, где S_0 — площадь исходной поверхности, S_1 и S_2 — площади поверхностей первой и второй образовавшихся частиц.

Работа диспергирования определяется по формуле:

$$A_S = A_{уд} \Delta S, \quad (5.2)$$

где $A_{уд}$ — удельная поверхностная энергия; $\Delta S = S_1 + S_2 - S_0$ — увеличение площади суммарной поверхности.

Следующая стадия измельчения материалов до размеров частиц 0,1-1 мм производится на размольном оборудовании с жерновами — бегунах (рис. 5.3).

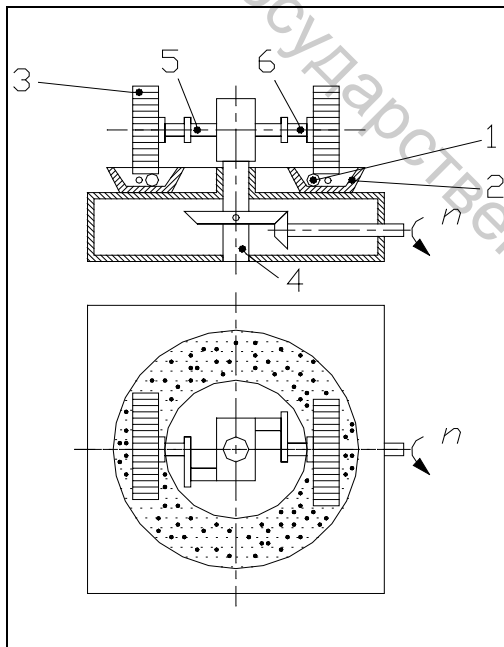


Рисунок 5.3— Измельчение на бегунах

Измельчаемый материал 1 засыпается в торoidalный желоб 2 с плоским дном. По этому желобу перекачиваются два жернова — катка 3. Они имеют дисковую форму и взаимодействуют с поверхностью желоба своей цилиндрической частью. Масса каждого жернова — 1,5 — 2т. Для обеспечения подъема катков вращение от шпинделя 4 передается на катки через шарнирные механизмы 5 и 6. Частота вращения входного вала $n=20-30$ оборотов в минуту.

При наезде катка на крупные частицы он приподнимается на некоторую высоту h , приобретая соответствующую потенциальную энергию, которая расходуется на дробление частиц при опускании катка после съезда с крупной частицы.

Из механических способов измельчения материалов получение наиболее тонкодисперсных порошков обеспечивается применением шаровых мельниц (рис.5.4).

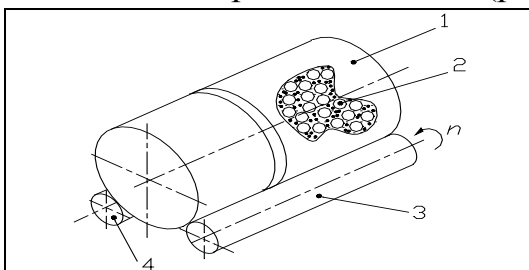


Рисунок 5.4— Измельчение в шаровых мельницах

Время измельчения — от нескольких минут до нескольких десятков часов.

Измельчаемый материал засыпается внутрь полого цилиндра 1, где он подвергается действию шаров 2 из стали или агата. Цилиндр размещается на двух резиновых роликах 3 и 4, причем ролик 3 является ведущим, а ролик 4 установлен на своей оси свободно.

Кроме шаров и измельчаемого материала, внутри цилиндра содержится также жидкость (вода со специальными присадками).

5.3 Кинетика процесса измельчения

Уравнение кинетики измельчения $S=f(\tau)$, где S — суммарная площадь поверхностей частиц единицы массы порошка; τ — время измельчения, определяется из условия:

$$\frac{dS}{d\tau} = k(S_{\max} - S), \quad (5.3)$$

где S_{\max} — максимально достижимая для данного материала поверхность.

$$\frac{d(S_{\max} - S)}{d\tau} = -k(S_{\max} - S)$$

Разделяя переменные, получаем:

$$\frac{d(S_{\max} - S)}{S_{\max} - S} = -k dt$$

Решая это уравнение, имеем:

$$\ln(S_{\max} - S) = -k\tau + C$$

Постоянную интегрирования C определяем из граничных условий.

Пусть при $(=0 S=0$. Тогда оказывается, что $\ln S_{\max} = C$, и предыдущее уравнение принимает вид:

$$\ln(S_{\max} - S) = -k\tau + \ln S_{\max},$$

откуда имеем:

$$\tau = \frac{1}{k} \ln \frac{S_{\max}}{S_{\max} - S}.$$

Тогда уравнение кинетики измельчения принимает вид:

$$S = S_{\max}(1 - e^{-k\tau}). \quad (5.4)$$

Зависимость (4) показана кривой 2 на рис. 5.5.

Кинетика и механизм измельчения существенно изменяются при введении поверхностно активных веществ (ПАВ) (кривая 1 на рис. 5.5).

Одной из характеристик порошковых материалов является их удельная поверхность, то есть суммарная поверхность частиц, приходящаяся на единицу массы порошка. С повышением дисперсности порошка его удельная поверхность возрастает.

Адсорбция ПАВ понижает поверхностную энергию частиц, интенсифицируя процесс. Дефекты структуры и граница зерен, обладая избыточной энергией, являются местами преимущественной адсорбции ПАВ и вместе с тем каналами для их быстрой миграции. Под действием капиллярных сил и разной полярности вещества вклиниваются в микрощели, предотвращают их самозалечивание во время промежутков между ударными воздействиями мелющих тел и способствуют накоплению разрушающих напряжений.

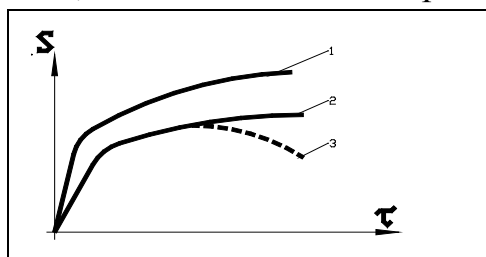


Рисунок 5.5— Кинетика измельчения материалов

При отсутствии ПАВ может также наблюдаться агрегирование измельчаемых

частиц (кривая 3 на рис. 5.5) за счет слипания ранее образовавшихся частиц.

5.4 Гранулометрический состав порошков

Гранулометрическим составом называется распределение частиц по размерам.

Размером d частицы называется величина, определяемая по формуле

$$d = \frac{a + b}{2}, \quad (5.5)$$

где a и b — величины сторон охватывающего частицу прямоугольника.

Под распределением подразумевают дифференциальный (плотность вероятности) закон распределения (рис. 5.6).

Стандартными являются некоторые дискретные значения d . Эти значения разделяют исследуемый порошок по фракциям. Предусматривается существование следующих фракций:

- 1 — основная фракция;
- 2 — смежная фракция;
- 3 — крупная фракция;
- 4 — мелкая фракция;
- 5 — предельная фракция (цифры соответствуют позициям на рис. 5.6).

Регламентируя количественное содержание фракций, добиваются требуемого гранулометрического состава порошка. Размер основной фракции порошка называют его зернистостью.

Фракции определяются при производстве порошков.

Прессуемость порошков — свойство приобретать и удерживать форму под действием давления.

Объем усадки — минимальный объем, который дают 10 граммов порошка при воздействии вибрацией на стенде.

Объем насыпки — важнейшее свойство порошка, соответствующее понятию его плотности. Объем насыпки — это объем 1г порошка, насыпанного в измерительную емкость свободно. Объем насыпки увеличивается с уменьшением зернистости порошка.

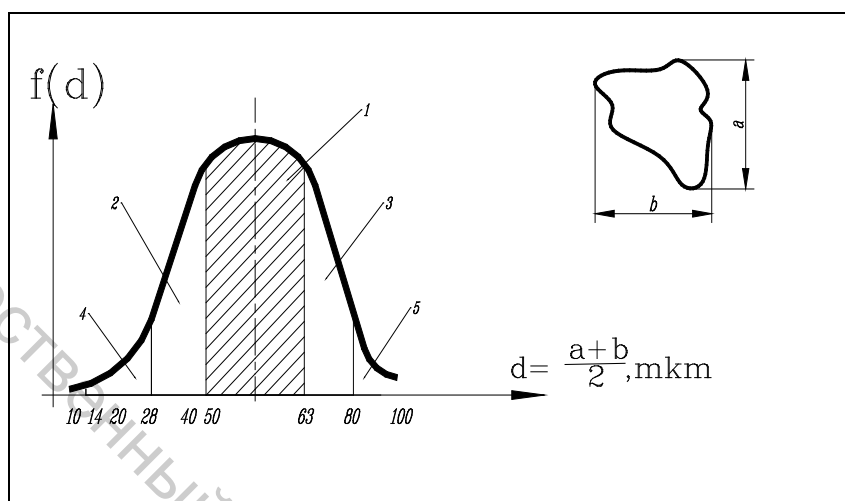


Рисунок 5.6— Представление гранулометрического состава порошка

Прессование порошков

Формирование деталей, рассматриваемых в рамках настоящего учебного пособия, производится прессованием. В пресс-формы для прессования для прессования порошковых материалов в качестве основных элементов входят матрицы и пуансоны для создания требуемого давления в толще прессуемого порошка, а также стержни (вкладыши) для формирования различных полостей.

В качестве технологического оборудования для прессования применяются универсальные гидравлические прессы, имеющие одно рабочее движение прессующего поршня (в отличие от специального оборудования для металлокерамического производства, обеспечивающего несколько независимых движений прессования).

Используемые универсальные прессы позволяют реализовать как одностороннюю, так и двухстороннюю схемы прессования. При этом двухсторонняя схема применяется как для прессования деталей относительно сложных конфигураций, так и в тех случаях, когда высота прессуемой детали больше ее поперечного размера.

Разрабатываемые пресс-формы должны обеспечивать один из двух возможных способов прессования: «по давлению» или «до упора».

Дозирование шихты производят по массе и по объему. В зависимости от выбранного способа дозирования дозу рассчитывают по формулам:

$$M = \rho \cdot V_{дет} \cdot (1 - П / 100) \cdot K; \quad (5.6)$$

$$V_{нас} = \frac{\rho}{\rho_{нас}} \cdot V_{дет} \cdot (1 - П / 100) \cdot K, \quad (5.7)$$

где M — величина навески шихты, г;
 $V_{нас}$ — насыпной объем, см³;
 $V_{дет}$ — объем готовой детали, см³;
 $П$ — заданная пористость готовой детали, %;
 K — коэффициент, учитывающий потери при прессовании и спекании ($K=1.04$);

$$K = K_1 \cdot K_2, \quad (5.8)$$

где $K_1=1,005-1,01$ — коэффициент, учитывающий потери порошка при прессовании и зависящий от точности изготовления формы;
 $K_2=1,01-1,03$ — коэффициент, учитывающий потери порошка при спекании в результате выгорания добавок и примесей;
 $\rho_{нас}$ — плотность насыпки шихты, г/см³;
 ρ — плотность шихты в компактном состоянии, г/см³;

$$\rho = \frac{1}{\frac{m_1}{\rho_1} + \frac{m_2}{\rho_2} + \dots + \frac{m_n}{\rho_n}}, \quad (5.9)$$

где m_i — весовое содержание компонентов в долях единицы;
 ρ_i — плотность компонентов, г/см³.

5.5 Формование порошков

Основным методом является формирование в стальных пресс-формах, чаще называемое прессованием. Прессование производится на специализированных прессах для металлокерамического производства. В зависимости от размеров детали применяют одностороннее и двустороннее прессование.

Пресс-форма для одностороннего прессования

Рекомендуемая конструкция пресс-формы для одностороннего прессования детали, имеющей конфигурацию плоского кольца, изображена на рис. 5.7.

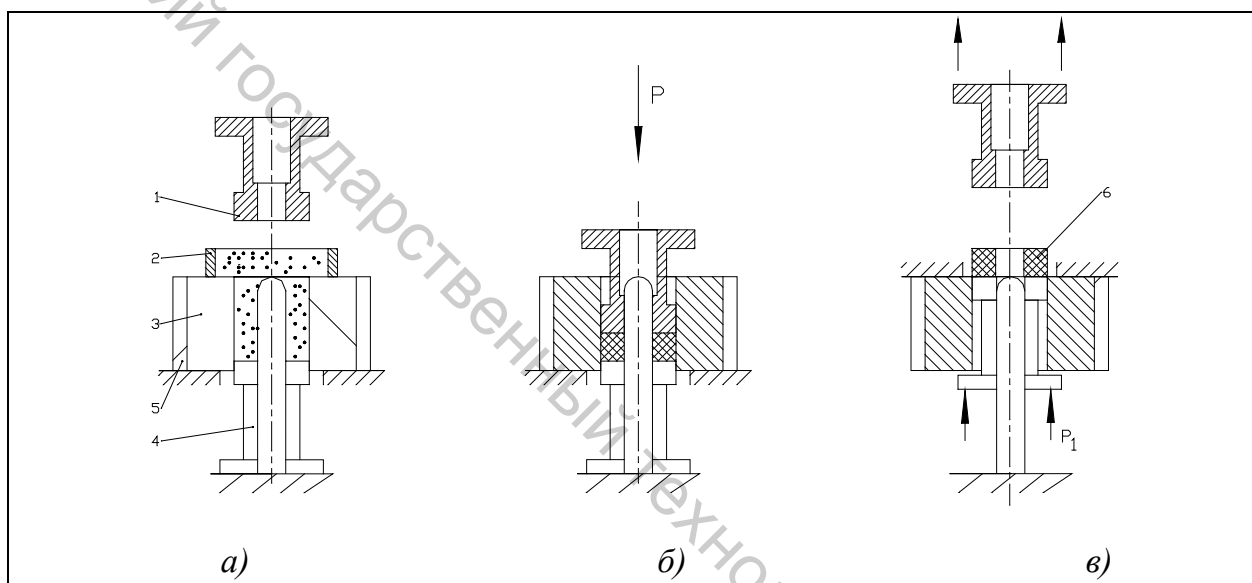


Рисунок 5.7 – Пресс-форма для одностороннего прессования:

а) дозирование; б) прессование; в) выталкивание
(P – усилие прессования, P1 – усилие выталкивания)

В состав пресс-формы входит матрица 3, в которую входит прессующий пуансон 1. Цилиндрическое отверстие детали формируется стержнем-вкладышем 4, а целостное состояние матрицы обеспечивается обоймой 5.

Работа с данной пресс-формой заключается в следующем. В начале технологической операции производится сборка пресс-формы. Матрица стягивается обоймой, на нее устанавливается загрузочная камера 2.

В полость, образованную матрицей 3, вкладышем 4 и загрузочной камерой 2, засыпают дозированное количество порошка. Устанавливают пуансон 1, переносят собранную пресс-форму на стол гидравлического пресса и производят прессование.

Спрессованный брикет 6 извлекают из полости пресс-формы (разборка пресс-формы) в такой последовательности. Пресс-форму устанавливают на специальное кольцо, диаметр отверстия которого больше наружного диаметра

вкладыша 4 и меньше наружного диаметра матрицы 3, затем выдавливают вкладыш.

Пресс-форма для двухстороннего прессования

Работу пресс-формы для двухстороннего прессования детали-кольца рассмотрим на примере циклограммы специальной роторной установки.

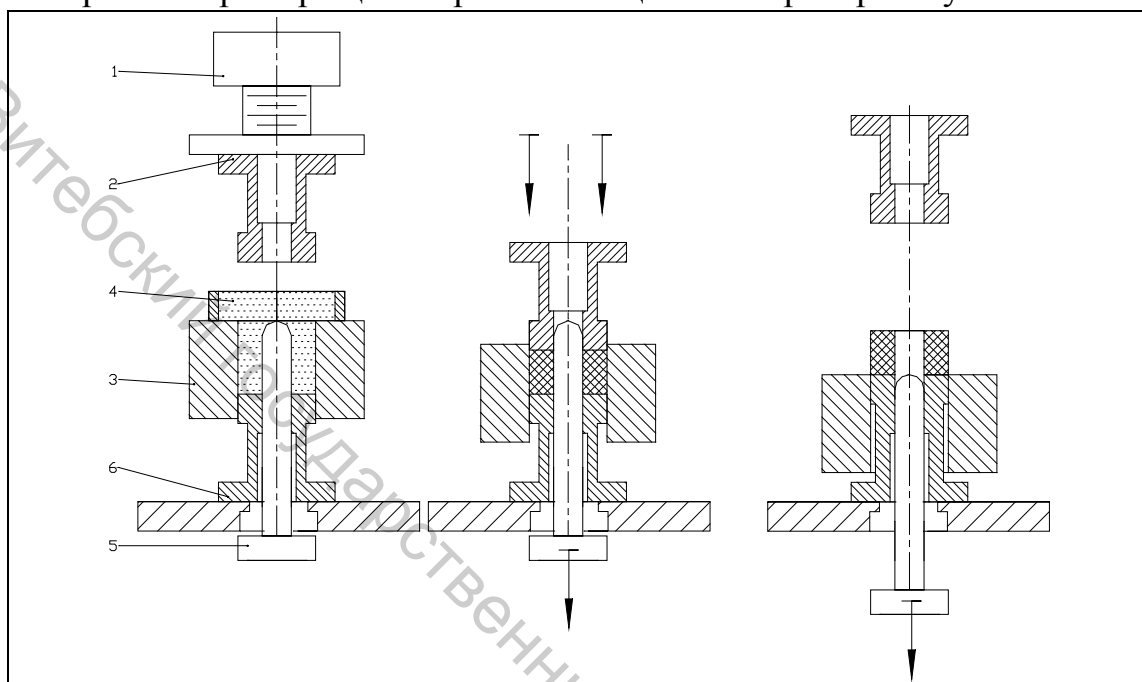


Рисунок 5.8– Пресс-форма для двустороннего прессования

Пресс-форма состоит из матрицы 3, прессующего пуансона 2, закрепляемого на верхнем штоке регулируемой длины 1, и нижнего пуансона 6, неподвижно закрепленного на несущей плите установки. Оформляющий отверстие детали стержень 5, а также матрица 3 закреплены с помощью деталей на нижнем штоке.

В пресс-форме, предназначенной для применения на универсальном оборудовании (гидравлический пресс), матрица 3 может быть просто подпружинена относительно неподвижной части пресс-формы.

Цикл работы установки начинается с того, что в полость, образованную матрицей 3, стержнем, загрузочной камерой 4 и нижним пуансоном, засыпается пресс-порошок. При этом дозирование обычно производится по объему с применением не показанного на схеме раструба.

После заполнения полости пресс-формы порошком начинается опускание верхнего штока 1 с прессующим пуансоном 2. Затем происходит собственно прессование, причем его двухсторонний характер обеспечивается одновременным движением вниз прессующего пуансона и матрицы со стержнем. При неподвижном нижнем пуансоне брикет допрессовывается.

Далее спрессованный брикет извлекается из полости пресс-формы. Для этого прессующий пуансон начинает двигаться вверх, а матрица вместе со стержнем перемещаются вниз с помощью нижнего штока. Высвобождение брикета происходит в крайнем нижнем положении матрицы со стержнем. Бри-

кет остается на неподвижном нижнем пуансоне, а затем удаляется из зоны прессования.

После возвращения матрицы со стержнем в крайнее верхнее положение начинается новый цикл работы роторной установки.

5.6 Спекание порошков

Спекание — это процесс уплотнения и упрочнения пористых порошковых изделий под влиянием термической обработки, который сопровождается увеличением плотности и усадкой, уменьшением пористости, изменением механических и физико-химических характеристик материала и приближением их к характеристикам компактного материала. Отформованная заготовка перед спеканием имеет пористость 25 – 60%, а после — 10 – 15%.

В результате спекания сцепление частиц порошка происходит вследствие взаимной диффузии атомов. Характерными особенностями спекания являются:

- а) эффект упрочнения и изменение физико-механических свойств, связанные с изменением величины и качества межчастичных контактных участков;
- б) изменение микроструктуры детали (рост зерен, формы и числа пор и т.д.).

Спекание деталей производят в водородных или в вакуумных печах. Температура спекания $t_{сп}$ определяется по формуле

$$t_{сп} = 0,7 t_{пл} \quad (5.10)$$

где $t_{пл}$ — температура плавления основного компонента сплава, °С.

Температура спекания на 200-300 К выше, чем температура предварительного обжига шихты.

Зависимость показателей спекания от температуры обжига в общем виде может быть показана графиками на рис. 5.9.

На стадии спекания (область ΔT) начинает образовываться замкнутая (закрытая) пористость.

Процесс спекания делится на три этапа: 1) начальный нагрев до 100-200°С (удаление

влаги); 2) промежуточный нагрев от 100-200°С до $0,5 t_{пл}$ (снятие упругих напряжений и активное сцепление частиц); 3) окончательный нагрев до температуры спекания (восстановление оксидных пленок в защитной или нейтральной среде и полное сцепление частиц). Время выдержки после достижения окончательной температуры спекания составляет несколько часов.

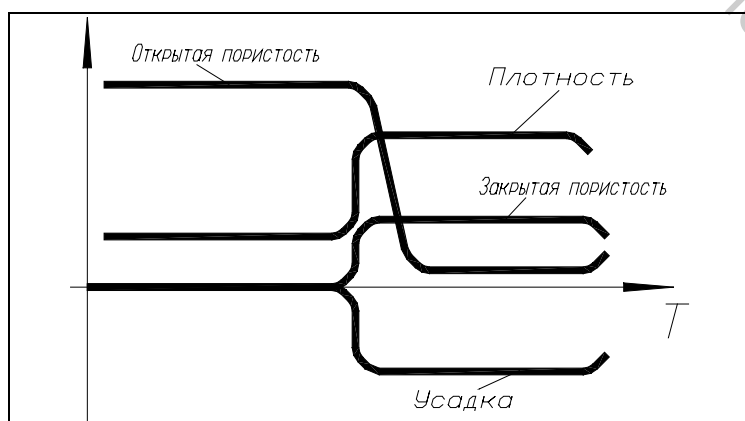


Рисунок 5.9– Изменение характеристик материала при спекании

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология конструкционных материалов / под ред. А. М. Дальского. – Москва : Машиностроение, 1990. – 448 с.
2. Некрасов, С. С. Технология материалов. Обработка конструкционных материалов резанием / С. С. Некрасов, Г. М. Зильберман. – Москва : Машиностроение, 1974.
3. Краткий справочник металлиста / под общ. ред. д-ра техн. наук. П. Н. Орлова. – Москва: Машиностроение, 1987.
4. Грановский, Г. И. Резание металлов : учебник для вузов / Г. И. Грановский, В.Г. Грановский. – Москва : Высшая школа, 1985.
5. Режимы резания металлов : справочник / под ред. Ю. В. Барановского [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1974.
6. Барбашов, Ф. А. Фрезерные работы: учебное пособие / Ф. А. Барбашов – Москва : Высшая школа, 1986.
7. Денежный, П. М. Токарное дело : учебник / П. М. Денежный [и др.]. – Москва : Высшая школа, 1986.
8. Ящерицин, П. И. Основы резания материалов и режущий инструмент / П. И. Ящерицин [и др.]. – Минск : Высшейшая школа, 1981. – 560 с.
9. Колесов, С. Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учеб. пособие для вузов / С. Н. Колесов, И.С. Колесов. – Москва : Высшая школа, 2004. – 519 с.
10. ГОСТ 25761–83. Виды обработки резанием. Термины и определения общих понятий.
11. ГОСТ 25762–83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий.
12. ГОСТ 25751 – 83. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий.
13. ГОСТ 3.1109 – 82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий.
14. Природа пластической деформации : учебное пособие по курсу «Физико-математическая теорияковки и штамповки». Ч. 1 / В. С. Зарубин, А. Г. Овчинников ; под ред. А. Г. Овчинникова. — М.: Изд-во МГТУ, 1990. — Ч.1. — 36 с.
15. Материаловедение: учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 648 с.
16. Новиков, И. И. Дефекты кристаллического строения металлов : учебное пособие для вузов / И.И. Новиков. — М.: Металлургия, 1975. — 208 с.
17. Павлов, П. В. Физика твердого тела : учебное пособие для вузов / П.В. Павлов, А. Ф. Хохлов. — М.: Высшая школа, 1985. — 384 с.
18. Полухин, П. И. Физические основы пластической деформации: учебное пособие для вузов / П. И. Полухин, С. С. Горелик, В. К. Воронцов. — М.: Металлургия, 1982. — 584 с.

19. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов/ М. В. Сторожев, Е. А. Попов. — М.: Машиностроение, 1977. — 423 с.
20. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Расчет, проектирование, изготовление и применение электродов-инструментов. Ч. 1: Электроэрозионная обработка / под ред. А. Л. Лившица, А. Роша. — НИИмаш, 1980. — 224 с.
21. Байсупов, И. А. Электрохимическая обработка металлов : учеб. пособие/ И. А. Байсупов. — Москва : Высш. шк. 1968. - 184 с.
22. Фатеев, Н. К. Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фатеев.—К.: Машиностроение, 1980. - 184 с.
23. Марков, А. И. Ультразвуковая обработка материалов / А. И. Марков. — Москва : Машиностроение, 1980. — 237 с.
24. Лазерная обработка материалов / Н. Н. Рыкалин [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1975. — 296 с. : ил.
25. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении / К. И. Крылов [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1978. — 336 с. : ил.
26. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н. Н. Рыкалин [и др.]. — Москва : Машиностроение, 1978. — 239 с.
27. Башенко, В. В. Электроннолучевые установки / В. В. Башенко. — Л.: Машиностроение, 1972. - 168 с.
28. Ивановский, Г. Ф. Ионно-плазменная обработка материалов / Г. Ф. Ивановский, В. И. Петров. — М.: Радио и связь, 1986. — 232 с.

Учебное издание

Алексеев Игорь Сергеевич
Матвеев Константин Сергеевич

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Конспект лекций

Редактор Голубев А. Н.
Технический редактор Новиков А. К.
Корректор Самкович М. В.
Компьютерная верстка Матвеева Н. Н.

Подписано в печать _____ Формат _____ Бумага офсетная №1
Гарнитура «Таймс» Усл. печ. листов _____ Уч. - изд. лист. _____
Тираж _____ экз. Заказ № _____

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/0494384 от 16 марта 2009 г.