

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования

**«Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС»**

**НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

Кафедра металлургических технологий и оборудования

Н.Г. Куницина

**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ  
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Учебное пособие  
по дисциплинам «Обработка металлов давлением»,  
«Технологии процессов обработки металлов давлением»  
для студентов направлений подготовки  
22.03.02 «Металлургия», 38.03.01 «Экономика»  
всех форм обучения

Новотроицк, 2015

УДК 669.771  
ББК 34.62  
К 91

Рецензенты:

*Доцент кафедры технологий обработки материалов Института металлургии, машиностроения и материалообработки ФГБОУ ВПО МГТУ им. Г.И. Носова, к.т.н. Синицкий О.В.*

*Заведующий кафедрой металлургических технологий и оборудования Новотроицкого филиала ФГАОУ ВПО НИТУ «МИСиС», к.т.н. Шаповалов А.Н.*

Куница Н.Г. Теория и технология процессов обработки металлов давлением: учебное пособие. – Новотроицк: НФ НИТУ МИСиС, 2015. – 100 с.

Учебное пособие содержит основные сведения теории и технологии процессов обработки металлов давлением, изучаемые студентами направлений 22.03.02 «Металлургия» и 38.03.01 «Экономика» в курсах «Обработка металлов давлением» и «Технологии процессов обработки металлов давлением». Достаточно подробно изложены материалы по основам теории пластической деформации: напряженное и деформированное состояние, внешнее трение, физическая сущность обработки давлением. Освещен сортамент профилей, основные операции и оборудование цехов обработки металлов давлением.

Материал учебного пособия подготовлен на основе трудов ведущих специалистов в области обработки металлов давлением Бахтинова В.Б., Громова Н.П., Зотова В.Ф., Суворова И.К. и др.

Пособие составлено в соответствии с требованиями ФГОС ВО подготовки бакалавров направлений 22.03.02 «Металлургия» и 38.03.01 «Экономика», обучающихся в Новотроицком филиале НИТУ «МИСиС».

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»

© Новотроицкий филиал  
ФГАОУ ВПО «Национальный  
исследовательский  
технологический университет  
«МИСиС», 2015.

## Содержание

Введение .....	4
1 Основы теории процессов обработки металлов давлением .....	5
1.1 Основные процессы обработки металлов давлением .....	5
1.2 Кристаллическое строение металлов .....	6
1.3 Упругая и пластическая деформация .....	7
1.4 Напряженно – деформированное состояние металла в процессах обработки давлением .....	9
1.5 Механизмы пластической деформации металлов .....	10
1.6 Наклеп и рекристаллизация .....	12
1.7 Пластичность металлов и сопротивление металлов пластической деформации .....	14
1.8 Внешнее трение при обработке металлов давлением .....	16
2 Прокатное производство .....	21
2.1 Общая характеристика прокатного производства .....	21
2.2 Профильный и марочный сортамент прокатной продукции .....	22
2.3 Сущность процесса прокатки. Характеристики деформации при прокатке .....	26
2.4 Классификация прокатных станов .....	39
2.5 Технологические операции при производстве проката .....	45
2.6 Производство полупродукта .....	52
2.7 Производство сортового проката .....	53
2.8 Производство горячекатаных листов .....	54
2.9 Производство холоднокатаных листов .....	56
3 Прессовое производство .....	60
3.1 Сущность прессования. Основные способы прессования Характеристики деформации при прессовании .....	60
3.2 Оборудование для прессования .....	64
3.3 Технологические операции при прессовании .....	65
4 Волочение .....	66
4.1 Сущность волочения. Характеристики деформации при волочении .....	66
4.2 Оборудование для волочения .....	70
4.3 Технологические операции при волочении .....	71
5 Ковка металла .....	75
5.1 Сущность ковки. Операции свободной ковки. Характеристики деформации при ковке .....	75
5.2 Оборудование для свободной ковки .....	80
5.3 Технологические операции при свободной ковке .....	81
6 Штамповка металла .....	82
6.1 Объемная штамповка .....	82
6.2 Листовая штамповка .....	88
7 Специальные процессы обработки металлов давлением .....	93
7.1 Производство гнутых профилей .....	93
7.2 Производство периодического проката .....	94
7.3 Производство железнодорожных колес .....	95
7.4 Производство зубчатых колес .....	96
7.5 Производство шаров .....	97
Список использованных источников .....	99

## Введение

Металлургическое производство подразделяется на две основные стадии. В первой получают металл заданного химического состава из исходных материалов. Во второй стадии металлу в пластическом состоянии придают ту или иную необходимую форму при практически неизменном химическом составе обрабатываемого материала. При этом изменение формы тела осуществляется преимущественно с помощью давящего на металл инструмента. Поэтому получение изделия таким способом называют обработкой металлов давлением или пластической обработкой.

Пластическое деформирование при обработке давлением, состоящее в преобразовании заготовки простой формы в деталь более сложной формы того же объема, относится к малоотходной технологии.

Обработкой давлением получают не только заданную форму и размеры, но и обеспечивают требуемое качество металла, надежность работы изделия.

Высокая производительность обработки давлением, низкая себестоимость и высокое качество продукции привели к широкому применению этих процессов.

Динамичный и пропорциональный рост черной и цветной металлургии, производство изделий из металлов и сплавов пластической обработкой основываются на дальнейшем развитии теории обработки металлов давлением, являющейся научной базой разработки технологических операций получения изделий из металлов и сплавов. Теория пластической обработки металлов позволяет оценить экономическую целесообразность принятого способа деформации, выявить влияние условий обработки на свойства получаемых изделий, определить силовые и энергетические параметры процесса и указать пути их рационального изменения, дает возможность управлять процессом обработки с точки зрения улучшения способности металлов пластически деформироваться. Знание закономерностей обработки металлов давлением помогает выбирать наиболее оптимальные режимы технологических процессов, требуемое основное и вспомогательное оборудование и технически грамотно его эксплуатировать.

Материал учебного пособия раскрывает содержание основных тем в соответствии с программой дисциплин «Обработка металлов давлением» и «Технологии процессов обработки металлов давлением», изучаемых студентами Новотроицкого филиала НИТУ «МИСиС», обучаемых по направлениям 22.03.02 «Металлургия» и 38.03.01 «Экономика». Завершает изложение учебного материала по каждой теме ряд вопросов для самопроверки, которые входят в комплекс вопросов для текущего контроля (контрольные работы №1 и №2) и промежуточной аттестации (экзамен).

Таким образом, учебное пособие облегчает усвоение теоретических знаний на лекционных и практических занятиях, помогает подготовке к мероприятиям по текущему контролю и промежуточной аттестации по дисциплинам «Обработка металлов давлением» и «Технологии процессов обработки металлов давлением».

# 1 Основы теории процессов обработки металлов давлением

## 1.1 Основные процессы обработки металлов давлением

К основным процессам обработки металлов давлением относятся прокатка, волочение, прессование, ковка и штамповка.

*Прокатка* – один из важнейших способов обработки давлением, которым обрабатывают 75–80% всей выплавляемой стали. Прокатка осуществляется путем захвата заготовки и деформирования ее между вращающимися в разные стороны валками. При этом толщина полосы уменьшается, а длина и ширина увеличиваются. Наиболее простая схема прокатки представлена на рисунке 1.

*Волочение* – процесс, при котором исходная заготовка протягивается через отверстие инструмента, называемого волокой (рисунок 2). При этом поперечное сечение заготовки уменьшается, а длина увеличивается.

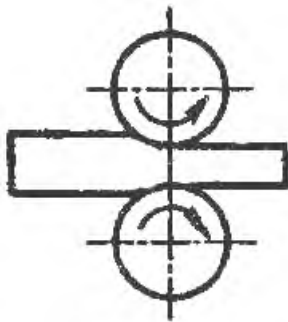


Рисунок 1 – Схема прокатки

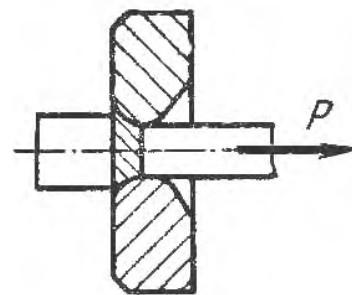


Рисунок 2 – Схема волочения

*Прессование* – выдавливание заготовки, помещенной в специальный цилиндр-контейнер, через отверстие матрицы, удерживаемой матрицедержателем. Выдавливание происходит с помощью пресс-шайбы и пуансона (рисунок 3).

*Ковка* заключается в обжатии заготовки между верхним и нижним бойками с применением различного кузнечного инструмента (рисунок 4). Окончательно заданную форму достигают путем нанесения последовательных ударов на молоте или нажатии на прессе с последовательным перемещением заготовки относительно бойков.

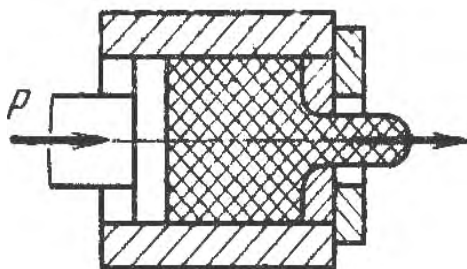


Рисунок 3 – Схема прессования

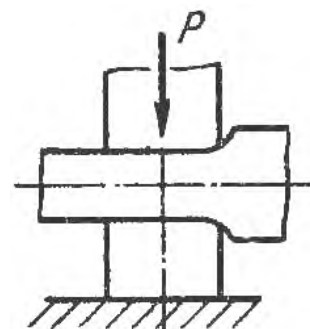


Рисунок 4 – Схема ковки

*Штамповка* – процесс деформации металла в штампах, форма и размеры внутренней полости которых определяют форму и размеры получаемой поковки.

Различают объемную и листовую штамповку. Если исходным материалом для штамповки служит лист, то это листовая штамповка (рисунок 5, б), в остальных случаях – объемная (рисунок 5, а).

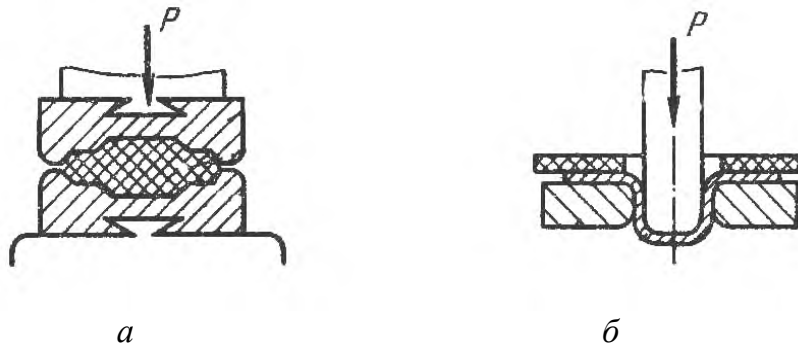


Рисунок 5 – Схемы объемной (а) и листовой (б) штамповки

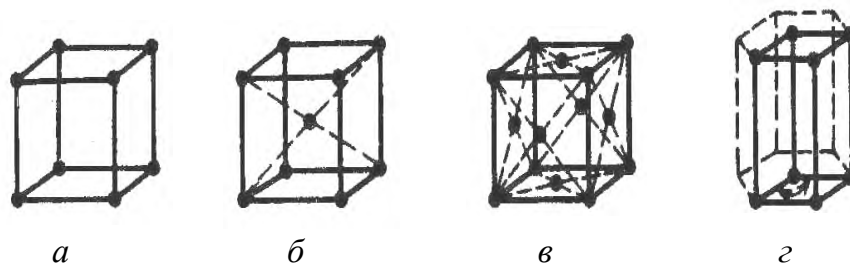
## 1.2 Кристаллическое строение металлов

В металлах и их сплавах в твердом состоянии элементарные частицы – атомы – характеризуются закономерным упорядоченным размещением. Благодаря такому размещению атомы, находящиеся на различных направлениях, можно как бы соединить прямыми линиями. Совокупность таких пересекающихся линий представляет собой своеобразную пространственную решетку, которая при многократном повторении в пространстве воспроизводит объемную или пространственную кристаллическую решетку.

Кристаллические решетки разных металлов отличаются по форме и размерам элементарных ячеек. Различают простые пространственные решетки, в которых атомы размещаются только в узлах решетки (в вершинах основной элементарной ячейки), и сложные пространственные решетки, у которых внутри основных элементарных ячеек также размещены атомы. Для описания строения пространственной решетки обычно выбирают систему координат, в которой осями служат три прямые, проведенные из одной точки, например, узла решетки. Эти прямые совпадают с прямыми, соединяющими атомы.

Самой простой решеткой является кубическая (рисунок 6, а). Элементарную ячейку простой кубической решетки представляет куб, в вершинах которого размещены восемь атомов.

Металлам присущи более сложные типы кубических решеток – объемноцентрированная (ОЦК), гранецентрированная (ГЦК) кубические решетки и гексагональная плотноупакованная (ГПУ) (рисунок 6, б, в, г).



а – кубическая; б – объемноцентрированная; в – гранецентрированная;  
г – гексагональная плотноупакованная

Рисунок 6 – Типы элементарных решеток

Основу ОЦК составляет кубическая решетка, в которой атомы находятся не только в вершинах куба, но и в его центре, на пересечении его диагоналей.

В ГЦК ячейкой служит куб с атомами, расположенными не только в вершинах куба, но и в центре граней.

В ГПУ ячейка состоит из параллельных центрированных гексагональных основа-

ний.

Показанный на рисунке 6 характер расположения атомов является условным, так как в действительности атомы расположены плотнее, непосредственно соприкасаясь друг с другом. Такие решетки и соответствующие им ячейки называются плотноупакованными. Расстояние между ближайшими атомами в ячейке называется параметром кристаллической решетки.

Параметры кристаллической решетки имеют величины порядка атомных размеров и измеряются в ангстремах ( $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$ ). В металлах параметры изменяются в пределах 2–7 \AA.

Вышеизложенные рассуждения характерны лишь для монокристалла. Монокристалл – это отдельный кристалл с непрерывной кристаллической решеткой. Реальные металлы состоят из множества кристаллов, форма, размеры и направление кристаллических осей которых зависят от условий кристаллизации и последующей их обработки. Такое строение называется поликристаллическим. Взаимное расположение атомов, расстояние между ними, плотность их расположения, кристаллические направления и плоскости определяют механические и физические свойства кристаллов. Эти свойства вдоль различных кристаллографических направлений и в различных кристаллографических плоскостях зависят от числа находящихся в них атомов и не являются одинаковыми. Такое явление называется анизотропией свойств. Следует иметь в виду, анизотропия проявляется только в пределах одного монокристалла или зерна-кристаллита. В поликристаллических телах, какими являются реальные металлы, состоящие из огромного количества произвольно ориентированных друг относительно друга зерен, она не наблюдается. Это объясняется тем, что в поликристаллических телах недостаток какого-либо свойства по одному из направлений в одних зернах компенсируется избытком данного свойства по этому же направлению в других зернах. Поэтому реальные металлы являются изотропными телами, т.е. телами с одинаковыми свойствами по различным направлениям.

### 1.3 Упругая и пластическая деформация

*Деформация металлов* – это изменение их формы и размеров без макроразрушения под действием внешней силы. Деформация металла может быть упругой (обратимой) и пластической (необратимой).

*Упругой* или *обратимой* деформацией называется такая, при которой после прекращения действия силы тело восстанавливает свои первоначальные форму и размеры. Упругая деформация возможна лишь до определенного предела, после которого начинается пластическая деформация.

При нормальных условиях между атомами металлического тела действуют электростатические уравновешивающие силы притяжения и отталкивания. Такому положению равновесия отвечает минимум потенциальной энергии кристаллической решетки. Если приложить к телу внешнюю силу, то равновесие внутренних сил нарушается. Для восстановления равновесия атомы из положений устойчивого равновесия немного смещаются в ближайшие положения, не превышающие расстояния между соседними атомами (параметра решетки); при этом потенциальная энергия решетки увеличивается. В новом положении атомов также достигается равновесие между внутренними силами притяжения и отталкивания, с одной стороны, и внешней силой – с другой. При упругой деформации как только устраняется внешняя сила, атомы занимают свои прежние места и между силами притяжения и отталкивания атомов вновь восстанавливается равновесие и прежнее расстояние между атомами.

*Пластической* деформацией называется такая, при которой после прекращения действия нагрузки тело не восстанавливает своей первоначальной формы и размеров. Пласти-

ческой деформации всегда предшествует упругая.

Более наглядное представление об упругой и пластической деформациях возможно при рассмотрении растяжения цилиндрического металлического образца. По результатам таких испытаний строят диаграммы, на горизонтальной оси которых откладывают относительные или абсолютные деформации, а на вертикальной – силы или напряжения (рисунок 7).

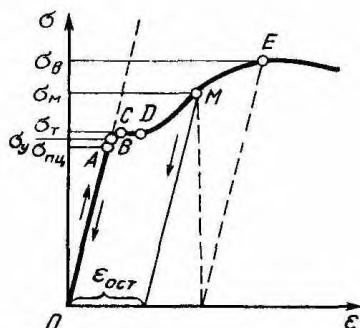


Рисунок 7 – Диаграмма растяжения образца в координатах напряжение – деформация

При упругой деформации между напряжением и деформацией существует связь, которая определяется законом Гука:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – относительная упругая деформация, равная отношению величины упругой деформации к начальному размеру деформируемого тела;

$\sigma$  – напряжение в поперечном сечении растягиваемого образца, МПа;

$E$  – модуль упругости, МПа.

Согласно рисунку 7 закон Гука соблюдается на прямолинейном участке  $OA$ , где наблюдается прямолинейная зависимость между напряжением и деформацией. При снятой нагрузке деформация полностью исчезнет и образец примет первоначальные размеры. Наибольшее напряжение, при котором сохраняется прямолинейная зависимость между напряжениями и деформациями, называется *пределом пропорциональности* и обозначается  $\sigma_{\text{пл}}$ . Величина упругой деформации мала и обычно не превышает 0,1–0,2 %. При разгрузке образца от напряжений, превышающих предел пропорциональности, например от точки  $M$  на кривой, соотношение между напряжениями и деформациями будет определяться линией, параллельной  $OA$ . В этом случае прямая зависимость между напряжением и деформацией нарушается и при полном удалении нагрузки исчезает только упругая часть деформации, а сохраняется остаточная деформация  $\varepsilon_{\text{ост}}$ .

Напряжение, которое при разгрузке вызывает впервые появление остаточной деформации, является *пределом упругости*  $\sigma_y$ . На участке  $CD$  деформация увеличивается при постоянном усилии. Это напряжение называется *пределом текучести*  $\sigma_{\text{т}}$ , а участок кривой – площадкой текучести. У большинства металлов на кривой растяжения отсутствует площадка текучести, в таком случае за предел текучести принимают напряжение, при котором получается остаточная деформация в 0,2 %.

При дальнейшем увеличении деформации напряжение возрастает, отражая влияние наклепа. Наибольшее напряжение на диаграмме, соответствующее наибольшей нагрузке, которую может выдержать растягиваемый образец, называется *пределом прочности*  $\sigma_{\text{в}}$ .



В обработке металлов давлением наибольшую важность представляет предел текучести. Металлы обрабатываются давлением в интервале напряжений между их пределом текучести и пределом прочности.

Упругая деформация имеет большое значение в процессах обработки металлов давлением и всегда предшествует пластической, т.е. с упругими деформациями связано появление напряжений, необходимых для осуществления пластической деформации.

#### 1.4 Напряженно – деформированное состояние металла в процессах обработки давлением

Если к металлическому телу, один конец которого закреплен, приложить внешнюю, например, растягивающую силу, то в теле возникнут внутренние силы, направленные в сторону, противоположную действию внешней силы. Появление в теле внутренних сил необходимо для уравнивания внешних сил. Взаимно уравниваться эти силы могут только при действии на абсолютно твердые тела. Поскольку таких тел в природе нет, то при действии внешней силы металлическое тело испытывает деформацию. Деформация осуществляется до тех пор, пока между внешними и внутренними силами не наступит равновесие.

Появление в металлическом теле внутренних сил свидетельствует о том, что тело находится в напряженном состоянии. Под напряженным состоянием тела понимают состояние вынужденного отклонения атомов от положения устойчивого равновесия в элементарной кристаллической решетке, вследствие чего атомы стремятся вернуться к своим нормальным положениям.

Напряженное состояние в точке или в некотором объеме деформируемого тела характеризуется схемой главных нормальных напряжений, действующих в трех взаимно перпендикулярных площадках. Схема главных напряжений дает графическое представление о наличии и знаке главных напряжений, возникающих под влиянием внешне приложенных сил.

Возможны девять схем напряженного состояния (рисунок 8). Напряженное состояние в точке может быть линейным, плоским или объемным.

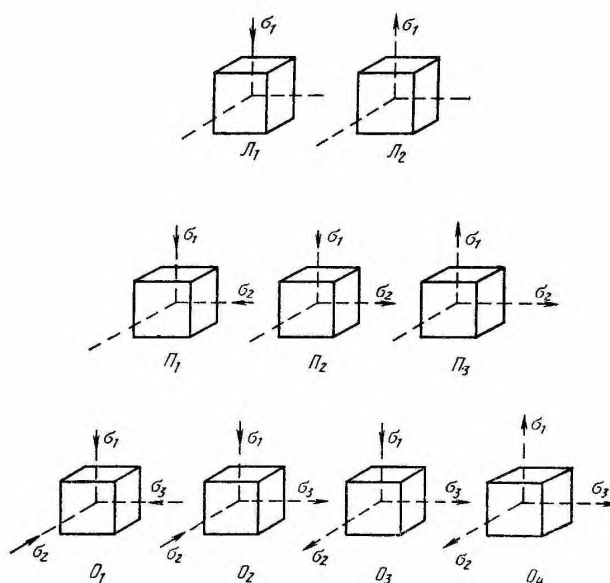


Рисунок 8 – Схемы напряженного состояния

Схемы с напряжениями одного знака называют одноименными, а с напряжениями разных знаков – разноименными. Условно растягивающие напряжения считают положительными, а сжимающие – отрицательными.

Схема напряженного состояния оказывает влияние на пластичность металла. На значение главных напряжений оказывают существенное влияние силы трения, возникающие в месте контакта заготовки с инструментом, и форма инструмента.

В реальных процессах обработки давлением в большинстве случаев встречаются схемы всестороннего сжатия и состояния с одним растягивающим и двумя сжимающими напряжениями.

При прокатке, прессовании, ковке и объемной штамповке напряженное состояние металла характеризуется схемой всестороннего сжатия  $O_1$ . При этом во всех случаях главное напряжение сжатия  $\sigma_1$  – максимальное, так как создается давлением инструмента на металл. Напряжения  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  меньше  $\sigma_1$ , так как создаются либо подпирающими силами трения, препятствующими течению металла в соответствующем направлении, либо боковыми стенками инструмента (калибра, штампа). Наибольшее течение металла происходит в направлении той оси, где действует минимальное напряжение (чаще всего  $\sigma_3$ ).

При волочении напряженное состояние характеризуется схемой  $O_2$ : по оси прутка действует напряжение растяжения, по двум другим осям – напряжения сжатия, возникающие из-за давления волокна.

При листовой штамповке отдельные участки изделия характеризуются различными схемами напряженного состояния.

Схема деформированного состояния графически отображает наличие и направление деформации по трем взаимно перпендикулярным направлениям.

Возможны три схемы деформированного состояния (рисунок 9).

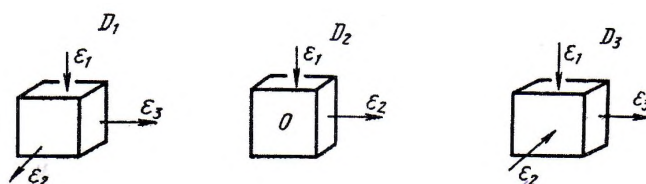


Рисунок 9 – Схемы деформированного состояния

При схеме  $D_1$  уменьшаются размеры тела по высоте, за счет этого увеличиваются два других размера (ковка, прокатка).

При схеме  $D_2$  происходит уменьшение одного размера, чаще высоты, другой размер (длина) увеличивается, а третий (ширина) не изменяется. Например, прокатка широкого листа, когда его ширина в процессе прокатки практически не изменяется. Это схема плоской деформации.

Наиболее рациональной с точки зрения производительности процесса обработки давлением является схема  $D_3$  размеры тела уменьшаются по двум направлениям, и увеличивается третий размер (прессование, волочение).

Совокупность схем главных напряжений и главных деформаций характеризуют пластичность металла. Напряженное состояние при прессовании металла характеризуется такой же схемой напряженного состояния, как при ковке, а схема главных деформаций характеризуется двумя деформациями сжатия и одной – растяжения. При ковке и штамповке растягивающие напряжения играют большую роль, поэтому пластичность металла меньше.

## 1.5 Механизмы пластической деформации металлов

Под действием внешних сил атомы в кристаллических решетках смещаются от-

носителем равновесного положения. Однако это смещение не безгранично, и при достижении ими превышающего расстояния между атомами в исходном состоянии атомы не возвращаются в исходное положение, а занимают новое равновесное положение, связь между атомами в этом случае не нарушается. В результате происходит пластическая деформация или остаточное изменение формы и размеров твердого тела.

В общем случае пластическая деформация в металлах осуществляется двумя путями: скольжением и двойникованием.

*Скольжение* происходит при сдвиге одной части монокристалла относительно другой. Сдвиги происходят по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям. Эти плоскости и направления принято называть плоскостями и направлениями скольжения. Скольжение в кристаллической решетке происходит по плоскостям с наибольшей плотностью размещения атомов, а направлениями скольжения являются те направления, по которым расстояния между атомами имеют минимальную величину.

Скольжение по определенным плоскостям начнется тогда, когда касательные напряжения в них достигнут вполне определенной критической величины, и осуществляется путем последовательного смещения атомов (отдельных или групп атомов) относительно друг друга вдоль плоскости скольжения (рисунок 10, *а*).

Реальные кристаллы имеют места ослабленных связей между атомами. Это объясняется наличием несовершенств решетки. Несовершенства решетки реальных металлических кристаллов обусловлены различными причинами. Это отсутствие в узлах решетки атомов, излишние атомы, внедренные между узловыми атомами и т.д. Особым видом несовершенства кристаллической решетки являются дислокации. Дислокации представляют собой линейные дефекты кристаллической решетки, имеющие значительную протяженность в одном направлении.

Под действием сдвигающих напряжений дислокация перемещается вдоль плоскости скольжения. Для перемещения дислокации требуется меньшее усилие, чем для смещения атомов в решетке без дислокаций. Это объясняется тем, что дислокация перемещается на расстояние меньше межатомного. Для продолжения деформации необходимо перемещение других дислокаций. Процесс пластической деформации сопровождается дополнительным возникновением дислокаций. В реальных недеформированных кристаллах количество дислокаций очень велико и достигает величины  $10^8$  на  $1 \text{ см}^2$  площади.

Таким образом, усилие, необходимое для пластической деформации кристалла, определяется двумя факторами: наличием дислокаций и возможностью их перемещения.

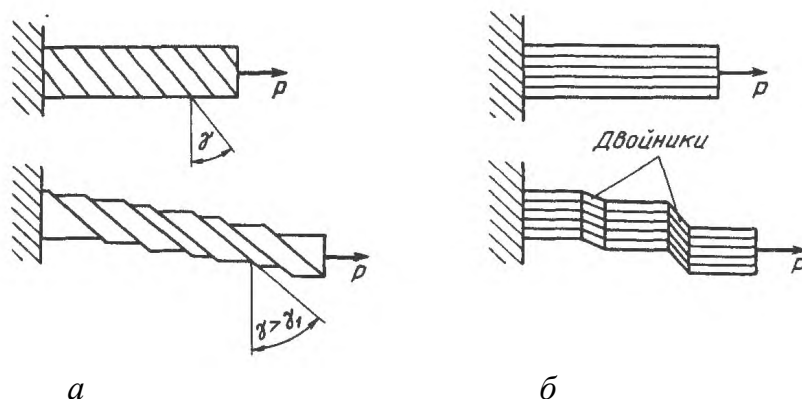


Рисунок 10 – Схемы пластической деформации скольжением (*а*) и двойникованием (*б*)

В некоторых металлах деформация происходит *двойникованием*. При этом часть кристалла переходит в положение, которое симметрично другой части кристалла (рисунок

10, б). Решетка деформированной части кристалла является зеркальным отображением решетки недеформированной части. При двойниковании смещение составляет доли периода, причем все плоскости деформированной части кристалла сдвигаются относительно соседних плоскостей на одинаковую величину. Переход решетки в новое положение происходит почти мгновенно и часто сопровождается характерным потрескиванием. Двойникованием может быть получена незначительная степень деформации. Этот механизм пластической деформации сопутствует основному механизму – скольжению.

Пластическая деформация поликристаллов складывается из деформации зерен и их относительного смещения. Пластическая деформация зерен представляет собой изменение их формы и размеров, и их относительное смещение – перемещение и поворот относительно друг друга. В результате сдвигов и поворота плоскостей скольжения зерно, которое до деформации имело округлую форму, постепенно вытягивается в направлении растягивающих сил и получает вытянутую форму в направлении наиболее интенсивного течения металла. Определенная ориентировка вытянутых в результате пластической деформации зерен называется *полосчатостью микроструктуры* (волокистостью).

Одновременно с изменением формы зерен в процессе пластической деформации оси зерен получают определенную преимущественную ориентировку вдоль деформации, т.е. некоторое однотипное расположение зерен в металле. Эта преимущественная ориентировка называется *текстурой деформации*. Появление текстуры наблюдается при деформациях около 50 % (относительное изменение сечения к первоначальному) и достигает наибольшего совершенства с ростом деформации.

Текстура металлов, у которых зерна имеют одинаковую ориентировку, приводит к тому, что поликристаллический металл приобретает свойства, близкие к свойствам монокристалла. В этом случае поликристаллический металл становится анизотропным, т.е. имеет неодинаковые свойства в различных направлениях.

Описанные выше процессы внутрикристаллитной деформации являются основными. В определенных условиях появляется смещение зерен относительно друг друга, т.е. будет наблюдаться межзеренная деформация. Так как пограничные участки зерен имеют значительную неоднородность по составу и искажение кристаллической решетки, пластический сдвиг на этих участках требует повышенной величины сдвигающего напряжения по сравнению с напряжением при сдвиге атомов в самом зерне. Таким образом, вблизи границ зерен расположены зоны затрудненной деформации. Наряду с этим на границе зерен могут быть микропустоты, скопления примесей в форме легкоплавких примесей, которые ослабляют связь между зернами. Т.е., металл вблизи границ может быть более прочным или менее прочным по сравнению с самим зерном.

Прочность границ зерен является необходимым условием прочности поликристалла. В случае слабой связи между зернами, прочность поликристаллического металла и его пластичность будут пониженными. Межкристаллитная деформация является нежелательной, так как даже небольшое развитие ее может привести к разрушению металла.

## 1.6 Наклеп и рекристаллизация

Как было показано выше, изменение формы и размеров поликристаллического металла в результате пластической деформации в той или иной мере связано с изменением формы отдельно взятого зерна. Поэтому при пластической деформации металл претерпевает структурные изменения, что ведет к изменению механических и других свойств металла. В деформируемом металле с увеличением степени деформации увеличиваются его прочностные характеристики. Явление изменения структуры и увеличение механических свойств металла в процессе пластической деформации называется *наклепом* или *упроч-*

нением. Явление упрочнения в настоящее время объясняет теория дислокаций. Упрочнение – это увеличение сопротивляемости сдвигу, которое вызывается накоплением (повышением плотности) дислокаций при пластической деформации. Продвижение дислокаций по кристаллу затрудняется в связи со скоплением их у препятствий. Такими препятствиями могут быть другие дислокации, границы зерен и т.д. В результате плотность дислокаций значительно возрастает. Так, предельная плотность дислокаций в упрочненном металле составляет  $10^{11}$ – $10^{12}$  на  $1\text{ см}^2$  площади. Кроме того, упрочнение вызывается также торможением дислокаций в связи с измельчением зерен, искажением решетки металла, возникновением напряжений. Особенно эффективными «барьерами» для дислокаций являются границы зерен.

В результате пластической деформации при низкой температуре металл не только упрочняется, но также изменяются многие его свойства. Более интенсивно изменение свойств происходит в области малых деформаций. При больших деформациях свойства изменяются в меньшей степени. Применительно к механическим свойствам металлов следует отметить, что с увеличением степени пластической деформации характеристики прочности возрастают, а характеристики пластичности убывают.

Появление наклепа при деформации позволяет в широких пределах регулировать конечные свойства металлоизделий. Холодной пластической обработкой (прокаткой, волочением и др.) можно в 2–3 раза повысить предел прочности и увеличить предел текучести.

С другой стороны, упрочнение заметно увеличивает сопротивление металла пластической деформации, а это увеличивает усилия, необходимые при деформировании. Одновременно с этим наклеп вызывает понижение пластических свойств металла, что приводит к опасности образования трещин, расслоений и других дефектов при дальнейшей деформации.

В наклепанном металле в результате пластической деформации происходит искажение кристаллической решетки. Атомы в такой решетке стремятся к перестройке, приводящей к уменьшению ее искажений, т.е. стремятся к более устойчивому состоянию. При низких температурах подвижность атомов мала. С повышением температуры она увеличивается, начинают развиваться процессы, которые приводят металл к равновесному состоянию.

Различают следующие стадии процесса устранения наклепа при нагреве: отдых (возврат), первичная рекристаллизация или рекристаллизация обработки, собирательная рекристаллизация или рост зерен, вторичная рекристаллизация.

Под *отдыхом (возвратом)* понимают частичное снятие напряжений и восстановление упруго искаженной кристаллической решетки путем перемещения атомов на небольшие расстояния, при нагреве металла на относительно невысокие температуры (ниже температуры рекристаллизации). При отдыхе заметных изменений в микроструктуре не наблюдается, металл сохраняет волокнистое строение. В результате отдыха твердость и прочность несколько понижаются, а пластичность возрастает.

При нагреве до достаточно высоких температур подвижность атомов заметно возрастает, и происходят процессы рекристаллизации.

*Рекристаллизацией* называется процесс образования и роста новых зерен при нагреве наклепанного металла до определенной температуры (температуры начала рекристаллизации). Этот процесс протекает в две стадии. Различают рекристаллизацию первичную (обработки) и собирательную.

*Первичная* рекристаллизация заключается в образовании зародышей и росте новых зерен с неискаженной кристаллической решеткой. Зародыши новых зерен возникают у границ, и особенно в местах пересечения границ зерен, пачек скольжения двойников. В

местах, связанных с наибольшими искажениями решетки при наклепе, происходит перемещение атомов, восстановление решетки и возникновение зародышей новых равноосных зерен. Вначале процесс протекает медленно, происходит зарождение центров кристаллизации, затем образуются мелкие зерна, которые растут и входят в непосредственное соприкосновение друг с другом. Стадия первичной рекристаллизации длится до тех пор, пока новые неискаженные зерна не заполнят весь объем металла.

*Собирательная* рекристаллизация является второй стадией процесса рекристаллизации и заключается в росте образовавшихся зерен. При этом одни зерна растут за счет других, за счет перехода атомов через границы раздела. Процессы собирательной рекристаллизации могут совершаться и до полного завершения первичной рекристаллизации. Результатом этого процесса может быть резкая неоднородность структуры по величине зерна.

Скорость рекристаллизации и характер конечной структуры зависят от многих факторов: степени предварительной деформации, температуры нагрева, скорости нагрева, скорости деформации, наличия примесей в сплаве и др. Основными из указанных факторов являются степень предварительной деформации и температура нагрева.

С началом рекристаллизации происходит существенное изменение свойств металла, которое противоположно изменению свойств металла при наклепе. При повышении температуры происходит разупрочнение металла, понижается прочность и твердость, а также электросопротивление и другие свойства, которые повышаются при наклепе. В то же время увеличиваются пластичность, а также вязкость, теплопроводность и другие свойства по сравнению с наклепанным состоянием.

При обработке металлов давлением процессы упрочнения (наклепа) и разупрочнения (рекристаллизационного отжига) протекают одновременно. Эти процессы обусловлены условиями деформации (температурой, скоростью, степенью деформации), происходят во времени, с определенными скоростями, а также зависят от природы деформируемого металла.

При холодной деформации главенствует упрочнение, а процессы разупрочнения (возврата и рекристаллизации) полностью отсутствуют. В результате плотность и пластичность уменьшаются, металл охрупчивается, при высоких степенях деформации образуется текстура.

В результате теплой деформации рекристаллизация и разупрочнение проходят не полностью, структура металла может быть полосчатой (волокнуистой) без следов рекристаллизации, а при значительной деформации наблюдается текстура деформации. Пластические свойства такого металла выше, чем металла, деформированного при отсутствии возврата, а прочностные свойства несколько ниже.

## **1.7 Пластичность металлов и сопротивление металлов пластической деформации**

*Пластичностью* называют свойство металла под действием сил изменять свою форму и размеры без разрушения. Пластичность представляет собой сложную характеристику металла и зависит от целого ряда факторов. Основными факторами, определяющими пластичность металла при обработке давлением, являются химический состав и структура металла, температура, скорость деформации, а также схема напряженного состояния.

В значительной степени на пластичность влияет химический состав металла. Наибольшую пластичность проявляют чистые металлы. Примеси, и даже ничтожное их содержание, как правило, значительно снижают пластичность. Примеси, растворяясь в небольших количествах, образуют хрупкие сетки по границам зерен. Такие примеси называ-

ют вредными. Вместе с тем некоторые примеси повышают пластичность, подавляя вредное влияние других примесей. Так, в стали содержание углерода до 0,8–1 % незначительно уменьшает пластичность металла. Дальнейшее повышение содержания углерода приводит к тому, что сталь в литом состоянии можно обрабатывать только ковкой.

При рассмотрении влияния структуры металла на пластичность различают литую структуру и деформированную. Металл в литом состоянии обладает меньшей пластичностью, чем в деформированном состоянии. Структурная неоднородность литого металла, которая выражается в различном строении дендритов, дендритной и зональной ликвации, наличии неплотностей и неравномерном распределении примесей снижает его пластичность.

После горячей пластической деформации литого металла структурная неоднородность его уменьшается и повышается его пластичность.

Как правило, пластичность металлов повышается с повышением температуры. Наибольшую пластичность металлы имеют между температурой рекристаллизации и температурой плавления. Пластичность с ростом температуры увеличивается не монотонно. Это объясняется тем, что некоторые примеси и легирующие добавки образуют легкоплавкие соединения (эвтектики), которые при некоторых температурах резко уменьшают пластичность.

Когда температура нагрева близка к температуре плавления, пластичность резко снижается из-за перегрева (интенсивный рост зерна) и пережога (окисление границ зерен).

Действие скорости деформации на пластичность при горячей деформации зависит от протекающих одновременно в металле двух процессов: упрочнения (наклепа) и разупрочнения (рекристаллизации). Скорость упрочнения металла определяется скоростью деформации, а скорость разупрочнения – скоростью рекристаллизации, которая зависит от температуры нагрева металла.

С увеличением скорости деформации при холодной обработке давлением в обрабатываемом металле выделяется больше тепла деформации, которое может вызывать отчасти развитие процесса разупрочнения и, следовательно, повысить пластичность металла.

При обработке давлением большое влияние на пластичность металла оказывает схема напряженного состояния. Положительное влияние на пластичность оказывают сжимающие напряжения, а отрицательное – растягивающие. Проявление пластических свойств металла зависит не только от того, какие напряжения к нему приложены – растягивающие или сжимающие, но и от величины этих напряжений, которая определяется значением среднего давления:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{cp}$  – среднее давление, МПа;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения, МПа.

В зависимости от того, какие по величине и по знаку прикладываются к обрабатываемому материалу напряжения, он может находиться в хрупком или пластическом состоянии. Например, в условиях всестороннего растяжения весьма пластичные материалы, как низкоуглеродистая сталь, переходят в хрупкое состояние. С другой стороны, при всестороннем сжатии такие хрупкие по своей природе материалы, как песчаник и мрамор, могут обладать пластичностью, т.е. устойчиво изменять свои форму и размеры без разрушения. Некоторые металлы (например, магний и его сплавы, ряд жаропрочных сплавов и др.) успешнее пластически деформируются тогда, когда более ярко проявляется схема всесто-

ронного сжатия. Поэтому на практике при обработке металлов давлением стремятся создать схему, близкую к всестороннему сжатию, которая обеспечивает самую высокую пластичность.

Наряду с пластичностью важной технологической характеристикой металлов является сопротивление пластической деформации. Эта характеристика дает количественную оценку податливости обрабатываемого металла и имеет большое значение при назначении технологических режимов прокатки металла, определяя силовые условия процесса. Чем выше сопротивление деформации металла, тем ниже его податливость обработке давлением и тем труднее его обрабатываемость. Металл, обладающий большим сопротивлением деформации, обрабатывают с меньшими обжатиями и при этом используют большие усилия и более мощное оборудование.

Сопротивление пластической деформации при обработке давлением также зависит от ряда факторов: химического состава металла; температуры, при которой деформируется металл; скорости и степени деформации; напряженного состояния деформируемого металла.

Химический состав обрабатываемого металла, его кристаллическая решетка в значительной степени влияют на сопротивление пластической деформации. Тугоплавкие металлы имеют более высокие значения сопротивления пластической деформации, чем легкоплавкие. Как правило, легирующие примеси повышают сопротивление пластической деформации. Температура является наиболее сильно действующим фактором. Понижение сопротивления пластической деформации с повышением температуры часто не имеет плавный характер.

При относительно низких температурах существенное влияние на сопротивление пластической деформации оказывает наклеп (упрочнение). При наклепе сопротивление деформации металлов повышается. Это явление наблюдается при холодной прокатке у большинства металлов, за исключением свинца и олова, температура рекристаллизации которых не превышает комнатную температуру.

При горячей обработке металлов влияние наклепа тесно связано с влиянием скорости деформации, т.е. приращением степени деформации за единицу времени. Сущность этого явления заключается в следующем. При деформировании металла протекающая в нем рекристаллизация осуществляется противоположно процессу наклепа. Однако скорость рекристаллизации в большинстве случаев отстает от скорости деформации и, тем самым, не полностью снимается наклеп металла. Следовательно, чем выше скорость деформации, тем меньше полнота протекания рекристаллизации, и тем выше сопротивление пластической деформации.

## **1.8 Внешнее трение при обработке металлов давлением**

В любом процессе обработки металлов давлением смещаемый объем деформируемого тела стремится к некоторому перемещению по поверхности инструмента. При этом возникают силы трения, затрудняющие это перемещение. Такое трение называется *контактным* или *внешним*. Трение присутствует в любом процессе пластической деформации и сказывается на ходе обработки, затрудняя процесс деформации и увеличивая энергосиловые параметры. Под влиянием сил трения в ряде случаев усилие деформации возрастает в несколько раз по сравнению с тем усилием, которое обусловлено истинным сопротивлением металла деформации. Чем больше трение, тем большее усилие нужно для деформации и тем больше расход энергии на деформацию. Кроме того, при действии сил трения металл деформируется неравномерно, что приводит к разнородности его структуры, возникновению растягивающих напряжений в металле, которые иногда приводят к наруше-



нию сплошности изделия. От характера и величины сил трения зависит степень износа инструмента и качество поверхности изделия.

Трение при пластической деформации в процессах обработки металлов давлением существенно отличается от трения в узлах механизмов и машин и трения, возникающего при перемещении одного тела по поверхности другого.

При обработке давлением создаются некоторые специфические условия, которые и приводят к различию между трением пластической деформации и обычным трением скольжения:

а) высокие удельные давления на поверхности контакта инструмента с металлом, превышающие иногда 2500 МПа, в тоже время даже в самых тяжело нагруженных подшипниках прокатных станов удельные давления в 5–10 раз ниже;

б) высокая температура (при горячей обработке), вызывающая изменение физико-химического состояния контактной поверхности металла (образование окалины);

в) постоянное обновление поверхности деформируемого металла в связи с его пластическим течением.

Различают следующие виды трения:

1) чистое – на поверхности трения нет ни окислов, ни смазки; механизм чистого трения может наблюдаться только в условиях физического опыта и при обработке в вакууме;

2) сухое – на поверхности трения имеются пленки окислов и загрязнения, но нет искусственной смазки;

3) жидкостное – поверхности трущихся тел полностью изолированы друг от друга смазкой;

4) полусухое – между трущимися телами имеются лишь отдельные участки, заполненные какой-либо вязкой средой;

5) полужидкостное – при наличии смазки имеются непосредственные контакты поверхностей трущихся тел;

б) граничное – пленка жидкой смазки, разделяющей поверхности трущихся тел, мономолекулярна и настолько тонка, что в ней не проявляются объемные свойства смазки.

При обработке давлением наблюдается трение полусухое или полужидкостное.

Трение скольжения характеризуют коэффициентом трения, оценивающим силовое воздействие двух контактирующих тел при их перемещении относительно друг друга.

Коэффициент трения зависит от многих технологических факторов процесса пластической деформации, таких как состояние поверхности инструмента, материал инструмента, температура и скорость деформации, химический состав деформируемого металла, наличие смазки и др.

Состояние поверхности инструмента определяется качеством обработки и его износом в процессе эксплуатации. Чем чище поверхность инструмента, тем ниже коэффициент трения.

При обработке инструмента на его поверхности остаются риски разной глубины. Направление рисков определяется направлением взаимного перемещения резца, шлифовального круга и обрабатываемого инструмента (валков, штампов и т.п.). Так, на прокатных валках после токарной обработки или шлифовки риски направлены по винтовой линии с малым шагом, при строжке бойков молота риски параллельны перемещению резца. Это приводит к анизотропии трения: коэффициент трения получается разным в различных направлениях (вдоль рисков он меньше, чем поперек них). Скольжение металла по инструменту поперек рисков будет затруднено в большей степени, чем вдоль рисков.

Коэффициент трения поперек рисков на 20–50 % больше, чем вдоль них. Чем чище поверхность (двойная шлифовка), тем меньше коэффициент трения и зависимость его от

направления.

Состояние поверхности инструмента изменяется в процессе его эксплуатации – шероховатость поверхности увеличивается, коэффициент трения повышается.

Состояние поверхности деформируемого металла также оказывает влияние на коэффициент трения. Особенно большое влияние состояния поверхности тела наблюдается при горячей деформации в связи с образованием окалины.

Влияние химического состава инструмента и деформируемого тела на коэффициент трения связано с родством их, механическими и упругими свойствами. Так, при прокатке стали на стальных валках коэффициент трения выше, чем на чугунных. Чем больше твердость инструмента, тем ниже коэффициент трения. Так, при волочении проволоки наибольший коэффициент трения наблюдается на стальных волокнах, меньший на твердосплавных и еще меньший на алмазных.

При обработке очень мягких металлов (свинец, алюминий и др.) наблюдается налипание частиц этих металлов на инструмент, что приводит к повышению коэффициента трения.

При обработке давлением с нагревом химический состав деформируемого материала определяет состав и физические свойства окалины и тем самым оказывает влияние на коэффициент трения.

С увеличением удельного давления при пластической деформации коэффициент трения уменьшается.

Влияние температуры обрабатываемого металла на коэффициент трения сложное.

При изменении температуры изменяются сопротивление деформации, физико-химические свойства окалины, образующей промежуточный слой. Установлено, что при нагревании коэффициент трения сначала растет, достигает максимального значения, затем уменьшается (рисунок 11). Такой ход зависимости можно объяснить тем, что сначала коэффициент трения растет в связи с окислением поверхности; в этом интервале температур образуется твердая окалина, повышающая коэффициент трения. При дальнейшем повышении температуры происходит размягчение окалины, и она начинает играть роль смазки. Максимального значения коэффициент трения для стали достигает при температуре примерно 800–900 °С.

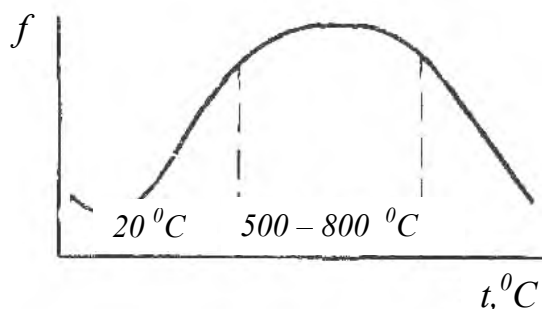


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента трения от температуры обрабатываемого металла

Горячая обработка давлением стали происходит при температурах выше 850–950 °С, т.е. в основном в области уменьшения коэффициента трения с повышением температуры.

С увеличением скорости деформирования коэффициент трения снижается. Чем больше скорость, тем меньше длительность контакта на площадках соприкосновения инструмента и деформируемого тела и тем меньше роль молекулярного взаимодействия. Интенсивность снижения коэффициента трения с ростом скорости уменьшается.

При обработке давлением широко применяют смазки. Основное значение смазки – снижение коэффициента трения. Смазка образует промежуточный слой между деформи-

руемым телом и инструментом, полностью или частично изолирующий их друг от друга. Если смазка полностью изолирует трущиеся поверхности, то получается трение жидкостное. При обработке металлов давлением вследствие высоких удельных давлений смазка не всегда полностью изолирует трущиеся поверхности. Поэтому получается трение полужидкостное.

Для того чтобы смазка в достаточной степени изолировала деформируемое тело от инструмента, не разрывалась и не выдавливалась, она должна иметь достаточную активность и вязкость.

Активность смазки – способность образовывать на поверхности трения прочный защитный слой из ее полярных молекул. Активность смазки зависит от наличия в ней поверхностно активных веществ, к которым относят жирные кислоты (олеиновая, стеариновая, пальмитиновая) и их соли, являющиеся мылами. Для создания активности достаточно небольшой добавки жирных кислот к смазке.

Вязкость смазки обеспечивает ее сопротивление выдавливанию из места контакта трущейся пары. Смазка, обладающая достаточной активностью и вязкостью, при высоком качестве отделки поверхности трущихся тел и высокой скорости скольжения может создать условия для жидкостного или полужидкостного трения.

При холодной обработке давлением с большими степенями деформации и высокими скоростями (прокатка тонких полос и лент, волочение проволоки), когда выход тепла значителен, смазка, помимо основного требования – снижения коэффициента трения, должна охлаждать инструмент и обрабатываемый металл. В связи с этим она должна обладать высокой теплоемкостью.

При горячей обработке давлением (особенно при высоких температурах) с большими удельными давлениями и относительно большой длительностью контакта между металлом и инструментом (например, прессование стальных прутков, труб) смазка должна обладать малой теплопроводностью. Это позволит предохранить инструмент от чрезмерного перегрева.

Помимо указанных основных свойств, смазка должна удовлетворять ряду технологических требований: легко наноситься на металл и инструмент, быть химически пассивной (не разъедать металл и инструмент), иметь минимальное количество остатков, чтобы не загрязнять поверхность после термической обработки, быть безвредной для рабочих.

В зависимости от назначения применяют следующие смазки:

1) Жидкие и консистентные смазки – эмульсии, масла растительные, минеральные и смеси. Эмульсии, представляющие собой смесь воды и взвешенных в ней мельчайших капелек масла, обладают хорошей охлаждающей способностью. Их применяют, главным образом, при холодной обработке металлов давлением с большими скоростями.

При больших давлениях применяют масла и их смеси, обладающие большей вязкостью. Для повышения вязкости к маслам иногда добавляют загустители (парафин, стеарин).

2) Порошкообразные смазки – мыла в виде порошка, стружки, графита.

3) Стекло в виде порошка или ваты применяют при горячем прессовании сталей и тугоплавких металлов. При соприкосновении с нагретым металлом стекло размягчается, плотно прилипает к поверхности металла и, выполняя роль смазки, предохраняет инструмент от перегрева.

4) При волочении проволоки и труб из высокопрочных сталей и сплавов применяют покрытие заготовки мягкими пластичными металлами (медь, свинец), на которые наносят смазку.

## Контрольные вопросы

1. Перечислите основные процессы обработки металлов давлением.
2. Назовите основные типы кристаллических решеток.
3. Что такое упругая и пластическая деформация?
4. Каковы основные схемы напряженного и деформированного состояний металла при обработке давлением?
5. В чем заключается механизм пластической деформации металла?
6. Что такое текстура деформации?
7. Что такое наклеп и рекристаллизация? Основные стадии процесса устранения наклепа.
8. Что такое пластичность металла и сопротивление металла деформации? От каких факторов они зависят?
9. Какую роль играет трение в процессах обработки металлов давлением?
10. Какие факторы влияние на коэффициент трения Вы знаете?

## 2 Прокатное производство

### 2.1 Общая характеристика прокатного производства

Современное металлургическое предприятие с полным металлургическим циклом включает в себя три основных производства: доменное, сталеплавильное и прокатное. Движение потока металла на металлургическом предприятии осуществляется в направлении от доменного производства к прокатному (рисунок 12).

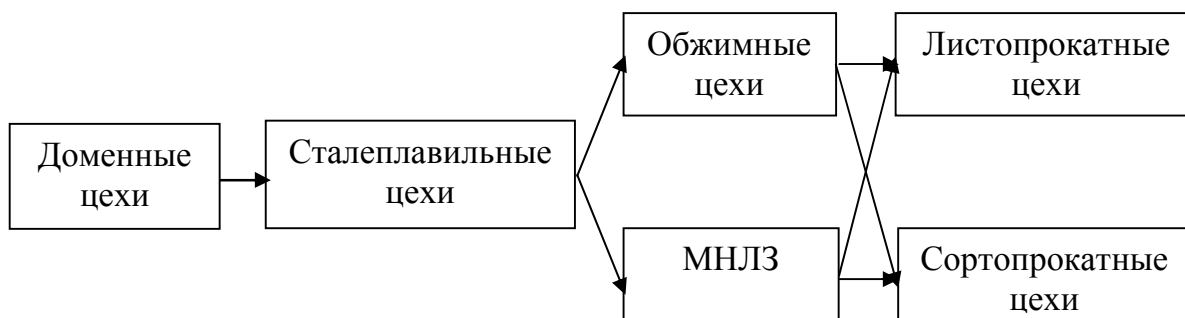


Рисунок 12 – Схема расположения основных цехов металлургического предприятия

В процессе металлургического производства в доменных цехах производят передельный (а также в небольшом количестве – литейный) чугун. Передельный чугун идет на переработку в сталеплавильные цеха.

Получаемую сталь разливают в слитки или на машинах непрерывного литья заготовок в непрерывнолитые заготовки, которые являются исходной продукцией при производстве проката.

Таким образом, производство проката является заключительным этапом в производстве металлопродукции на металлургическом предприятии.

Производство готового проката осуществляется в две стадии: на первой – получение заготовки (полупродукта) на обжимных и заготовочных станах и на второй – прокатка заготовки в готовый прокат на листопрокатных и сортопрокатных станах. Как правило, обжимные и заготовочные станы устанавливаются в головных прокатных цехах металлургического предприятия, за которыми или параллельно им располагаются цехи с листопрокатными и сортопрокатными станами. Основными задачами производства готового проката является получение проката необходимого количества и требуемого качества по форме, размерам, физико-механическим свойствам, состоянию поверхности и с наименьшими затратами.

Кроме того, производство проката осуществляется также и на металлургических предприятиях с неполным металлургическим циклом, на которых отсутствует доменное производство. Существуют также металлургические предприятия, в состав которых входят только прокатные цехи. Такие предприятия называются передельными.

Производство проката, как уже было сказано, является заключительным технологическим процессом производства металлопродукции в общем процессе ее производства на металлургическом предприятии. Прокатные цехи и станы представляют собой комплекс взаимосвязанных технологических переделов металла. В этой связи к прокатным цехам и станам предъявляются высокие требования с точки зрения технического и технологического их уровня, а также к возможности и необходимости производства проката по количеству и качеству, в том числе и его сортаменту, в целях удовлетворения потребностей промышленности страны. Прокатными станами производится металлопродукция различного назначения. Разнообразие прокатной продукции определяет назначение и специализацию

прокатных станов и обуславливается необходимостью промышленного производства страны в том или ином виде прокатной продукции.

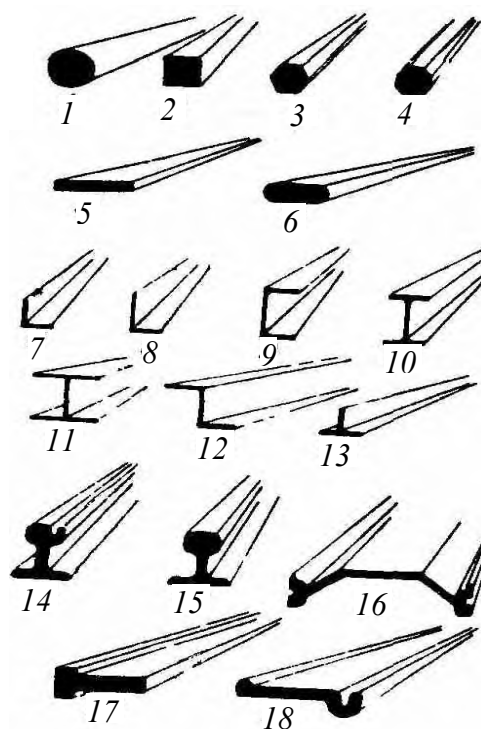
Развитие прокатного производства (прокатных цехов и станов), его эффективность базируются на использовании нового, более совершенного нагревательного, прокатного и отделочного оборудования, характеризующегося поточностью ряда технических процессов и операций, более высокими скоростями и интенсивными режимами работы, все возрастающими массами исходного продукта, повышением качества исходного слитка и непрерывнолитой заготовки.

## 2.2 Профильный и марочный сортамент прокатной продукции

Продукция прокатных цехов различается по форме поперечного сечения и по размерам. Совокупность прокатываемых профилей называется *профильным сортаментом*.

Весь сортамент прокатной продукции можно разделить на четыре основные группы: сортовой прокат, листовой прокат, трубы и прочие виды проката.

Наиболее разнообразным является *сортовой прокат*. В зависимости от формы поперечного сечения он разделяется на простые профили, фасонные профили общего, отраслевого и специального назначения (рисунок 13).



1 – круг, 2 – квадрат, 3 – шестигранник, 4 – восьмигранник, 5 – полоса, 6 – полоса с закругленными кромками, 7 – уголок равнобокий, 8 – уголок неравнобокий, 9 – швеллер, 10 – двутавровая балка, 11 – широкополочная балка, 12 – зетовый профиль, 13 – тавровый профиль, 14 – рельс трамвайный, 15 – рельс железнодорожный, 16 – шпунтовый профиль, 17 – профиль для электровозов и вагоностроения, 18 – профиль для обода колеса автомобиля

Рисунок 13 – Сортамент простых и фасонных прокатных профилей

К простым профилям относятся профили простой геометрической формы: круглый, квадратный, шестигранный, восьмигранный, полосовой и другие.

К фасонным профилям общего назначения относят угловой равнобокий и нерав-

нобокий, швеллер, двутавровый и широкополочный балочные, зетовый и другие.

Фасонными профилями отраслевого назначения являются рельсы для железнодорожного транспорта и профили, применяемые в автомобильной промышленности, тракторостроении, вагоностроении, сельскохозяйственном, химическом и нефтяном машиностроении, строительстве и т.д.

К фасонным профилям специального назначения относится напильни-ковая сталь.

*Листовой прокат* разделяют на четыре основные группы в зависимости от толщины: толстолистовой (более 3,9 мм), тонколистовой (от 0,5 до 3,9 мм), жель (0,05 – 0,5 мм) и фольга (менее 0,05 мм).

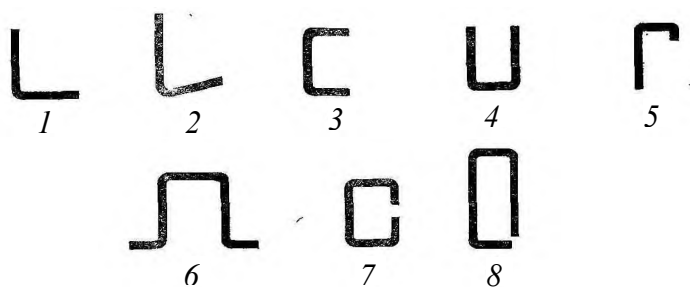
Горячекатаный прокат производят в листах толщиной от 0,5 до 160 мм и рулонах толщиной 1,2 – 16 мм. Ширина листового проката может быть в пределах от 600 до 5000 мм, а длины 1,2 – 12 м.

Холоднокатаный листовой прокат производят толщиной 0,35 – 5 мм и шириной от 500 до 2300 мм в листах и рулонах.

*Трубы* разделяют на бесшовные и сварные. Исходной заготовкой при производстве бесшовных труб являются круглые заготовки, производимые в сортопрокатных цехах. Сварные трубы получают с прямым или спиральным швом из листовой стали путем печной сварки либо электросварки.

Кроме перечисленных групп проката производят также *гнутые профили*, изготавливаемые из листа толщиной от 0,2 до 20 мм. По сравнению с горячекатанными профилями гнутые профили обеспечивают большую точность, имея меньшую толщину, могут иметь закрытую форму, не выполнимую при прокатке (рисунок 14).

Для различных отраслей машиностроения производят *периодические прокатные профили*, из которых изготавливают массовые детали. Примером периодического профиля является арматура, которая представляет собой круглые стержни с выступами, идущими по трехзаходной винтовой линии, с двумя продольными ребрами.



- 1 – равнобокая угловая сталь, 2 – специальная угловая сталь, 3 – швеллер,  
4 – U-образный профиль, 5 – Г-образный профль, 6 – корытообразный профиль,  
7 – С-образный профиль, 8 – полый прямоугольный профиль

Рисунок 14 – Сортамент гнутых профилей

Интенсивное развитие большинства отраслей промышленности и создание новых, которые являются потребителями прокатной продукции, повышают требования к качеству металла, вызывают необходимость расширения сортамента и увеличение производства дефицитных видов проката. Вместе с тем растет потребность в расширении производства экономичных профилей, т.е. таких, на производство которых расходуется меньше металла. К таким видам проката можно отнести тонкостенные и широкополочные балки, тонкостенные угловые профили, швеллеры, гнутые профили и др. Для нужд машиностроения имеет большое значение выпуск периодических профилей, использование которых обеспечивает заметную экономию металла (до 20–30 %), повы-

шает производительность при штамповке деталей, снижает трудоемкость изготовления поковок и др.

*Марочный сортамент* представляет собой совокупность марок стали, из которых производят прокатные изделия.

Стали различают по способу производства, качеству, химическому составу и назначению.

*По способу производства* прокатываемые стали делят на мартеновскую, конвертерную и электросталь.

Способ производства стали оказывает влияние на свойства стали. От него зависит содержание постоянных примесей (марганец, кремний, сера, фосфор и газы – водород, кислород, азот) и их распределение в металле. Наиболее чистой по содержанию вредных примесей (серы и фосфора) является электросталь. Поэтому в электропечах в основном выплавляют легированную высококачественную сталь.

*По химическому составу* стали делят на углеродистые и легированные. Свойства углеродистых сталей зависят от содержания углерода. По содержанию углерода стали подразделяют на низкоуглеродистые (до 0,25 % С), среднеуглеродистые (0,25–0,60 % С) и высокоуглеродистые (0,60–2,0 % С).

Легированными сталями называют стали, в состав которых входят один или несколько легирующих элементов (хром, никель, молибден, ванадий, вольфрам, кобальт, титан и т. д.). К легирующим компонентам относятся также марганец и кремний, если они содержатся в большем количестве, чем в углеродистой стали. Так, марганец считается легирующим компонентом, если он введен в сталь в количестве сверх требуемого по технологии выплавки (более 0,7 %).

Различают низколегированные, среднелегированные и высоколегированные стали с суммарным содержанием легирующих компонентов соответственно до 2,5; 2,5–10 и свыше 10 %.

*По назначению* прокатываемые стали делят на конструкционные, инструментальные и специальные.

К наиболее распространенным прокатываемым сталям относят конструкционные углеродистые и легированные стали, предназначенные для изготовления деталей машин и конструкций.

Из конструкционных сталей широко используют углеродистые стали, выплавляемые главным образом в мартеновских печах и конвертерах.

В соответствии с ГОСТ 380 – 94 *конструкционную углеродистую сталь обыкновенного качества* в зависимости от назначения и гарантируемых характеристик подразделяют на группы А, Б и В.

Сталь группы А идет на изделия, которые не подвергаются горячей обработке и, следовательно, структура и свойства, которые сталь получила в прокатном цехе металлургического завода, сохраняются и у потребителя.

В этом случае сталь поставляется с гарантируемыми механическими свойствами, которыми являются временное сопротивление при растяжении, предел текучести, относительное удлинение и проба на загиб.

Химический состав стали не гарантируется, за исключением случаев, когда сталь поставляют с гарантированными, не превышающими пределов, содержаниями серы, фосфора, хрома, никеля, меди, кремния и углерода (например, сталь для сварных конструкций, которая должна также испытываться на свариваемость).

Для сталей группы Б гарантируемой характеристикой является химический состав. Обычно стали этой группы заказывают в том случае, если их у потребителя подвергают горячей механической или термомеханической обработке и, следовательно, для потре-



бителя решающее значение приобретает состав стали, так как им определяется режим горячей обработки и конечные механические свойства изделий из этой стали.

Сталь группы В выплавляют в мартеновских печах и конвертерах и поставляют с гарантируемыми механическими свойствами и с дополнительными требованиями по химическому составу.

Конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества является основным материалом для строительства металлических конструкций, а также для изготовления деталей машин. Так, стали групп А и Б используют для изготовления арматуры, анкерных болтов, листов, заклепок, труб; деталей машин (втулок, рычагов, гаек, болтов и т. д.), не подвергаемых упрочняющей термической обработке; и подвергаемых воздействию средних напряжений. Стали повышенного качества (группы В) используют главным образом в мосто- и судостроении, сельскохозяйственном машиностроении и т. д.

Одним из важнейших изделий для железнодорожного транспорта являются рельсы, которые прокатывают из раскисленной спокойной углеродистой мартеновской стали.

Для железнодорожного транспорта прокатывают осевую заготовку квадратного сечения с закругленными углами из мартеновской углеродистой стали для вагонных и тендерных осей.

Осевую заготовку круглого сечения диаметром 150 мм для осей трамвайных вагонов прокатывают из мартеновской углеродистой стали.

*Качественные конструкционные углеродистые стали* разделяют на группы 1 с нормальным (до 0,5–0,8 %) и группы 2 с повышенным (до 0,9–1,2 %) содержанием марганца.

В автотракторной и других отраслях машиностроения возросла потребность в конструкционной листовой стали, изготавливаемой из качественной конструкционной углеродистой стали. Эта сталь должна быть высокопластичной, так как при штамповке она подвергается глубокой вытяжке.

Качественную конструкционную углеродистую сталь с повышенным содержанием марганца применяют в авиастроении, автотракторостроении (для заклепок, шестерен, рессор, осей, пружин и т.д.) и других отраслях промышленности.

К качественной конструкционной углеродистой стали относят также автоматную сталь, имеющую повышенное содержание серы. Автоматная сталь предназначена для обработки на быстроходных автоматах. Структура стали отличается резко выраженной полосчатостью, являющейся следствием газовой и дендритной ликвации, а также наличия сульфидных включений. Такая структура способствует получению ломкой, легко отделяющейся от поверхности стружки, особенно после протяжки в холодном состоянии. Поверхность изделия получается гладкой и чистой. Стойкость инструмента повышается. Автоматную сталь применяют для изготовления винтов, болтов и гаек, сложных тонкостенных и особенно трудных для обработки частей автомобилей, счетных и пишущих машин, в точном машиностроении и приборостроении.

*Углеродистые инструментальные качественные стали* имеют более узкие пределы по содержанию серы, фосфора и неметаллических включений и обладает более высокими механическими свойствами. Из инструментальной углеродистой стали изготавливают мерительный инструмент (нутромеры, штангенциркули, измерительные калибры и т.д.), режущий инструмент, работающий при малой скорости резания (зубила, напильники, метчики, шаберы и т.д.), а также корпуса токарных и строгальных резцов, хвостовики сверл, зенкеров и разверток, обоймы матриц, корпуса штампов и т. д. Инструменты, изготовленные из этой стали, после термической обработки обладают высокой прочностью, твердостью и износостойкостью, что весьма важно для сохранения формы и размеров инструмента.

К *конструкционным легированным сталям* относят стали с различным содержанием легирующих компонентов, идущие на изготовление деталей машин ответственного назначения. Как правило, эти стали у потребителя подвергаются термической обработке.

К конструкционным легированным сталям относят хромистую, хромомарганцевую, хромокремнистую, хромомолибденовую, хромоникелевую хромованадиевую, хромокремнемарганцевую, хромоникельвольфрамовую, хромоникельмолибденовую, хромоникельвольфрамованадиевую и др. Эти стали применяют для изготовления деталей машин и оборудования различных отраслей промышленности.

К конструкционным легированным сталям относят также рессорно-пружинные стали, обладающие высоким пределом упругости (текучести) и высоким пределом выносливости при достаточной вязкости и пластичности.

К конструкционным легированным сталям относят и шарикоподшипниковую сталь, применяемую для изготовления шариков, роликов и колец подшипников.

Прокат из шарикоподшипниковой стали поставляется в виде сортовой стали и труб.

К *прокатываемым легированным инструментальным сталям* относят:

а) сталь для режущего и мерительного инструмента;

б) сталь для штампового инструмента для деформирования в холодном и горячем состоянии.

К прокатываемым низколегированным сталям относят стали, содержащие небольшое количество углерода (до 0,25 %) и в небольших количествах различные легирующие компоненты. Эти стали отличаются от углеродистой более высокой прочностью и ударной вязкостью. Из этих сталей прокатывают листовую и сортовую сталь для мостостроения, судостроения и вагоностроения, листовую сталь для магистральных газопроводов, для котлов высокого давления, шпунты для гидротехнических сооружений и др.

Введение легирующих компонентов позволяет увеличить временное сопротивление при растяжении и предел текучести, а, следовательно, уменьшить массу металла в изделии.

К прокатываемым углеродистым и низколегированным сталям следует отнести также арматурную сталь для армирования железобетонных конструкций, сталь для мостостроения, сталь для судостроения.

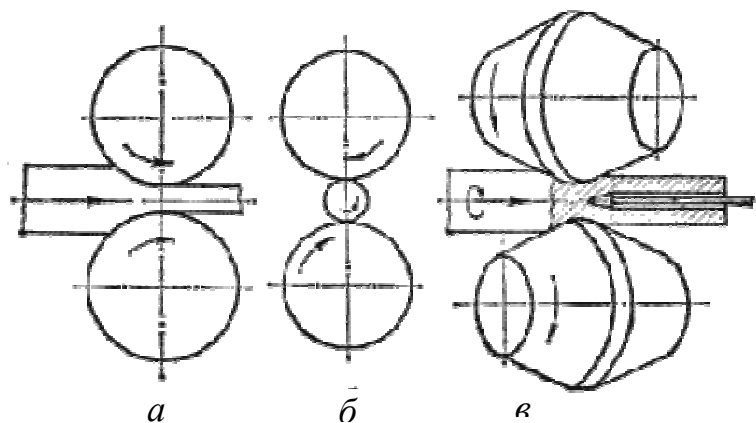
К прокатываемым специальным сталям и сплавам относят нержавеющие (коррозионностойкие), жаропрочные, жаростойкие, износостойкие, электротехнические и другие, которые широко применяют в машиностроении, приборостроении, электротехнической, химической, нефтяной, пищевой и др.

### **2.3 Сущность процесса прокатки. Характеристики деформации при прокатке**

Процесс прокатки – это комплекс последовательных термомеханических операций, выполняемых на соответствующем оборудовании в определенной последовательности, предназначенный для получения продукции с заданными показателями качества: точность формы и геометрических размеров, качество поверхности, механические свойства и др.

Существуют три основных способа прокатки, имеющих определенное отличие по характеру выполнения деформации: продольная, поперечная, поперечно-винтовая (рисунок 15).

При *продольной прокатке* деформация осуществляется между вращающимися в разные стороны валками (рисунок 15, а). Этим способом изготавливается около 90 % проката.



а – продольная; б – поперечная; в – поперечно – винтовая  
Рисунок 15 – Схемы основных видов прокатки

При *поперечной прокатке* (рисунок 15, б) оси прокатных валков и обрабатываемого тела параллельны или пересекаются под небольшим углом. Оба валка вращаются в одном направлении, а заготовка круглого сечения – в противоположном.

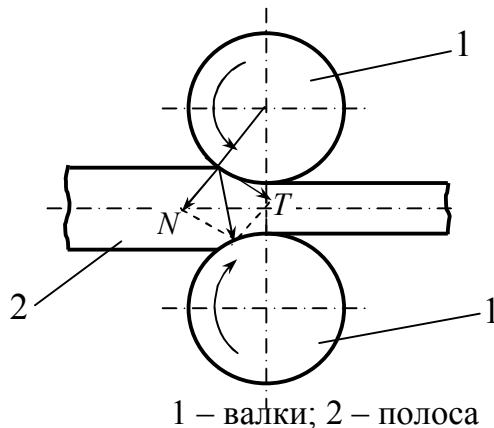
В процессе поперечной прокатки обрабатываемое тело удерживается в валках с помощью специального приспособления. Обжатие заготовки по диаметру и придание ей требуемой формы сечения обеспечивается профилировкой валков и изменением расстояния между ними. Данным способом производят специальные периодические профили, изделия представляющие тела вращения – шары, оси, шестерни.

При *поперечно-винтовой прокатке* (рисунок 15, в) валки, вращающиеся в одну сторону, установлены под углом друг другу. Прокатываемый металл получает еще и поступательное движение. В результате сложения этих движений каждая точка заготовки движется по винтовой линии. Применяется для получения пустотелых трубных заготовок.

Наиболее распространенным видом прокатки является продольная прокатка (рисунок 16). Обрабатываемое тело, в общем случае называемое полосой, пропускается между двумя валками, вращающимися в противоположные стороны. При прохождении между валками толщина полосы уменьшается, а длина и ширина увеличиваются, при этом сечение заготовки принимает форму зазора между валками.

При соприкосновении полосы с валками со стороны валков на полосу начинают действовать две силы  $N$ , направленные нормально к поверхности валков, и две силы трения  $T$ , направленные касательно.

Из этих двух сил сила трения является втягивающей силой (рисунок 16), а нормальная сила – выталкивающей, препятствующей вхождению металла в валки.



1 – валки; 2 – полоса

Рисунок 16 – Схема процесса продольной прокатки

Очевидно, когда втягивающая и выталкивающая силы равны между собой, захвата

металла валками не будет, когда же выталкивающая сила больше, захват невозможен. Только тогда, когда втягивающая сила больше выталкивающей, произойдет захват металла валками.

Таким образом, металл втягивается в валки благодаря силам трения, появляющимся на поверхности соприкосновения металла с валками.

В процессе прокатки полоса подвергается деформации не одновременно по всей длине, а только на некотором участке, называемом очагом деформации, который характеризуется продольным (рисунок 17, а) и поперечным (рисунок 17, б) сечениями.

При упрощенном описании процесса прокатки за очаг деформации принимают область, ограниченную дугами окружностей валков  $AB$  и  $A'B'$ , плоскостями входа металла в валки  $AA'$  и выхода металла из валков  $BB'$  и боковыми гранями полосы. Это так называемый *геометрический очаг деформации*.

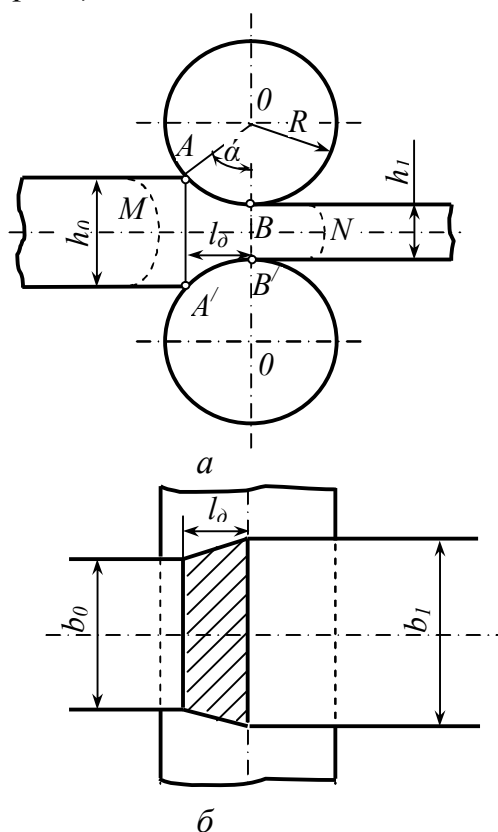


Рисунок 17 – Очаг деформации при прокатке

Однако экспериментальные исследования показывают, что пластическая деформация распространяется и на зоны, прилегающие к геометрическому очагу деформации, называемые внеконтактными зонами деформации. Поэтому *фактический очаг деформации* (область, заключенная между линиями  $M$  и  $N$ ) больше геометрического и включает в себя внеконтактные зоны.

Геометрический очаг деформации характеризуется следующими понятиями:

- дуга захвата (дуга контакта  $AB$ ), по которой металл соприкасается с валками. Горизонтальную проекцию дуги захвата принимают за длину очага деформации  $l_d$ ;
- угол захвата  $\alpha$  (угол контакта) – угол, соответствующий дуге захвата.

В процессе прокатки изменяются линейные размеры полосы – толщина, ширина и длина. Рассмотрим систему показателей, которые характеризуют величину деформации в каждом из этих направлений.

Изменение толщины полосы характеризуется величиной абсолютного и относительного обжатия, а также коэффициентом обжатия.

*Абсолютное обжатие* – разность между исходной и конечной толщинами полосы

$$\Delta h = h_0 - h_1, \quad (3)$$

где  $\Delta h$  – абсолютное обжатие, мм;

$h_0$  – толщина полосы перед проходом, мм;

$h_1$  – толщина полосы после прохода, мм.

*Условное относительное обжатие* – отношение абсолютного обжатия к первоначальной толщине полосы

$$\varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_h$  – условное относительное обжатие.

*Истинное относительное обжатие* – определяется как натуральный логарифм отношения исходной толщины полосы к конечной

$$\delta_h = \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (5)$$

где  $\delta_h$  – истинное относительное обжатие.

Относительное обжатие определяется в долях единицы или в процентах; в последнем случае результаты расчета по формулам (2) и (3) умножаются на 100 %.

*Коэффициент обжатия* – отношение начальной толщины полосы к конечной

$$\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}, \quad (6)$$

где  $\frac{1}{\eta}$  – коэффициент обжатия.

Изменение поперечных размеров полосы называется уширением. Показатели уширения аналогичны показателям высотной деформации.

*Абсолютное уширение* – разность между конечной и исходной ширинами полосы

$$\Delta b = b_1 - b_0, \quad (7)$$

где  $\Delta b$  – абсолютное уширение, мм;

$b_1$  – ширина полосы после прохода, мм;

$b_0$  – ширина полосы перед проходом, мм.

*Условное относительное уширение* – отношение абсолютного уширения к начальной ширине полосы

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_b$  – условное относительное уширение.

*Истинное относительное уширение* – натуральный логарифм отношения конечной ширины полосы к начальной

$$\delta_b = \ln \frac{b_1}{b_0}, \quad (9)$$

где  $\delta_b$  – истинное относительное уширение.

Условное и истинное относительное уширение также определяется в долях единицы либо в процентах.

*Коэффициент уширения* – отношение ширины полосы после прохода к исходной ширине полосы

$$\beta = \frac{b_1}{b_0}, \quad (10)$$

где  $\beta$  – коэффициент уширения.

*Абсолютное удлинение* – разность между конечной и исходной длинами полосы

$$\Delta l = l_1 - l_0, \quad (11)$$

где  $\Delta l$  – абсолютное удлинение, мм;

$l_1$  – длина полосы после прохода, мм;

$l_0$  – длина полосы перед проходом, мм.

*Условное относительное удлинение* – отношение абсолютного удлинения к начальной длине полосы

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon_l$  – условное относительное удлинение.

*Истинное относительное удлинение* – натуральный логарифм отношения конечной длины полосы к исходной

$$\delta_l = \ln \frac{l_1}{l_0}, \quad (13)$$

где  $\delta_l$  – истинное относительное удлинение.

Величины  $\Delta l$ ,  $\varepsilon_l$  и  $\delta_l$  редко применяются на практике для характеристики продольной деформации, однако очень широко используется показатель, называемый *коэффициентом вытяжки*.

*Коэффициент вытяжки* – отношение длины полосы после прохода к начальной

длине полосы

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0}, \quad (14)$$

где  $\lambda$  – коэффициент вытяжки.

Если технологический процесс включает несколько проходов полосы через валки, то в этом случае различают *частные коэффициенты вытяжки* (в каждом проходе) и *общий коэффициент вытяжки*

$$\lambda_{\text{общ}} = \frac{l_k}{l_0}, \quad (15)$$

где  $\lambda_{\text{общ}}$  – общий коэффициент вытяжки при прокатке;

$l_k$  – конечная длина полосы после прокатки, мм.

Общий коэффициент вытяжки можно определить и из другого выражения

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \dots \cdot \lambda_n, \quad (16)$$

где  $\lambda_1 \div \lambda_n$  – частные вытяжки в проходах;  $n$  – число проходов.

Существует также понятие *среднего коэффициента вытяжки* в нескольких проходах. Под величиной среднего коэффициента вытяжки подразумевается такой коэффициент вытяжки, который был бы в том случае, если бы коэффициенты вытяжки во всех проходах были одинаковыми. Тогда можно записать

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_{\text{ср}} \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot \lambda_{\text{ср}} \cdot \dots \cdot \lambda_{\text{ср}} = \lambda_{\text{ср}}^n. \quad (17)$$

Из формулы (15) получаем величину среднего коэффициента вытяжки

$$\lambda_{\text{ср}} = \sqrt[n]{\lambda_{\text{общ}}}, \quad (18)$$

где  $\lambda_{\text{ср}}$  – средний коэффициент вытяжки при прокатке.

Объем тела при пластической деформации изменяется незначительно. Поэтому в теории пластической деформации принимается условие постоянства объема металла: объем тела при пластической деформации остается неизменным. В действительности объем тела в процессе пластической деформации не остается неизменным. Так при горячей обработке литого металла происходит его уплотнение в результате заваривания раковины, пустот, микротрещин и, соответственно, некоторое уменьшение объема металла. При холодной обработке давлением, наоборот, происходит некоторое увеличение объема в результате образования микротрещин. Однако все эти изменения незначительны, и ими можно пренебречь.

Уравнение постоянства объема широко используется в расчетах изменения формы тел при всех процессах обработки давлением.

Тогда имеем

$$V_0 = V_1, \quad (19)$$

где  $V_0, V_1$  – соответственно объем полосы до и после прохода в клетки.

Для прямоугольной полосы уравнение постоянства объема металла можно записать в следующем виде

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1,$$

откуда следует

$$\left(\frac{h_1}{h_0}\right) \cdot \left(\frac{b_1}{b_0}\right) \cdot \left(\frac{l_1}{l_0}\right) = \eta \cdot \beta \cdot \lambda = 1. \quad (20)$$

Т.е. коэффициенты деформации в трех основных направлениях связаны между собой условием постоянства объема металла.

Исходя из условия постоянства объема металла можно получить

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{h_0 \cdot b_0}{h_1 \cdot b_1} = \frac{F_0}{F_1}, \quad (21)$$

где  $F_0, F_1$  – площадь поперечного сечения полосы до и после прохода в клетки соответственно, мм<sup>2</sup>.

Таким образом, коэффициент вытяжки характеризует не только изменение длины полосы, но и изменение ее площади поперечного сечения.

Так как объем металла при деформации остается постоянным, то через любое поперечное сечение очага деформации в единицу времени должно проходить одинаковое количество металла. Это условие в теории прокатки называется условием постоянства секундных объемов.

Объем металла, проходящий через любое поперечное сечение очага деформации в единицу времени (секунду), составляет:

$$\frac{F_i \cdot l_i}{\tau} = F_i \cdot \mathcal{G}_i, \quad (22)$$

где  $F_i$  – площадь поперечного сечения полосы в произвольном сечении, мм<sup>2</sup>;

$l_i$  – продольное перемещение полосы через это сечение за время  $\tau$ , мм;

$\mathcal{G}_i$  – скорость движения полосы в данном сечении, м/с.

Т.е. условие постоянства секундных объемов

$$F_i \cdot \mathcal{G}_i = const, \quad F_0 \cdot \mathcal{G}_0 = F_i \cdot \mathcal{G}_i = F_1 \cdot \mathcal{G}_1, \quad (23)$$

где  $\mathcal{G}_0, \mathcal{G}_1$  – соответственно скорости движения полосы на входе и выходе из валков, м/с.

Площади поперечного сечения полосы по мере продвижения ее от плоскости входа в валки к плоскости выхода из валков уменьшаются. Поэтому, чтобы сохранилось равенство секундных объемов, скорости частиц в соответствующих сечениях должны



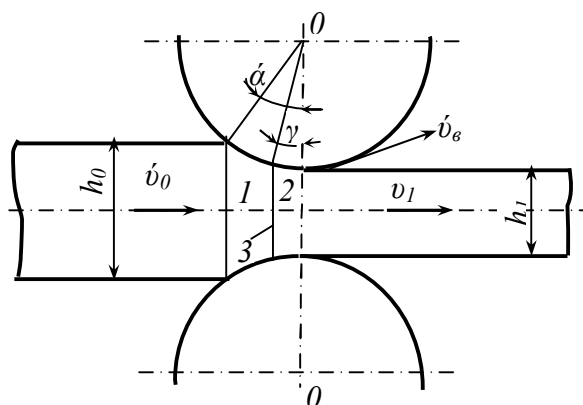
постепенно возрастать.

Из выражения (23) можно получить

$$\mathcal{G}_1 = \frac{F_0 \cdot \mathcal{G}_0}{F_1}, \quad \mathcal{G}_1 = \lambda \cdot \mathcal{G}_0. \quad (24)$$

Таким образом, скорость выхода полосы из валков больше скорости входа полосы в валки на величину коэффициента вытяжки.

Кроме того, исследованиями установлено, что при установившемся процессе прокатки скорость выхода полосы из валков больше окружной скорости валков, а скорость входа полосы в валки меньше окружной скорости валков. Это связано с тем, что при обжатии полосы по высоте частицы металла вынуждены перемещаться в продольном направлении. При этом некоторое количество металла выжимается вперед по ходу прокатки; скорость этих частиц, полученная в результате деформации, суммируется с окружной скоростью валков. Другая часть смещенного объема металла отжимается назад, против хода прокатки; скорость этих частиц вычитается из окружной скорости валков. Т.е. в очаге деформации есть зона попятного движения металла или зона отставания (где скорость полосы меньше окружной скорости валков) и зона попутного движения металла или зона опережения (где соотношение скоростей обратное) (рисунок 18).



1 – зона отставания; 2 – зона опережения; 3 – нейтральное сечение  
Рисунок 18 – Зоны отставания и опережения в очаге деформации

Сечение, где скорости движения полосы и валков одинаковы, называется нейтральным сечением. Его положение в очаге деформации характеризуется величиной нейтрального угла.

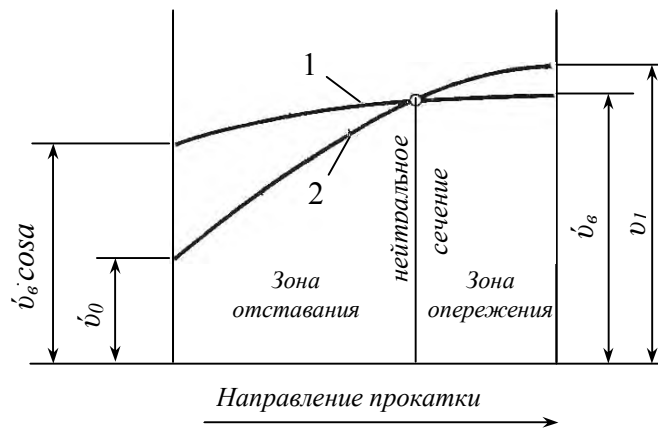
Следовательно, опережение – это превышение скорости выхода металла из валков по сравнению с их окружной скоростью, а отставание – уменьшение скорости входа металла в валки по сравнению с их окружной скоростью. На рисунке 19 представлена диаграмма, отражающая соотношение скоростей валков и металла на всем протяжении очага деформации.

Опережение определяется по формуле

$$S_{h1} = \frac{\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_s}{\mathcal{G}_s}, \quad (25)$$

где  $S_{h1}$  – опережение;

$\mathcal{G}_e$  – окружная скорость вращения валков, м/с.



1 – горизонтальная составляющая окружной скорости валков; 2 – скорость металла  
Рисунок 19 – Соотношение скоростей валков и металла в очаге деформации

Опережение можно выразить в процентах

$$S_{h1} = \frac{\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_e}{\mathcal{G}_e} \cdot 100\%.$$

Отставание

$$S_{h0} = \frac{\mathcal{G}_e \cdot \cos \alpha - \mathcal{G}_0}{\mathcal{G}_e \cdot \cos \alpha} = 1 - \frac{\mathcal{G}_0}{\mathcal{G}_e \cdot \cos \alpha}. \quad (26)$$

В теории прокатки основное внимание уделяется исследованию опережения. Это объясняется тем, что опережение экспериментально и аналитически определяется проще, чем отставание. С другой стороны именно величина опережения необходима для решения ряда практических задач, когда требуется достаточно точно определить скорость выхода полосы из валков (скорость прокатки). Если же известно опережение, то отставание нетрудно рассчитать по формуле (26).

Опережение является чувствительным кинематическим показателем процесса прокатки. Изменение любого геометрического или физического фактора прокатки отражается на величине опережения. На величину опережения сказываются такие параметры, как диаметр валков, на которых осуществляется процесс прокатки; величина абсолютного обжатия; толщина полосы; угол захвата; коэффициент трения и пр.

Влияние всех этих параметров на опережение выражается формулой С. Экелунда, по которой и производят расчет опережения процесса прокатки

$$S_{h1} = \frac{\gamma^2}{2} \cdot \left( \frac{D}{h_1} - 1 \right), \quad (27)$$

где  $\gamma$  – нейтральный угол (рисунок 17), град.

Для нахождения нейтрального угла можно воспользоваться формулой С. Экелунда – И.М. Павлова

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \beta} \right), \quad (28)$$

где  $\beta$  – угол трения, град, определяемый из выражения

$$\beta = \arctg f. \quad (29)$$

где  $f$  – коэффициент трения.

Угол захвата рассчитывается по формуле

$$\alpha = \arccos \left( 1 - \frac{\Delta h}{D} \right), \quad (30)$$

где  $D$  – диаметр валков, мм.

Для определения коэффициента трения наиболее оптимальной для горячей деформации является формула Б.П. Бахтинова – М.М. Штернова, в соответствии с которой коэффициент трения определяется, исходя из условия влияния на него температуры и скорости деформирования, а также материала инструмента и деформируемого металла

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_{np}), \quad (31)$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий материал валков;

$k_2$  – коэффициент, учитывающий влияние скорости деформирования на коэффициент трения;

$k_3$  – коэффициент, характеризующий марку стали;

$T_{np}$  – температура, при которой прокатывается металл, °С.

Коэффициент, учитывающий влияние скорости прокатки на коэффициент трения, можно определить по графику (рисунок 20).

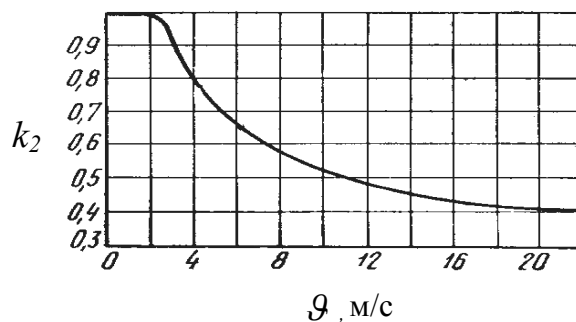


Рисунок 20 – Значения коэффициента  $k_2$  для расчета коэффициента трения по уравнению Б.П. Бахтинова – М.М. Штернова

Для более точного расчета коэффициента  $k_2$  можно использовать следующую формулу

$$k_2 = 1,67 \cdot G_1^{-0,25} - 0,4. \quad (32)$$

Из рисунка 20 видно, что при скоростях менее 2 м/с коэффициент  $k_2 = 1$ ; при скоростях более 20 м/с коэффициент  $k_2 = 0,4$ .

Коэффициент, характеризующий марку стали рассчитывается по формуле

$$k_3 = 0,97926 + [C] \cdot (0,0031 \cdot [Ni] + 0,00175 \cdot [W]) + 0,02457 \cdot [Mn] + 0,02144 \cdot [Cr] + 0,001 \cdot [Mo] \quad (33)$$

где [...] – содержание данного элемента в стали, %.

Для упрощения расчета коэффициента  $k_3$  можно использовать данные таблицы 1.

Таблица 1 – Значения коэффициента  $k_3$  для расчета коэффициента трения по уравнению Б.П. Бахтинова – М.М. Штернова

Стали	Типичная марка	$k_3$
Углеродистые	Ст1	1,00
Ледебуритные	P18, X12	1,10
Перлитно-мартенситные	ШХ15	1,30
Аустенитные	X13H4Г9	1,40
Аустенитные с включениями феррита или ледеburита	X18H10Г	1,44
Ферритные	X17Ю5	1,55
Аустенитные с включениями карбидов	X15H60	1,62

Для холодной прокатки при определении коэффициента трения можно воспользоваться формулой А.П. Грудева

$$f = \frac{K_{см} \cdot [1 + (0,4 + 0,01 \cdot \varepsilon_h) \cdot R_z]}{1 + 0,25 \cdot \sqrt{v_{50}} - 0,005 \cdot v_{50}} \cdot \left[ 0,07 - \frac{0,1 \cdot g_e}{2 \cdot (1 + g_e) + 3 \cdot g_e^2} \right], \quad (34)$$

где  $K_{см}$  – коэффициент, учитывающий природу смазки;

$v_{50}$  – коэффициент вязкости смазки при 50 °С, мм<sup>2</sup>/с;

$R_z$  – высота неровностей на поверхности валков, мкм.

В формуле (34) относительное обжатие подставляется не в долях единицы, а в процентах.

Коэффициент, учитывающий природу смазки, определяется по таблице 2.

Таблица 2 – Влияние смазки на коэффициент трения при холодной прокатке.

Вид смазки	$K_{см}$
Машинное масло	1,35
Веретенное масло	1,25
Вода	1,00
Эмульсия	1,00
Керосин	1,00
Хлопковое масло	0,90
Касторовое масло	0,90
Пальмовое масло	0,90

К энергосиловым характеристикам процесса прокатки относятся усилие, момент, мощность и работа прокатки.

Правильное определение усилия прокатки необходимо для проведения расчетов оборудования рабочей линии стана на прочность и выбора оптимального технологического режима горячей или холодной прокатки. Усилие прокатки можно определить измерением при помощи приборов или формуле

$$P = P_{cp} \cdot F_{\kappa}, \quad (35)$$

где  $P$  – усилие прокатки в данном проходе, МН;

$P_{cp}$  – среднее давление металла на валки в очаге деформации, МПа;

$F_{\kappa}$  – горизонтальная проекция поверхности контакта металла с валками (контактная площадь), м<sup>2</sup>.

При прокатке полос прямоугольного сечения в цилиндрических валках определение контактной площади не представляет затруднений. В этом случае форма поверхности касания в плане может быть принята за трапецию с основаниями  $b_0$  и  $b_1$  и высотой  $l_0$  (см. рисунок 17). Следовательно, площадь контактной поверхности определяется по формуле

$$F_{\kappa} = 0,5 \cdot (b_0 + b_1) \cdot l_0 = b_{cp} \cdot l_0, \quad (36)$$

где  $b_{cp}$  – средняя ширина полосы в очаге деформации, мм.

При прокатке в валках металл оказывает внутреннее сопротивление деформации. Усилие, которое возникает между металлом и валком, должно преодолеть это внутреннее сопротивление металла и заставить металл изменить свою форму. Усилие в зоне контакта металла с валками, отнесенное к единице площади поверхности этого контакта, называют средним давлением.

Среднее давлением может быть определено по формуле А.И. Целикова

$$P_{cp} = 1,15 \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_s, \quad (37)$$

где  $n_{\sigma}$  – коэффициент, учитывающий влияние напряженного состояния в очаге деформации;

$\sigma_s$  – сопротивление металла деформации, МПа (п.1.7).

Изменение среднего контактного давления при прокатке является результатом влияния механических свойств металла и интенсивности действия продольных подпирющих напряжений, с увеличением которых повышается среднее контактное давление.

Увеличение коэффициента внешнего трения также приводит к увеличению продольного напряжения и, следовательно, контактных давлений. Особенно большое влияние внешнее трение оказывает при прокатке тонких полос в горячем и холодном состоянии. Так, увеличение коэффициента трения с 0,05 до 0,15 может приводить к повышению удельного давления на 30–40 %.

Толщина полосы оказывает значительное влияние на контактное давление. Чем тоньше полоса, тем сильнее влияние внешнего трения на продольное напряжение и, следовательно, на контактное давление. С увеличением толщины полосы продольное напряжение уменьшается и при прокатке высоких полос оказывается настолько малым, что практически не влияет на контактное давление.

Увеличение диаметра валков при одинаковом обжатии способствует удлинению дуги захвата. Поэтому с увеличением диаметра валков увеличиваются силы трения, препятствующие продольному течению металла, повышая тем самым подпирющие напряжения и, следовательно, среднее контактное давление.

Температура металла и скорость прокатки влияют на контактное давление через сопротивление деформации и коэффициент трения. С увеличением скорости прокатки возрастают скорость и сопротивление деформации и, следовательно, контактное давление.

Сопротивление металла деформации можно найти по формуле Л.В. Андreyока – Г.Г. Тюленева

$$\sigma_s = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_h)^b \cdot \left( \frac{T_{np}}{1000} \right)^c, \quad (38)$$

где  $K$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты для конкретной марки стали;

$\sigma_0$  – базовое сопротивление металла деформации, полученное методом растяжения при стандартных условиях:  $\varepsilon = 10\%$ ;  $\xi = 1 \text{ с}^{-1}$ ;  $T = 1000^\circ \text{C}$ ;

$\xi$  – скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ , определяемая по формуле

$$\xi = \frac{g_1 \cdot \varepsilon_h}{l_0}. \quad (39)$$

Момент прокатки, т.е. крутящий момент, который необходимо приложить к валкам, чтобы обеспечить их вращение в процессе прокатки, обычно определяют, исходя из общего усилия по формуле

$$M_{np} = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot l_0, \quad (40)$$

где  $M_{np}$  – момент прокатки, МН·м;

$\psi$  – коэффициент, показывающий какую часть от длины очага деформации составляет плечо равнодействующей усилия, определяемый по формуле Бровмана

$$\psi = 0,5 - 0,1 \cdot \varepsilon_h. \quad (41)$$

Длина очага деформации рассчитывается по формуле

$$l_0 = \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (42)$$

где  $R$  – радиус валков клетки, мм, равный

$$R = \frac{D}{2}. \quad (43)$$

Если известна величина крутящих моментов, то определение мощности и работы прокатки не представляет затруднений. Мощность прокатки рассчитывается по формуле

$$N_{np} = \frac{M_{np} \cdot g_e}{R_e}, \quad (44)$$

где  $N_{np}$  – мощность прокатки, МВт.

Окружную скорость вращения валков можно определить из формулы (24)

$$g_6 = \frac{g_1}{1 + S_{h1}}.$$

Знания работы и расхода энергии при прокатке дают возможность определить мощность двигателя вновь устанавливаемого прокатного стана или проверить достаточность мощности установленного двигателя при внедрении нового режима обжатий, нового технологического процесса.

Работа прокатки складывается из работы, затраченной на деформацию прокатываемого металла, работы, идущей на преодоление трения металла о поверхность валков, дополнительной работы, идущей на преодоление сил трения в движущихся частях стана в процессе прокатки и в период холостого хода и др.

Величину работы, затрачиваемой на прокатку, можно определить теоретически или исходя из экспериментальных данных удельного расхода энергии при прокатке.

При прокатке прямоугольной полосы в валках с гладкой бочкой работа может быть рассчитана по формуле

$$A_{np} = \frac{M_{np} \cdot l_1}{(1 + S_{h1}) \cdot R_6}, \quad (45)$$

где  $A_{np}$  – работа прокатки, МДж.

## 2.4 Классификация прокатных станов

*Прокатным станом* называют комплекс машин и агрегатов, предназначенных для пластической деформации металла в валках (собственно прокатки), дальнейшей его обработки (правки, резки и пр.) и транспортирования. Кроме того, в прокатных цехах установлены нагревательные печи и колодцы, печи для отжига и нормализации, устройства для очистки поверхности, лужения и оцинкования полосы, станки для шлифования и нарезки калибров валков и т.д. Все это, а также подъемные краны и другое оборудование не входят в понятие «прокатный стан», однако они необходимы для обеспечения работы прокатного цеха и выпуска готовой продукции требуемого качества.

Оборудование прокатного стана делят на две группы: оборудование, входящее в линии рабочих клетей, и прочее оборудование для транспортировки и отделки металла.

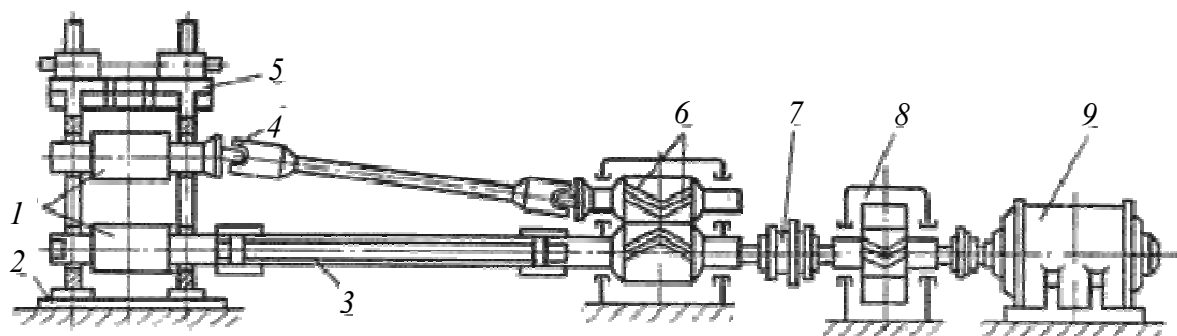
Оборудование для деформирования металла называется основным и располагается на *главной линии прокатного стана* (линии рабочих клетей).

Главная линия прокатного стана состоит из рабочей клетки и линии привода, включающей двигатель, редуктор, шестеренную клетку, муфты, шпиндели. Схема главной линии прокатного стана представлена на рисунке 21.

Рабочая клетка является основным устройством прокатного стана, т.к. в ней осуществляется собственно прокатка металла. Клетка представляет собой две массивные стальные литые станины, установленные на плитовины. В станинах смонтированы подушки с подшипниками и валками, а также устройства для перемещения верхнего валка по высоте и его осевой фиксации, направляющие проводки для металла и др.

Прокатные валки выполняют основную операцию прокатки – деформацию (обжатие) металла и придание ему требуемых размеров и формы поперечного сечения. В процессе деформации металла, вращающиеся валки воспринимают усилие, возникающее

при прокатке, и передают его на подшипники и другие детали рабочей клетки стана.



1 – прокатные валки; 2 – плита; 3 – треховый шпиндель; 4 – универсальный шпиндель; 5 – рабочая клетка; 6 – шестеренная клетка; 7 – муфта; 8 – редуктор; 9 – двигатель

Рисунок 21 – Схема главной линии прокатного стана

Прокатные валки можно разделить на две основные группы: листовые и сортовые.

Валки листовых станов служат для прокатки листов, полос и ленты. Бочка этих валков имеет цилиндрическую форму и иногда их называют гладкими. Валки листовых станов состоят из трех основных элементов (рисунок 22): рабочей части – бочки валка (диаметром  $D$  и длиной  $L$ ), которая при прокатке непосредственно соприкасается с деформируемым металлом; опорной части – шеек (диаметром  $d_{ш}$  и длиной  $l_{ш}$ ), расположенных с обеих сторон бочки и опирающихся на подшипники валка; приводного конца валка.

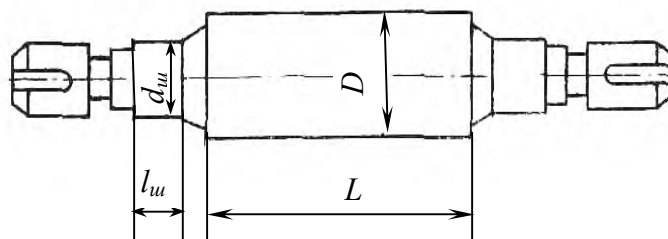


Рисунок 22 – Форма и основные элементы листового валка

Валки сортовых станов служат для прокатки заготовок и сортового профильного металла. На поверхности бочки этих валков есть углубления, соответствующие профилю прокатываемого металла. Эти углубления называют ручьями (ручьи двух валков с зазором между ними образуют калибры), а валки – ручьевыми (калиброванными) (рисунок 23). Валки сортового стана характеризуются рабочим диаметром  $D_p$ , диаметром буртов  $D_b$  и номинальным диаметром  $D_n$ .

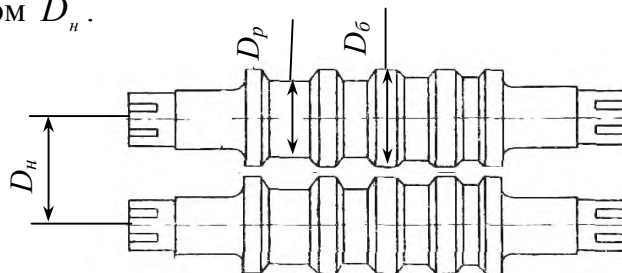


Рисунок 23 – Форма сортовых валков

Передающие механизмы и устройства линии привода в зависимости от назначения и конструкции прокатного стана могут быть различными. На крупных станах (обжимных, толстолистовых), а также на станах, прокатывающих металл с большой скоростью, при-



меняют индивидуальный привод рабочих валков от отдельных электродвигателей: в этом случае передаточным устройством являются универсальные шпиндели, промежуточные валы и муфты.

На других станах предусмотрен общий привод рабочих валков от шестеренной клетки (шестеренные клетки предназначены для разделения крутящего момента и передачи вращения универсальным шпинделям от электродвигателя и представляют собой одноступенчатый редуктор, передаточное отношение которого равно единице, а роль шестерен выполняют шестеренные валки); в этом случае между электродвигателем и рабочей клетью в одну линию расположены моторная муфта, шестеренная клетка и универсальные шпиндели с устройством для их уравнивания. Если частота вращения электродвигателя не соответствует частоте вращения валков, то в линии привода валков устанавливают редуктор и коренную зубчатую муфту.

Шпиндели предназначены для передачи крутящего момента от шестеренной клетки прокатным валкам при отклонении от соосности до  $10-12^{\circ}$ . При незначительном перемещении в вертикальной плоскости применяют шпиндели трещоточного типа в комплекте с трещоточной муфтой. Внутренние очертания трещоточных муфт отвечают форме сечения хвостовика валка или шпинделя. Муфтой предусмотрен зазор 5–8 мм, что допускает возможность работы с перекосом  $1-2^{\circ}$ . При значительных перемещениях валков в вертикальной плоскости ось шпинделя может составлять значительный угол с горизонтальной плоскостью, в этом случае применяют шарнирные или универсальные шпиндели, которые могут передавать крутящий момент прокатным валкам при перекосе шпинделя до  $10-12^{\circ}$ .

Главный электродвигатель прокатного стана является двигателем специального (металлургического) типа с воздушным продуваемым охлаждением. Для станков с постоянной скоростью прокатки (черновых клетей непрерывных станков) применяют синхронные (реже асинхронные) электродвигатели. Для станков с регулируемой скоростью прокатки используют электродвигатели постоянного тока большой мощности (5–7 тыс. кВт), питаемые от специальных машинных или тиристорных преобразователей, в ряде случаев от ртутных выпрямителей.

Машины и агрегаты поточных технологических линий прокатного цеха, не входящие в главные линии станков, предназначены для подачи металла от печи или нагревательных колодцев к приемному рольгангу стана (слитковозы), поворота слитка на рольганге (поворотные устройства), транспортирования металла в соответствии с технологическим процессом (рольганги или транспортеры), передвижения металла вдоль бочки валков для задачи его в соответствующий калибр (манипуляторы), поворота металла относительно его продольной оси (кантователи), охлаждения металла (холодильники), травления металла (травильные установки), разматывания рулонов (разматыватели), сматывания полосы в рулон или проволоки в бунт (моталки), резки металла (ножницы и пилы), для отделки металла (правки и дрессировки, клеймения, укладки, промасливания, упаковки и других процессов).

Эти машины и агрегаты весьма разнообразны; общая масса их значительно превышает массу машин и механизмов, входящих в главные линии стана.

Все прокатные станы, работающие на металлургических предприятиях, несмотря на многообразие конструкций, классифицируются по назначению, количеству и расположению рабочих клетей и валков в рабочих клетях.

По назначению, т.е. по виду выпускаемой продукции, прокатные станы можно разделить на две основные группы: для получения полупродукта, для производства готовой продукции.

К станам для производства полупродукта относятся обжимные и заготовочные станы. Обжимные: *блуминг* – обжимной стан для переработки стальных слитков сечением

более 125×125 мм; *слябинг* – обжимной универсальный стан для переработки крупных стальных слитков в слябы шириной более 700 мм и толщиной более 75 мм; *блюминг* – *слябинг* обжимной универсальный стан для переработки стальных слитков в блюмы и слябы, отличающийся высоким подъемом верхнего вала (до 1200 мм) с целью осуществления ребрового прохода при обжатии боковых кромок слябов. Заготовочные: *непрерывный* и *линейный заготовочные станы*, предназначенные для прокатки из блюмов заготовок квадратного и прямоугольного сечений от 50×50 до 150×150 мм.

К станам для производства готовой продукции относятся: *рельсобалочный (сортовой)*, предназначенный для производства круглого профиля диаметром 80–300 мм, двутавровых балок до № 60, швеллеров до 40, рельсов до № 18 и других профилей; *крупносортовый стан* – для производства квадратных и круглых профилей размером 80–200 мм, двутавровых балок швеллеров до № 30 и др; *среднесортный стан* – для производства квадратных и круглых профилей 30–100 мм, швеллеров до № 12; *мелкосортовый стан* – для производства круглых профилей диаметром до 20 мм, квадратных профилей со стороной до 18 мм, полос толщиной до 25 мм и уголков до № 5; *проволочный стан* – для прокатки катанки диаметром от 5 до 10 мм; *полосовой (штрипсовый) стан* – для производства полосовой стали толщиной до 1,5–12 мм и шириной до 400 мм; *толстолистовой стан* – для производства листов толщиной до 40–50 мм и шириной до 3000–4500 мм; *листовые станы горячей прокатки* – для производства листов толщиной 1,5–12 мм и шириной 1000–2350 мм (масса рулона до 10 т); *листовые станы холодной прокатки* – для производства листов толщиной 0,5–2,5 мм; *трубопрокатный стан* – для выполнения всех основных технологических операций при производстве цельнокатаных (бесшовных) труб; *лентопрокатный стан* – для холодной прокатки ленты (полос) шириной до 250 мм; *фольгопрокатный стан* – для холодной прокатки фольги толщиной до нескольких микрон (из стали и цветных металлов); *колесопрокатный стан* – для производства цельнокатаных железнодорожных колес и дисков; *шаропрокатный стан* – для поперечной прокатки шаров и других коротких тел вращения в винтовых калибрах; *стан для прокатки зубчатых колес* – специальный стан для горячей прокатки прямозубых, шевронных цилиндрических и конических шестерен с модулем 4–10.

Основным параметром обжимных, заготовочных и сортовых станов является диаметр валков или шестерен шестеренной клетки.

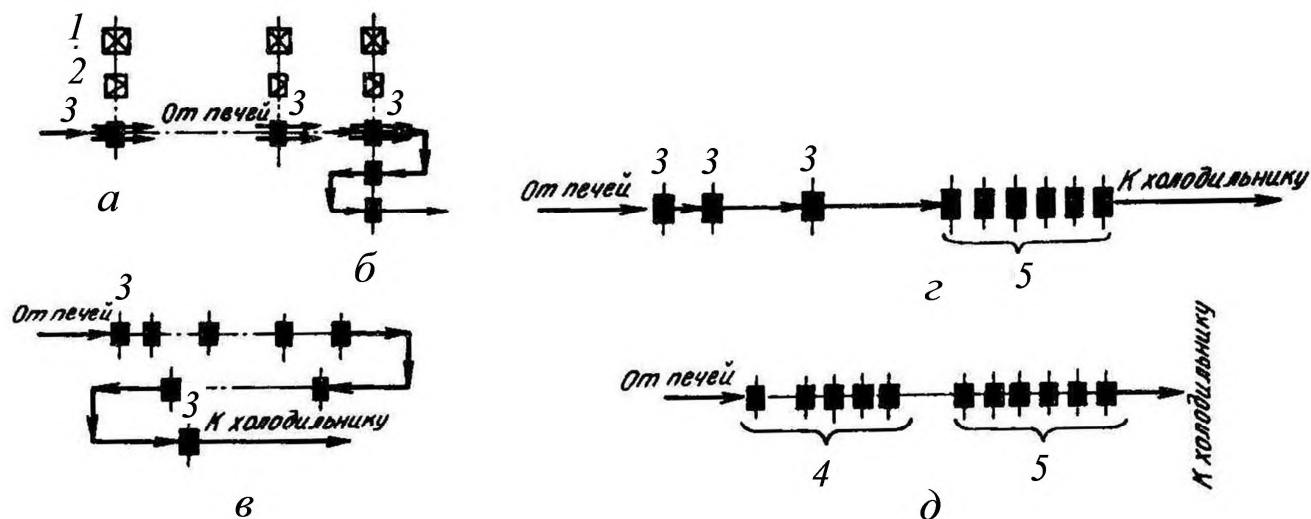
Основным параметром листовых станов является длина бочки вала, которая определяет наибольшую ширину прокатываемых на стане листов или полос.

По количеству и расположению рабочих клеток прокатные станы разделяют на следующие пять групп: одноклетевые, линейные многоклетевые, зигзагообразные (последовательные), полунепрерывные и непрерывные (рисунок 24).

*Одноклетевые* станы являются простейшим типом прокатного стана (рисунок 24, а). В состав оборудования стана входят одна рабочая клетка и линия привода рабочих валков, которая состоит из шпинделей, шестеренной клетки, редуктора, муфт и главного электродвигателя. Входящее в линию привода валков оборудование в основном повторяется на прокатных станах с более сложным расположением рабочих клеток. К станам этой группы относятся станы для производства полупродукта и готового проката (станы горячей и холодной прокатки).

Наиболее простыми являются *линейные* многоклетевые прокатные станы, на которых рабочие клетки расположены в одну или более линий (рисунок 24, б). При этом каждая линия приводится от одного электродвигателя. Одноклетевые станы могут быть реверсивными, когда рабочие валки могут попеременно вращаться в одну и другую сторону, или неререверсивными – рабочие валки вращаются только в одну сторону. Линейные многоклетевые станы используют главным образом как заготовочные, сорто-

вые, рельсобалочные, проволочные и листовые.



а – одноклетевая; б – линейный многоклетевый в две линии; в – последовательный; г – полунепрерывный; д – непрерывный: 1 – двигатель; 2 – шестеренная клеть; 3 – рабочие клетки; 4 – непрерывная черновая группа; 5 – непрерывная чистовая группа  
Рисунок 24 – Схема расположения рабочих клеток прокатных станов

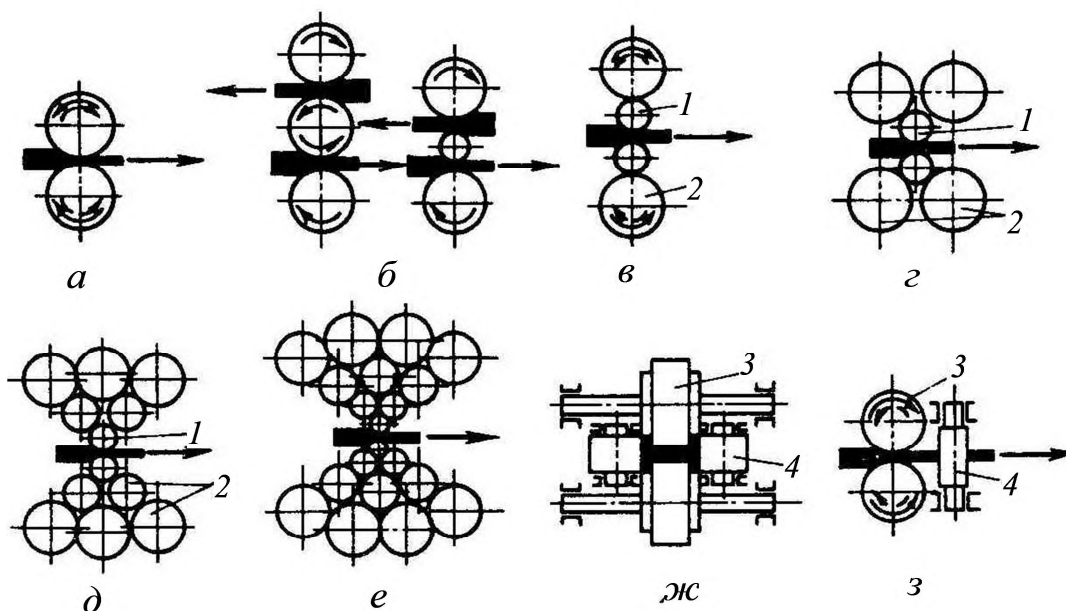
*Зигзагообразные (последовательные)* станы характеризуются расположением рабочих клеток, стоящих друг за другом таким образом, что прокатываемая полоса проходит в каждой клетке один раз (рисунок 24, в). Поэтому число клеток такого стана должно быть равно максимальному числу проходов, необходимых для получения готового профиля. На последовательных станах рабочие клетки обычно размещают в несколько параллельных рядов (в виде зигзага), с тем, чтобы сократить длину цеха и лучше использовать его площади. Причем на таких станах расстояние от клетки до клетки в направлении прокатки увеличивается соответственно увеличению длины прокатываемой полосы. Последовательные станы используют в основном как сортовые.

*Полунепрерывные* станы состоят из двух групп рабочих клеток: непрерывной и линейной, или последовательной (рисунок 24, г). В непрерывной группе клеток прокатываемая полоса может находиться одновременно в двух, трех и более клетях, т.е. прокатываться непрерывно. А во второй группе полоса прокатывается или на линейном, или на последовательном стане. Полунепрерывные станы используются как сортовые, проволочные и полосовые.

Наиболее современными станами являются *непрерывные* станы (рисунок 24, д). По сравнению с другими типами станом непрерывные характеризуются более высокими скоростями прокатки. При этом привод валков рабочих клеток может быть как индивидуальный, так и групповой. Непрерывные станы характеризуются наибольшей производительностью по сравнению с другими типами станом. Эти станы используют в качестве заготовочных, широкополосных, средне- и мелкосортных, проволочных и др.

По расположению и количеству валков в рабочих клетях и их конструкции прокатные станы делятся на несколько групп: двух-, трех-, четырех- и многовалковые, универсальные специальной конструкции (рисунок 25).

*Двухвалковые* клетки наиболее распространены, и бывают реверсивные и нереверсивные. В реверсивных клетях валки имеют переменное направление вращения. Прокатываемый металл проходит между валками вперед и назад нужное количество раз, а валки соответственно изменяют направление вращения, реверсируются. Реверсивные двухвалковые клетки применяют в обжимных, толстолистовых, сортовых и листовых станах.



*a* – двухвалковая клеть; *б* – трехвалковая клеть; *в* – четырехвалковая клеть;  
*г* – шестивалковая клеть; *д* – двенадцативалковая клеть; *е* – двадцативалковая клеть;  
*ж* – универсальная балочная клеть; *з* – универсальная клеть слябинга;  
 1 – рабочие валки; 2 – опорные валки; 3 – горизонтальные валки; 4 – вертикальные валки  
 Рисунок 25 – Схема расположения валков в рабочих клетях

В неререверсивных двухвалковых клетях валки имеют постоянное вращение в одну сторону. Прокатываемый металл проходит между валками такой клетки только один раз и в одном направлении. Неререверсивные клетки применяют в линейных многоклетевых, последовательных, полунепрерывных и непрерывных прокатных станах при производстве заготовок, сортового проката, катанки, листа.

В *трехвалковых* клетях оси валков расположены в одной вертикальной плоскости и имеют постоянное направление вращения. Трехвалковые клетки нашли широкое применение при производстве сортового проката. Прокатываемый металл движется в одну сторону между нижним и средним валками и в обратную сторону – между средним и верхним. Для подъема металла на верхний уровень и его задачи между верхним и средним валками перед клетью или позади нее устанавливают подъемно-качающиеся столы.

При производстве листа также применяют трехвалковые клетки, но со средним валком меньшего диаметра, чем нижний и верхний. Средний валок является неприводным и в процессе прокатки прижимается то к верхнему, то к нижнему валку.

Так же как и при производстве сортового проката, перед клетью и позади нее устанавливают подъемно-качающиеся столы. Поскольку трехвалковые клетки обладают небольшой производительностью и малой жесткостью валковой системы, в последнее время их применяют все реже.

В *четырёхвалковых* клетях, как и в трехвалковых, валки также расположены в одной вертикальной плоскости один над другим. В этих клетях два валка являются рабочими, а два других – опорными. Рабочие валки имеют меньший диаметр и размещены в середине клетки, опорные валки имеют больший диаметр и расположены сверху и снизу. Опорные валки предназначены для уменьшения прогиба рабочих валков и для увеличения жесткости валковой системы. Приводными валками в клетях кварто являются рабочие валки. Станы с четырехвалковыми клетями получили широкое распространение для горячей и холодной прокатки толстых и тонких листов, широких полос и лент.

С использованием четырехвалковых клетей прокатка осуществляется на непрерыв-

ных многоклетевых и одноклетевых станах. Четырехвалковые неререверсивные клетки используют на непрерывных станах. Ререверсивные четырехвалковые клетки используют в одноклетевых станах горячей и холодной прокатки.

К многовалковым клетям относятся шести-, двенадцати- и двадцати-валковые клетки.

*Шестивалковые клетки* имеют два рабочих приводных валка и четыре опорных. Эти клетки отличаются повышенной жесткостью самой клетки и меньшим прогибом опорных валков. Благодаря этому клетки используют для холодной прокатки тонких полос и узких лент в рулонах с точными допусками по толщине. Однако поскольку преимущества этих клеток по сравнению с четырехвалковыми клетями невелики, а конструкция их сложнее, то значительного распространения они не получили.

Широко применяются в прокатном производстве *двенадцати-* и *двадцативалковые* клетки. Такое усложнение конструкций рабочих клеток оправдывается рядом преимуществ, которые выражаются в жесткой конструкции валковой системы и всей рабочей клетки. Это позволяет применять их для производства тонкой и тончайшей ленты. Диаметры рабочих валков в таких многовалковых клетях значительны и лежат в пределах от 3 до 50 мм. Они являются неприводными и опираются на ряд приводных валков с большим диаметром, а последние, в свою очередь, на ряд опорных валков.

*Универсальные клетки* имеют горизонтальные и вертикальные валки, расположенные в одной вертикальной плоскости. Обжатие металла осуществляется горизонтальными и вертикальными валками одновременно.

Такие клетки применяются в универсальных балочных клетях, где вертикальные валки неприводные. Эти клетки применяют только для прокатки широполочных двутавровых балок. Но последнее время их начинают использовать и для прокатки других профилей (рельсов, универсальных листов и др.). Кроме того, универсальные (обычные) клетки применяют как ререверсивные двухвалковые (в слябингах) или четырехвалковые (в черновых широкополосных станах) клетки. В этих клетях вертикальные плоскости, в которых размещены или горизонтальные, или вертикальные валки, находятся на некотором близком расстоянии друг от друга. В этих клетях обжатие прокатываемого металла осуществляется и горизонтальными и вертикальными валками. При этом вертикальные валки располагают с передней или задней стороны рабочей клетки, в задачу которых входит получение ровных и гладких боковых граней прокатываемого металла.

Клетки *специальной конструкции* имеют самое различное расположение валков. К этой группе относятся колесопрокатные, бандажепрокатные, кольцепрокатные, шаропрокатные станы, а также станы для прокатки профилей переменного и периодического сечения, шестерен и других изделий.

## 2.5 Технологические операции при производстве проката

Основной задачей технологического процесса производства проката является получение прокатной продукции заданных форм, размеров и качества в необходимом количестве с минимальными затратами и наибольшей производительностью. Эта задача может быть решена только при точном соблюдении и выполнении всего технологического процесса производства проката и требований нормативно-технической документации.

Технологический процесс производства того или иного вида готового проката включает в себя все необходимые последовательные операции обработки металла. Технологические операции в производстве проката весьма разнообразны. Однако существуют такие, которые являются основными и характерны для всех видов прокатного производства. К ним относятся: подготовка металла к прокатке, нагрев металла перед прокаткой, собственно прокатка, охлаждение проката, отделка готовой прокатной продукции. Каждая из

этих операций является самостоятельной, но необходимой и взаимосвязанной с другими технологическими операциями производства проката. Совокупность технологических операций изготовления прокатной продукции, их необходимая последовательность представляют собой технологическую схему производства проката.

На металлургических предприятиях с полным металлургическим циклом технологической схемой производства проката является схема слитков – полупродукт (заготовка) – готовый прокат. В соответствии с этой схемой прокатное производство металлургического предприятия включает систему станов, обеспечивающих получение полупродукта в виде блюмов, слябов и заготовок из слитков и систему станов, выпускающих готовый прокат в виде сортового проката или горяче- и холоднокатаных листов и др., т.е. технологический процесс современного прокатного производства состоит из двух стадий: получение полупродукта (заготовки) и готовой продукции (готового проката).

В то же время технологическая схема производства того или иного вида готового проката предусматривает включение всех необходимых последовательных операций обработки, начиная с подготовки слитка или заготовки для нагрева и прокатки и кончая завершающей отделкой и определением качества готового проката (рисунок 26, а).

Следует отметить, прокатные цехи, имеющие в своем составе обжимные (блюминги, блюминги – слябинги, слябинги) и заготовочные станы, являются связующим звеном между сталеплавильными цехами и станами, выпускающими готовый прокат.

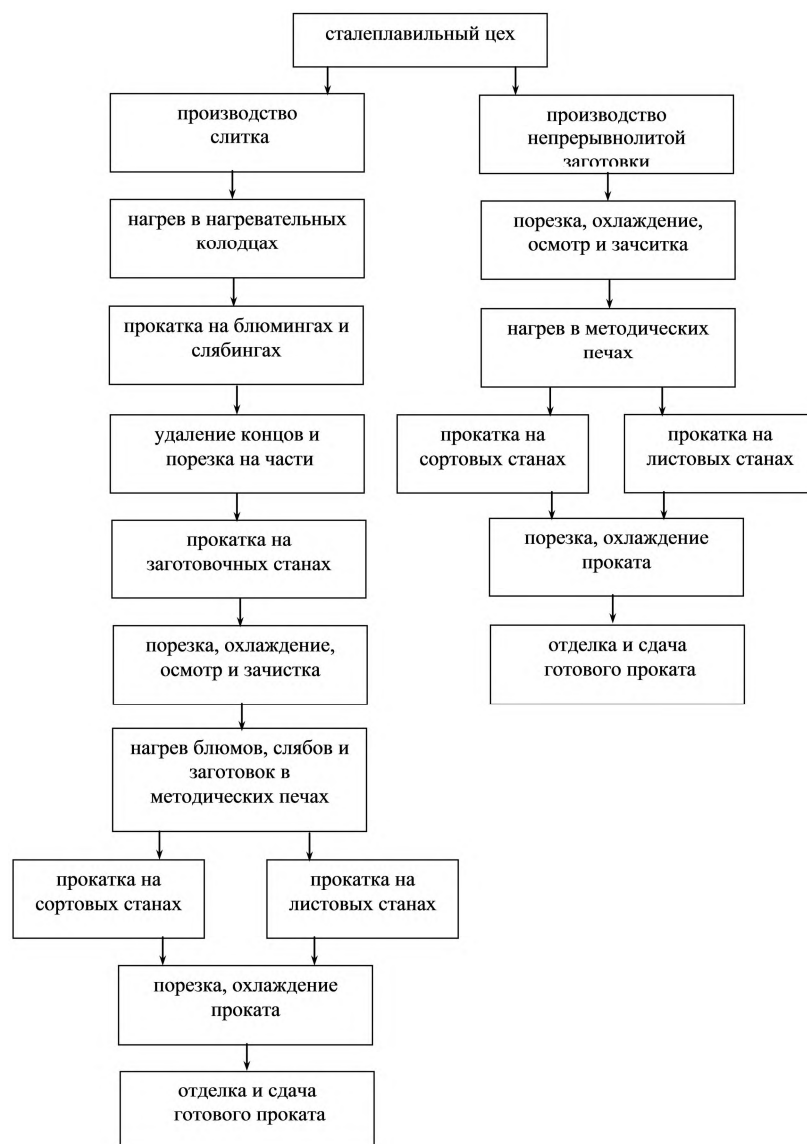
Для металлургических предприятий с неполным металлургическим циклом технологической схемой производства проката является либо слиток – готовый прокат, либо полупродукт – готовый прокат. В этих схемах отсутствуют операции, связанные с производством полупродукта непосредственно на данном предприятии, а процесс производства осуществляется или из заготовки, получаемой со стороны, или из слитка небольшой массы, из которого готовый прокат получают за один нагрев. Эти технологические схемы являются наиболее распространенными на металлургических предприятиях. Успешное развитие непрерывной разливки стали на металлургических предприятиях значительно изменило технологическую схему производства проката и преобразовало ее в схему непрерывнолитая заготовок – готовый прокат (рисунок 26, б). Использование непрерывнолитой заготовки в прокатных цехах при производстве готового проката является эффективным процессом, позволяющим исключать целый ряд технологических операций и дорогостоящие обжимные и заготовочные станы из технологического процесса производства проката.

Дальнейшее развитие процессов непрерывной разливки и прокатки, выражающееся в их совмещении, значительно изменяет технологическую схему производства проката непрерывная разливка – готовый прокат и сокращает цикл металлургического производства, исключая такие технологические операции, как нагрев, транспортировку и складирование металла.

Как уже было отмечено, основными технологическими операциями в прокатных цехах являются подготовка металла к прокатке, нагрев металла перед прокаткой, собственно прокатка, охлаждение проката, отделка готовой продукции.

*Подготовка исходных материалов* (слитков и заготовок) к прокатке состоит в удалении с них различных поверхностных дефектов: плен, волосовин, трещин, закатов, царапин и некоторых других. Эта операция особенно важна при прокатке качественной углеродистой и легированной стали, идущей на изготовление ответственных деталей машин в различных отраслях промышленности. В этом случае затраты на подготовку материалов окупаются увеличением выхода годного и получением надлежащего качества готовой продукции.

Необходимость удаления поверхностных дефектов на металле вызывается тем обстоятельством, что они, как правило, не устраняются в процессе прокатки, а переходят на



*а*

*б*

*а* – производство проката из слитка;

*б* – производство проката из непрерывнолитой заготовки

Рисунок 26 – Последовательность операций в технологических схемах производства проката

готовый прокат. Большую часть поверхностных дефектов металла удаляют путем зачистки. Наиболее экономичным способом удаления поверхностных дефектов является *огневая зачистка*. Ее применяют для снятия как местных дефектов, так и всего поверхностного слоя. В процессе такой зачистки слой металла сжигается и удаляется с поверхности кислородной струей. Большое значение для улучшения качества зачистки имеет степень чистоты кислорода.

Огневую зачистку осуществляют вручную и специальными машинами. Как правило, при *ручной огневой зачистке* удаляются определенные дефекты поверхности слитков и заготовок. В этом случае резак подводят к дефекту и в течение нескольких секунд подогревают металл до 950–1000 °С. Резак устанавливают под углом 75–80° к поверхности заготовки. После достижения температуры воспламенения металла увеличивают количество впускаемого в резак кислорода, который сжигает и удаляет слой металла, при этом наклон резака к поверхности заготовки уменьшают до 25–30°.

В настоящее время огневой зачистке подвергают стали почти всех видов. Легко

поддаются огневой зачистке все углеродистые и низколегированные стали. При огневой зачистке нержавеющей, жаропрочных и других сталей с большим содержанием хрома применяют специальные флюсы и обмазки, облегчающие зажигание и получение легкоплавкого шлака.

Широкое распространение получили *машины огневой зачистки*, устанавливаемые в технологическом потоке на линии рольганга между блюмингом или слябингом и ножницами.

При машинной огневой зачистке удаление поверхностных дефектов осуществляется сплошным сжиганием поверхностного слоя с двух или четырех сторон раската.

Сплошную механизированную огневую зачистку применяют также на складе заготовок. При этом металл зачищают в холодном или подогретом состоянии комбинированными агрегатами, которые совмещают осмотр и зачистку заготовок.

К другим способам удаления поверхностных дефектов с заготовок и слитков относят *вырубку* (зачистку) *пневматическими молотками* и *абразивную зачистку*.

*Вырубка* поверхностных дефектов *пневматическими молотками* – операция малопродуктивная (особенно при обработке легированной стали) и вредная для здоровья рабочих. Этот способ является наиболее трудоемким в прокатном производстве и не соответствует современным масштабам производства. Его применяют преимущественно в качестве дополнительной отделочной операции при зачистке другими способами.

Широкое распространение в прокатных цехах получила *абразивная зачистка* кругами для сплошного и выборочного удаления поверхностных дефектов. Для абразивной зачистки применяют подвесные стационарные и переносные специальные станки. Используемые для зачистки металла абразивные круги различаются по шлифующему материалу (карборундовые, электрокорундовые), связке (керамическая, бакелитовая), размеру зерна, твердости, профилю. Применение того или иного абразивного круга определяется свойствами зачищаемого металла. Абразивную зачистку применяют в основном при производстве легированных сталей, ибо только в этом случае становится экономически целесообразным применение данного способа.

*Нагрев исходных материалов* перед прокаткой осуществляется с целью повышения его пластичности и уменьшения сопротивления деформации. Нагрев является одной из важных и основных операций в процессе прокатки. Он должен обеспечить равномерное распределение температуры по сечению прокатываемого металла, его минимальное окисление и обезуглероживание, повышение механических свойств, уменьшение чувствительности стали к флокенам и т.д.

Продолжительность нагрева определяется физико-химическими свойствами нагреваемой стали, температурными условиями, зависящими от конструкции печи, расположения металла в печи, формы и размеров нагреваемых заготовок.

Правильно выбранный режим и температурные интервалы нагрева позволяют получить однофазную структуру. Благодаря диффузии происходит перераспределение примесей и выравнивание состава металла (гомогенизация).

При нагреве исходных материалов в нагревательных устройствах всегда происходит *окисление металла* – процесс химического взаимодействия окислительных печных газов с железом, примесями и легирующими компонентами с образованием на поверхности слитка или заготовки *окалина*. Наружный, самый тонкий слой окалины состоит из  $Fe_2O_3$  (гематита), средний – из  $Fe_3O_4$ , (магнетита) и внутренний – самый толстый слой – из  $FeO$  (вюстита).

Образование окалины при нагреве является источником потерь годного металла. Угар металла при нормальной работе нагревательных устройств составляет 1–2 % от массы нагреваемого металла. Если учесть, что металл при прокатке от слитка до готового



продукта нагревают несколько раз, то можно принять угар в среднем 3–4 % от массы нагреваемого металла. Кроме того, окалина при прокатке вдавливаясь в металл, что ухудшает качество поверхности, ускоряет износ валков, а также способствует образованию брака в результате вскрытия подкорковых пузырей. В связи с этим возникает необходимость удаления окалины с поверхности прокатываемой полосы. При горячей прокатке листовой стали на станах устанавливают специальные клетки – окалиноломатели – для дробления окалины, которая затем сбивается водой высокого давления (гидросбив). Окалину с поверхности горячекатаных рулонов перед холодной прокаткой удаляют травлением их в растворе кислоты, чтобы окалина не вдавливалась при холодной прокатке и для уменьшения износа валков и обеспечения чистой поверхности листовой стали.

На образование окалины влияет температура нагрева, продолжительность пребывания металла при высоких температурах, скорость нагрева и печная атмосфера.

Наряду с окислением металла происходит обезуглероживание поверхностного слоя, представляющее процесс взаимодействия печных газов с углеродом стали, приводящее к уменьшению содержания углерода в поверхностном слое металла. Обезуглероживание зависит от тех же факторов, что и окалинообразование.

Повышение температуры металла при его нагреве, как правило, благоприятно влияет на процесс прокатки. Однако при нагреве выше определенной для данной стали температуры происходит рост зерна, который ведет к ослаблению связи между ними и тем самым к ухудшению механических свойств стали. Такое явление называется *перегревом*. В ряде случаев свойства перегретой стали можно улучшить, подвергнув ее термической обработке. Сильный перегрев исправить нельзя, так как зерна сильно перегретой стали теряют способность к рекристаллизации и при нагреве остаются неизменными.

При температурах, близких к точке плавления стали, внутрь ее проникает кислород, который окисляет зерна. В результате связь между зернами стали настолько ослабляется, что металл при прокатке разрушается. Это явление называется *пережогом*.

Явления перегрева и пережога чаще всего возможны при вынужденной задержке металла в печи. В этом случае понижают температуру в печи и уменьшают количество подаваемого воздуха.

Для нагрева применяют нагревательные устройства различных конструкций: нагревательные колодцы, методические, камерные, туннельные, колпаковые печи.

Важно, чтобы при нагреве исходного металла до заданной температуры был обеспечен равномерный нагрев его по всему сечению. Неравномерный нагрев способствует образованию внутренних разрывов, увеличению износа прокатных валков и вызывает опасность поломки их и т.д. Нагретый металл, если он равномерно нагрет по всему сечению и длине, значительно легче деформируется.

После прокатки на соответствующем типе стана до заданного профиля одним из основных заключительных процессов является *охлаждение проката*.

Необходимость охлаждения проката вызвана предохранением его от образования поверхностных и внутренних трещин, остаточных напряжений и получением нужной структуры и физико-механических свойств металла.

Из-за неравномерной потери тепла по поперечному сечению проката при его охлаждении и происходящих в нем структурных превращений в нем возникают напряжения. В начальный период охлаждения поверхностные слои испытывают напряжения растяжения, а внутренние – напряжения сжатия. В последующие периоды охлаждения, наоборот, поверхностные слои – напряжения сжатия, внутренние – растяжения. Эти тепловые напряжения накладываются на напряжения, возникающие по другим причинам, и в результате величина их может достичь значений, превышающих прочность металла. В металле об-

разуются внешние или внутренние микро- или макротрещины, которые служат причиной появления более глубоких трещин или даже полного разрушения.

В зависимости от состава, скорости падения температуры металла при его охлаждении, склонности к образованию пороков, связанных с охлаждением, применяются различные способы охлаждения: обычное, замедленное, ускоренное и быстрое.

*Обычное охлаждение* металла осуществляется на воздухе, на стеллажах, на холодильниках. Такому охлаждению подвергают стали, не склонные к образованию трещин и флокенов. При обычном охлаждении металл должен терять температуру как можно быстрее.

*Замедленное охлаждение* применяется для уменьшения температурного перепада по сечению готового проката и обеспечения более полного протекания процесса рекристаллизации с целью снижения величины остаточных термических и структурных напряжений и предотвращения образования флокенов и трещин. Охлаждение осуществляют в проходных отапливаемых печах, отапливаемых и неотапливаемых колодцах.

*Ускоренное охлаждение* характеризуется очень высокими скоростями охлаждения, достигающими 300–400 °С/с, и может применяться только к сталям, не чувствительным к образованию дефектов при любых скоростях охлаждения. По своей сути этот способ является закалкой стали с прокатного нагрева. Полнота закалки регулируется продолжительностью выдержки в воде или ее давлением и температурой воды. Целью ускоренного охлаждения является получение мелкозернистого строения стали; предотвращение образования карбидной сетки при прокатке высокоуглеродистой и подшипниковой стали; повышение физико-механических характеристик прокатанного металла; получение чистой от окалины поверхности проката; сокращение производственных площадей и снижение себестоимости проката. Ускоренное охлаждение используется для листового проката и катанки перед сматыванием в рулоны и бунты.

*Быстрый (термоупрочняющий) режим охлаждения* обеспечивает закалку с последующим режимом самоотпуска с прокатного нагрева. С этой целью применяют регулируемые системы быстрого охлаждения водой. При охлаждении металла могут образовываться наружные и внутренние трещины (флокены). Наружные трещины образуются в результате возникновения остаточных напряжений при прокатке и охлаждении.

*Отделка проката* является заключительной технологической операцией процесса прокатки, позволяющей получить прокат с требуемыми ГОСТом и ТУ механическими и другими служебными свойствами и придать ему товарный вид. К отделочным операциям относятся термическая обработка, очистка поверхности от окалины, порезка и правка, сплошная и выборочная зачистка поверхностных дефектов, контроль качества металла, маркировка, упаковка и т.д.

Важную отделочную операцию сортовой стали представляет собой *термическая обработка*. Наиболее распространенными способами термической обработки являются *различные виды отжига* – полный, неполный, изотермический, рекристаллизационный, сфероидизирующий, диффузионный, а также нормализация, закалка и отпуск.

*Очистка поверхности проката* осуществляется травлением его в растворах серной и соляной кислот. В процессе травления часть окалины растворяется, а часть отслаивается. Прокат после травления промывают в чистой воде и нейтрализуют в щелочной ванне. Окислы удаляют также путем дробеметной очистки и иглофрезерованием.

*Резку* осуществляют для порезки металла на заданные длины. Разрезка пилами применяется для относительно крупных заготовок. Заготовка характеризуется высокой точностью по длине, хорошим качеством среза, перпендикулярностью торца к оси. Основными недостатками являются низкая производительность и значительные потери металла на рез.

Разрезка на эксцентриковых пресс-ножницах применяется для стального проката круглого или квадратного сечения до 300 мм. Является наиболее производительным и дешевым процессом разделки проката на заготовки. Основными недостатками являются косо́й рез и смятие концов заготовки.

Листовой прокат разрезают на гильотинных ножницах.

*Правку металла* используют как с целью придания прокату товарного вида, так и с целью осуществления необходимых отделочных операций (светление, абразивная зачистка, снятие заусенцев).

Иногда правку выполняют в горячем состоянии, например, при производстве толстых листов. Но обычно – в холодном состоянии, так как последующее охлаждение после горячей правки может вызвать дополнительное изменение формы.

Процесс правки заключается в однократном или многократном пластическом изгибе искривленных участков полосы, каждый раз в обратном направлении.

Правку можно выполнять и растяжением полосы, если напряжения растяжения будут превышать предел текучести материала.

Роликоправильные машины с параллельно расположенными роликами предназначены для правки листа и сортового проката (рисунок 27).

Процесс правки заключается в прохождении полосы между двумя рядами последовательно расположенных роликов, установленных в шахматном порядке таким образом, что при движении полосы, ее искривление устраняется.

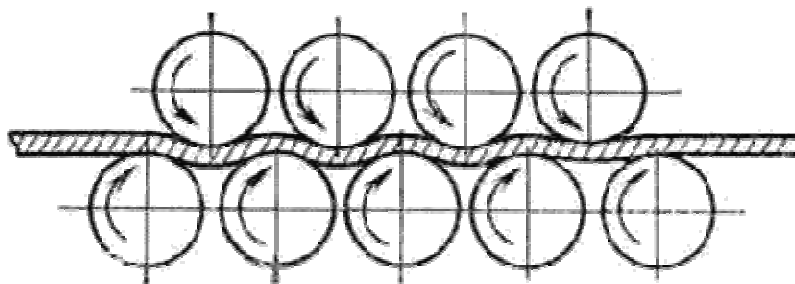


Рисунок 27 – Схема правки проката на роликоправильных машинах с параллельно расположенными роликами

Правильные машины с косорасположенными гиперболоидальными роликами предназначены для правки труб и круглых прутков (рисунок 28).

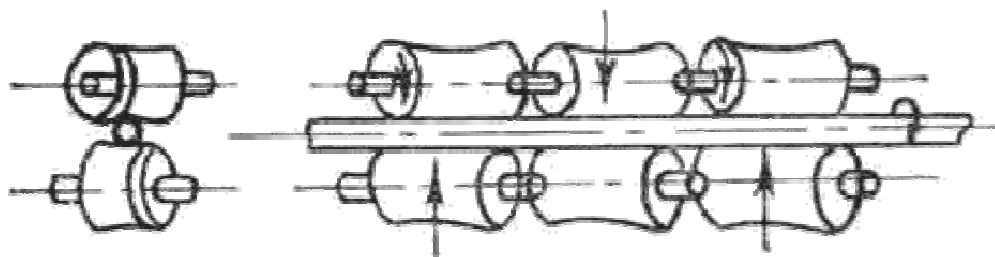


Рисунок 28 – Схема правки проката на машинах с косорасположенными гиперболоидальными роликами

Ролики выполняют в виде однополостного гиперболоида и располагают под некоторым углом друг к другу. Выправляемый металл, кроме поступательного движения, совершает вращательное, что вызывает многократные перегибы полосы роликами и обеспечивает осесимметричную правку.

Растяжные правильные машины используют для правки тонких листов (менее 0,3 мм), трудно поддающихся правке на роликоправильных машинах.

Различают *сплошную* и *выборочную зачистку* поверхности проката. Сплошную зачистку применяют в случае значительной пораженности дефектами проката; выборочную – при наличии на поверхности проката или единичных дефектов, или небольших дефектных участков. Зачистка поверхности проката осуществляется методами, которые рассматривались выше.

*Пакетирование и увязка проката* являются окончательной операцией прокатного производства. Их качество определяет товарный вид пакетов и их сохранность при транспортировке. В зависимости от профиля и размеров прокат собирают в круглые или прямоугольные пакеты.

## 2.6 Производство полупродукта

*Полупродукт* – это промежуточный продукт технологического процесса, предназначенный для дальнейшей переработки. В производстве проката полупродуктом являются блюмы, слябы, заготовка. В настоящее время полупродукт получают двумя способами: прокаткой слитков на обжимных и заготовочных станах и непрерывной разливкой на машинах непрерывного литья заготовок.

Обжимные и заготовочные станы являются промежуточным звеном между сталеплавильными и прокатными цехами, производящими готовый прокат.

На блюмингах и слябингах осуществляется прокатка слитков, различных по размерам и массе, что определяется марочным составом стали, изготавливаемым на заводе.

Перед прокаткой осуществляется нагрев слитков в нагревательных колодцах с целью придания металлу высокой пластичности и наименьшего сопротивления его деформации.

Продолжительность нагрева слитков определяется их химическим составом, температурой посадки металла в нагревательные устройства и отношением поверхности к их массе.

В настоящее время свыше 90 % слитков в нагревательные колодцы блюмингов и слябингов поступает с температурой 800–900 °С. Такой метод нагрева называется горячим посадом слитков. Применение горячего посада значительно экономит топливо и резко увеличивает пропускную способность нагревательных колодцев.

Посадку слитков производят специальным клещевым краном, а в колодцах их устанавливают прибыльной частью вверх. Нагретые слитки при помощи тележки с опрокидывателем (слитковоза) подают к рабочей клетке блюминга или слябинга.

Число проходов, за которые прокатывают слитки, предусматривают технологическими инструкциями. На отечественных обжимных станах стремятся к увеличению обжатий за проход, что приводит к сокращению их числа, а значит, и повышению производительности станов.

Эффективным путем повышения производительности обжимных станов является *технология многослитковой прокатки*. Многослитковая прокатка заключается в последовательной прокатке двух или более слитков, лежащих на рольганге последовательно один за другим. В каждом пропуске второй слиток подается в валки стана непосредственно за первым без паузы или с минимальной паузой. Многослитковая прокатка ведется определенное число пропусков. При достижении раскатами значительной длины каждым в последних пропусках их кантуют порознь, а прокатывают парами или по одному.

Технология многослитковой прокатки обеспечивает уменьшение почти в два раза суммарного времени пауз и некоторое уменьшение машинного времени.

После выхода из клетки полупродукт в технологическом потоке проходит сплошную зачистку поверхности в машинах огневой зачистки. Эта операция полностью

механизирована и частично автоматизирована.

Иногда на блюмингах и заготовочных станах вместо машин огневой зачистки устанавливают фрезерные многолезцовые станки – термофрезерные машины – для механической зачистки снятием стружки с горячих слитков, блюмов, слябов и заготовки. Этот способ является весьма эффективным.

За машиной огневой зачистки осуществляется обрезка переднего и заднего концов раскатов и порезка их на мерные длины на ножницах. Величина обрезки в зависимости от марки стали и условий кристаллизации со стороны усадочной раковины обычно составляет 12–14 % от массы раската, с донной части 2–3 %.

После разрезки на ножницах блюмы или слябы клеймят с торца в горячем состоянии при помощи специального клеймовочного устройства. В клеймо обычно входят следующие знаки и цифры: условный знак завода, марка стали, номер плавки, литера головного блюма или сляба от данного слитка и др.

Полученный полупродукт больших сечений может сразу в потоке прокатываться на заготовочных станах или передаваться к печам сортовых станов.

Готовые блюмы и слябы в пролете остывания укладывают в штабеля.

Остывший полупродукт, в случае необходимости, зачищают и после приемки контроллерами передают на склад заготовки.

## **2.7 Производство сортового проката**

Производство сортового проката характеризуется весьма широким сортаментом готовой продукции, как по форме поперечного сечения и по размерам, так и по качеству прокатываемого металла. Эти обстоятельства обусловили создание большого числа прокатных станов различной конструкции основного и вспомогательного оборудования, его расположения и технических характеристик. Сортопрокатные станы по своему назначению условно подразделяют на рельсобалочные, крупно-, средне- и мелкосортные, проволочные.

Исходным материалом на сортовых станах являются блюмы и заготовки различных сечений и длины. Размеры и масса исходного материала зависят от размеров конечного продукта и от оборудования, на котором осуществляют прокатку. Чем длиннее готовый прокат, тем больше машинное время прокатки и выше производительность стана и тем меньше потери металла в обрезь.

На большинстве сортовых станов технологический цикл производства сортопрокатной продукции в целом одинаков и включает в себя подготовку исходного металла к нагреву, нагрев, прокатку, охлаждение, порезку на мерные длины, маркировку и уборку. Однако размерные, профильные и качественные различия сортового проката вносят свою специфику и в технологический процесс производства проката.

Подготовка исходного металла к нагреву заключается в удалении с него поверхностных дефектов путем огневой или абразивной зачистки.

Нагрев металла ведут, как правило, в методических печах, состоящих из нескольких зон: методической; от одной до трех сварочных зон и зоны томления. Методическая зона предназначена для постепенного прогрева металла до температур 650 – 800 °С. В сварочной зоне металл греют до заданной температуры с максимальной скоростью. Томильная зона предназначена для выравнивания температуры по сечению и длине заготовки.

После нагрева заготовка транспортируется к прокатному стану (линейному, непрерывному) для получения заданного профиля необходимой формы и размеров.

Прокатка сортового проката осуществляется в специальных калибрах, представ-

ляющих собой совмещение одинаковых вырезов на валках (рисунок 23).

После прокатки производят раскрой полосы. Крупный сорт разрезают на заданные длины в горячем состоянии. Раскрой среднего и мелкого сорта в горячем состоянии осуществляется на длину холодильника, а в холодном состоянии – на заданные длины. При горячем раскрое обязательно учитывают припуск на температурную усадку. Горячая порезка выполняется на роторных или салазковых пилах.

Разрезанные штанги крупного сорта по рольгангу направляют к клеймителю. За клейменный прокат отправляется на охлаждение. Выбор способа и режима охлаждения зависит от марочного и профильного сортамента стана и от состава оборудования стана.

Средний и мелкий сорт после охлаждения подвергается порезке на заданные длины на ножницах с параллельными ножами или на гильотинных ножницах.

Охлажденный прокат поступает на отделку. Отделочные операции – термическая обработка, очистка поверхности проката от окалины, правка прутков, сплошная и выборочная зачистка поверхностных дефектов, контроль качества металла, маркировка, упаковка, взвешивание готового проката.

Опыт работы металлургических предприятий показывает, что существенного повышения производительности труда в прокатном производстве можно достичь не столько усовершенствованием технологии прокатки, сколько широкой механизацией и автоматизацией адъюстажных работ. Поэтому очень важно создание и применение совершенных машин для комплексной механизации и автоматизации всего процесса отделки.

## **2.8 Производство горячекатаных листов**

Листовой прокат является одним из самых экономичных видов металлопродукции.

Исходным материалом для производства горячекатаной листовой стали являются слябы. Но в ряде случаев применяются и слитки, если нет возможности обеспечить стан слябами или требуется прокатка листов специального назначения: большой ширины, толщины и длины.

*Общая схема технологического процесса производства толстых листов* включает в себя подготовку металла к нагреву, нагрев, прокатку, правку в горячем состоянии, охлаждение, резку, термообработку, холодную правку, механические испытания, удаление дефектов, упаковку. В зависимости от типа стана, схемы размещения оборудования, марок прокатываемых сталей те или иные элементы указанной схемы могут быть изменены или исключены.

Подготовка исходного металла (слитков или слябов) к нагреву заключается в осмотре поверхности и удалении обнаруженных поверхностных дефектов при помощи огневой или абразивной зачистки.

Нагрев слябов производится в методических печах, а слитков – в колодцах. Вследствие интенсивного охлаждения листов в процессе прокатки нагрев осуществляется до возможно высокой температуры.

При прокатке толстых листов на толстолистовых станах в зависимости от их конструкций, размеров исходного металла и готового листа, требований к качеству листов применяют различные схемы прокатки.

Схемы прокатки толстых листов из слитков включают:

- устранение конусности и ребристости слитка продольной прокаткой за 3–4 пропусков;
- получение необходимой ширины листа из более узкого слитка путем поперечной прокатки за необходимое количество пропусков. Прокатка раската осуществляется в горизонтальной плоскости на угол (т.е. между осью валков и большой осью раската угол

равен  $9-12^{\circ}$ ) или под прямым углом:

- получение необходимых толщины и длины путем продольной прокатки за необходимое количество пропусков. Перед продольной прокаткой производится кантовка на  $90^{\circ}$ .

В зависимости от соотношения ширины сляба и готового листа прокатку осуществляют различными способами.

При ширине сляба, равной ширине листа с необрезанными боковыми кромками, сляб прокатывают вдоль до необходимой толщины и длины листа с пропусками для обрезки переднего и заднего концов.

В случае, если ширина сляба меньше ширины листа, прокатка осуществляется в три стадии. На первой стадии толщина сляба выравнивается продольной прокаткой; на второй – поперечной прокаткой с поворотом листа на  $90^{\circ}$  добиваются необходимой ширины листа, а на третьей – еще после одного поворота раската на  $90^{\circ}$  продольной прокаткой добиваются необходимой толщины листа.

Прокатка сляба в поперечном направлении, если ширина сляба меньше ширины листа. В этом случае ширина листа получается из длины, а длина его – из ширины сляба.

При прокатке толстых листов большое влияние на качество поверхности листов оказывает окалина. Для удаления окалины применяют ее гидросбив водой высокого давления и валки со специальной поверхностью. Под воздействием воды окалина растрескивается. Образующийся пар разрушает ее и отрывает от поверхности.

При прокатке слитков особое внимание обращают на формирование боковых поверхностей раската. Это формирование осуществляют, как и предотвращение возникновения дефектов на боковых поверхностях, или с помощью ребровых проходов, или при помощи вертикальных валков.

После прокатки листов производится их горячая правка на роликовых правильных машинах.

Охлаждение толстых листов осуществляется при их транспортировке по роликовым конвейерам и стеллажам-холодильникам. После охлаждения листы осматриваются на инспекторских столах с обеих сторон, оборудованных кантователем для кантовки листов на  $180^{\circ}$ . После осмотра производят порезку листов. Для обрезки боковых кромок листов толщиной менее 30 мм в холодном состоянии применяют дисковые ножницы, для листов толщиной более 30 мм – гильотинные. Для обрезки концов раскатов и порезки их на мерные длины также применяют гильотинные ножницы.

Для получения заданных свойств применяется термическая обработка листов. При необходимости листы подвергаются дополнительной зачистке и правке.

*Общая схема технологического процесса производства тонколистовой горячекатаной стали* включает подготовку металла к нагреву, нагрев, прокатку, охлаждение, смотку в рулоны и отделку листа.

Исходной заготовкой являются слябы, прокатанные на блюминге, слябинге или отлитые на МНЛЗ.

Нагрев слябов осуществляется в методических печах с торцевой посадкой и выдачей. В последнее время широко применяются печи с шагающим подом, позволяющие нагревать слябы более равномерно по всему сечению. Продолжительность нагрева зависит от толщины слябов, химического состава стали и температуры при их посадке.

Прокатка тонколистовой горячей стали, как правило, осуществляется в черновой и чистовой группах рабочих клетей, последовательно расположенных друг за другом. Основной задачей прокатки в черновых клетях является удаление окалины с поверхности слябов и получение необходимых размеров подката для чистовой группы. Окалин удаляют при помощи клетей с вертикальными валками и черновых двухвалковых (или четырехвалковых) окалиноломателей. Кроме того, окалина удаляется гидросбивом.

Процесс прокатки в черновых клетях производится без раскатки ширины, если ширина сляба больше ширины листа, и с раскаткой ширины, если ширина сляба меньше ширины листа.

При задаче раската в чистовую группу клетей на летучих ножницах, установленных перед чистовыми окалиноломателями, обрезаются передний и задний концы.

После выхода из последней клетки непрерывной группы происходит охлаждение полосы с помощью душирующих устройств и смотка моталками в рулоны. Рулоны листовой стали толщиной раскраивают на агрегатах непрерывной резки. Затем обрезают боковые кромки, раскат правят, сортируют, маркируют, укладывают в стопы, взвешивают и упаковывают в пачки. Далее осуществляют термическую обработку и отделку тонколистовой горячекатаной стали на установленных в цехах агрегатах.

## **2.9 Производство холоднокатаных листов**

Особенностью развития листопрокатного производства является непрерывное увеличение холоднокатаного листового проката. Это связано с интенсивным развитием ряда отраслей промышленности, потребляющих тонколистовой прокат с высокими механическими свойствами.

Производство холоднокатаных листов осуществляют двумя способами: полистным и рулонным.

Рулонный способ является наиболее производительным, дает возможность механизировать и автоматизировать большинство технологических операций, повышает выход годного металла с улучшенной геометрической формой и свойствами вследствие устойчивости технологического процесса.

Исходным металлом для холодной прокатки является прокат (полоса, лист), полученный на станах горячей прокатки, который называется подкатом.

Типовая схема технологии производства холоднокатаной листовой стали состоит из следующих групп технологических операций:

- подготовки исходного металла к прокатке, включающей удаление окалины и дефектов с поверхности и смягчающую термическую обработку исходного металла (подката);
- холодной прокатки;
- отделки холоднокатаной стали, включающей термическую обработку и травление холоднокатаного металла, дрессировку, правку, поперечную и продольную резку, очистку и зачистку поверхности металла, сортировку и упаковку готовой продукции.

Некоторые из этих операций могут исключаться: например, термическая обработка горячекатаного металла, очистка поверхности холоднокатаного металла, операция травления при применении термической обработки в защитной атмосфере; а операции холодной прокатки, термической обработки и травления холоднокатаного металла могут повторяться.

В ряде случаев могут добавляться новые операции, связанные с особыми требованиями, вытекающими из государственных стандартов, технических условий или договоров с заказчиками. К последним можно отнести, например, технологические операции, связанные с получением зеркального листа из коррозионностойких сталей, комплекс операций по нанесению определенного вида покрытий и др. Операция порезки металла (при рулонном способе производства) в старых цехах предшествует другим отделочным операциям, а в цехах современной технологии, где установлены высокоскоростные непрерывные отделочные агрегаты, она завершает технологический цикл.

Обязательной операцией в технологии производства холоднокатаных листов яв-



ляется подготовка исходного металла к прокатке. Так как поверхность горячекатаных листов (подката) покрыта окалиной, возникает необходимость ее удаления для получения высококачественной поверхности холоднокатаных листов. Успешное удаление окалины зависит от физико-химического состава, толщины и от условий, в которых протекает процесс очистки окалины с поверхности горячекатаных листов.

Существуют кислотный и механический способы удаления окалины.

Травление горячекатаных углеродистых и многих легированных сталей производится в растворах серной или соляной кислот. Процесс травления стальной полосы основан на взаимодействии кислоты с оксидами. Наиболее быстро растворяется в кислотном растворе FeO (вюстит), значительно труднее Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (магнетит) и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гематит). Чем скорее будут разрушены Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, тем быстрее кислота проникает к более растворимому слою FeO. При травлении освобождение металла от окалины происходит также в результате выделения водорода, который, скапливаясь под слоем окалины, отрывает ее от металла.

В последние годы широкое распространение получает травление полосы в растворе соляной кислоты. Преимущества такого травления заключаются в лучшем качестве поверхности после травления, уменьшении потерь металла при травлении, снижении стоимости травления (соляная кислота дешевле серной), повышении интенсивности растворения окалины в 1,5–2 раза и, следовательно, производительности агрегатов травления в 1,5–2 раза. Также при травлении в соляной кислоте более редки перетравы и более длительное сохранение травильного раствора.

После травления полоса промывается струями горячей воды под давлением. После промывки полоса проходит сушильное устройство, где сушится горячим воздухом.

К механическому способу относят дробеструйную и дробеметную обработку, изгибание полосы вокруг роликов.

Сущность дробеструйной и дробеметной (имеющей преимущественное распространение) очистки состоит в обработке поверхности металла стальной или чугунной дробью размером 0,06–0,3 мм, подаваемой на металл с большой скоростью. При этом окалина удаляется, а поверхность становится шероховатой и получает некоторый наклеп. При изгибании полосы вокруг роликов окалина растрескивается и частично удаляется, причем во втором случае степень разрушения и удаления значительно выше.

Однако механическая зачистка не обеспечивает достаточно высокую степень очистки и чистоту поверхности, и поэтому ее применяют, главным образом, в сочетании с другими способами, наиболее распространенными в листопрокатных цехах.

Задачами холодной прокатки является получение листовой стали определенных геометрических размеров и качества ее поверхности и обеспечение необходимого уровня различных физико-механических свойств листового металла.

Процесс холодной пластической деформации сопровождается наклепом, который приводит к значительным изменениям физико-механических и структурных свойств металла.

Процесс многократного обжатия полосы на станах холодной прокатки листов приводит к значительному их разогреву и к необходимости принудительного охлаждения валков и полосы. Обычно охлаждающая среда является и технологической смазкой. В качестве технологических смазок для холодной прокатки используются минеральные и растительные масла, животные жиры и синтетические вещества в чистом виде или в виде эмульсий. Минеральные масла, получаемые в результате переработки нефти, обладают стабильными технологическими свойствами, низкими температурами застывания, почти не образуют пятен при термообработке без обезжиривания и являются наиболее дешевыми продуктами.

Часто в минеральные масла вводят органические присадки, улучшающие их смазоч-

ные характеристики и придающие им антикоррозионные и антипенные свойства.

Растительные масла и животные жиры обладают лучшими смазочными свойствами, высокой температурой вспышки, что создает возможность их применения при высоких скоростях прокатки. Однако они менее стабильны, создают на поверхности металла значительный сажистый остаток при термообработке без предварительного обезжиривания, значительно дороже, чем минеральные масла.

Наиболее широко используются пальмовое, подсолнечное, хлопковое, касторовое, кориандровое и др. масла.

Заключительным технологическим этапом производства холоднокатаных листов является их отделка. После холодной прокатки на поверхности металла остаются масляные остатки, смешанные с частицами металлической пыли и окалины. Все это значительно ухудшает качество поверхности металла. В цехах холодной прокатки для очистки поверхности металла применяют различные способы, включающие механическое удаление загрязнений, к которым относятся смыв водой, сдув сжатым воздухом, обработка поверхности листов щетками, а также химический, электрохимический, ультразвуковой и электролитический методы очистки и применение моющих смазок.

Для снятия упрочнения, получаемого металлом при холодной прокатке, восстановления пластических свойств или придания других специальных свойств проводится термическая обработка холоднокатаного металла.

Одной из важнейших операций технологического процесса производства холоднокатаных листов является дрессировка. Она проводится для упрочнения поверхности отожженного металла с целью улучшения его последующей штампуемости, а также для правки металла и получения гладкой блестящей поверхности.

Дрессировка заключается в прокатке металла (в основном без технологической смазки) с относительными обжатиями от 0,25 до 3,5 %.

Для резки полос на листы устанавливают два – три агрегата поперечной резки.

Особое значение среди отделочных операций придается правке холоднокатаного металла. Правка холоднокатаных листов осуществляется на роликотправильных и правильно-растяжных машинах.

В целях защиты металла от повреждений в процессе транспортировки производят упаковку готового проката, тип которой зависит от вида проката и заказа, способа и продолжительности транспортировки и др.

Готовый холоднокатаный металл поставляется в пачках листов или в рулонах. Пачки листов обвязывают упаковочной лентой толщиной, на которую навешивают бирку с основными данными отгружаемого металла. Для придания большей жесткости пачкам большой длины вместе с ними увязывают деревянные брусья в продольном и поперечном направлениях.

На некоторых заводах холоднокатаные листы перед увязкой обертывают одним или двумя слоями бумаги, которую промасливают или пропитывают парафином для предохранения листов от коррозии.

Обычно холоднокатаные рулоны перед упаковкой промасливают, затем увязывают одной полоской по периметру, обертывают бумагой сначала промасленной, а потом 2 – 3-слойной водонепроницаемой. Обернутый рулон увязывают снаружи по периметру и высоте. Рулоны тонкого металла, жести и другого металла с покрытиями устанавливают на деревянные брусья при перевозках в горизонтальном положении или на деревянные поддоны при перевозках в вертикальном положении и увязывают совместно с ними.

Рулоны узкой полосы обертывают промасленной и упаковочной бумагой (каждый рулон), а также в ряде случаев мешковиной, после чего увязывают, устанавливают на поддон и увязывают вместе с ним. При поставке крупными партиями часто из нескольких

предварительно увязанных рулонов делают стопу, ставят ее на поддон, обертывают промасленной водонепроницаемой бумагой, а затем увязывают совместно с поддоном.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем отличаются заводы с полным металлургическим циклом от передельных?
2. Что такое профильный и марочный сортамент прокатной продукции?
3. Перечислите основные способы прокатки.
4. Что такое опережение и отставание при продольной прокатке?
5. Каковы основные деформационные и энергосиловые параметры процесса продольной прокатки.
6. По каким признакам классифицируют прокатные станы?
7. Какое расположение клетей в прокатных станах является наиболее совершенным?
8. Какой вид проката производится с применением универсальных клетей?
9. Какие технологические схемы производства проката используются на металлургических комбинатах?
10. В чем заключается подготовка исходного металла к прокатке?
11. Какова основная цель нагрева металла перед прокаткой?
12. Какими нежелательными явлениями сопровождается нагрев металла?
13. Перечислите основные способы охлаждения проката.
14. Какое оборудование применяется для порезки проката на мерные длины?
15. Назовите отделочные операции, применяемые в прокатных цехах.
16. Какое оборудование применяют для правки проката?

### 3 Прессовое производство

#### 3.1 Сущность прессования. Основные способы прессования. Характеристики деформации при прессовании

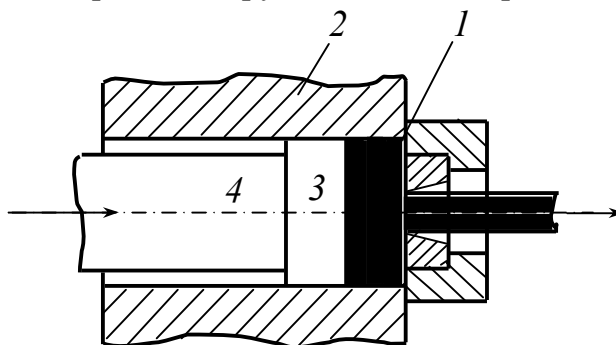
При прессовании металл, заключенный в приемнике-контейнере, выдавливается через отверстие в матрице и получает форму поперечного сечения, соответствующего форме отверстия матрицы.

Прессование иногда называют выдавливанием, экструдированием. Прессование применяют для производства сплошных и полых профилей, в частности труб постоянного и переменного по длине сечения. Прессованные полуфабрикаты близки к профилям, получаемым прокаткой.

Прессование применяют также для изготовления поковок, имеющих форму стержня постоянного или переменного сечения с утолщением на конце (например, клапан двигателя внутреннего сгорания). Прессованием получают стержневые элементы таких поковок.

Различают два основных вида прессования: с прямым и обратным истечением металла.

При прессовании с прямым истечением (рисунок 29) металл выдавливается из контейнера так, что пресс-шайба пуансоном перемещается относительно стенок контейнера при отсутствии перемещения матрицы относительно стенок. При этом перемещаться в пространстве может как контейнер, так и пуансон. При прессовании с прямым истечением заготовка перемещается относительно стенок контейнера и на контактной поверхности появляются силы трения, затрудняющие ее перемещение.



1 – металл; 2 – контейнер; 3 – пресс-шайба; 4 - пуансон  
Рисунок 29 – Схема прессования с прямым истечением металла

Разновидностью прессования с прямым истечением является прессование с боковым истечением (рисунок 30).

Процесс гидропрессования является также разновидностью прессования с прямым истечением и заключается в том, что металл из контейнера выдавливается через отверстие матрицы не действием пуансона, как в обычном процессе, а действием жидкости, подаваемой в контейнер под высоким давлением (рисунок 31).

Металл в этом процессе изолируется от инструмента жидкостью, движущейся в направлении истечения с большей скоростью, чем металл. Вследствие этого трение металла об инструмент заменяется трением о жидкость. При этом силы трения направлены в сторону истечения и тем самым снижают требуемое усилие. При большой вязкости жидкости дополнительные напряжения растяжения, вызываемые силами трения, могут превысить основные сжимающие напряжения, что приводит к разрушению прутка. Область применения гидропрессования ограничивается температурными усло-

ВИЯМИ.

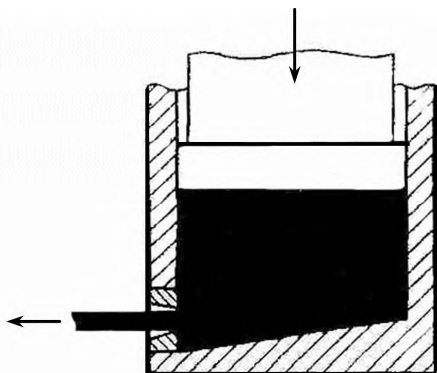


Рисунок 30 – Схема прессования с боковым истечением

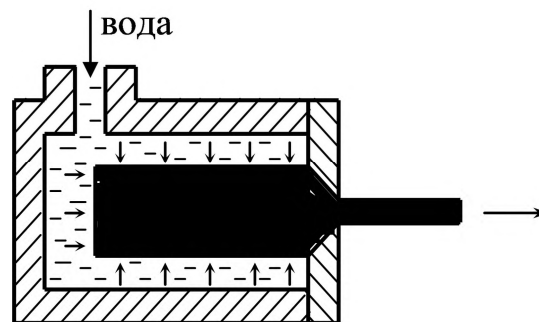


Рисунок 31 – Схема гидропрессования

При прессовании с обратным истечением (рисунок 32) матрица перемещается пуансоном относительно стенок контейнера. При этом перемещаться в пространстве может как контейнер, так и пуансон.

При прессовании с обратным истечением заготовка относительно стенок контейнера не перемещается, за исключением небольшого объема вблизи матрицы. Поэтому влияние трения на усилие прессования и течение металла в этом процессе значительно меньше, чем при прессовании с прямым истечением.

Иногда применяют совмещенное прессование, при котором прямое и обратное истечение металла происходят одновременно или последовательно. На рисунке 33 представлена схема процесса совмещенного прессования сплошного профиля.

Прессованием можно получать сплошные и полые профили с плавным или ступенчатым поперечным сечением по длине. Для этого применяют сменные матрицы или съемные матрицы с перемещающимися частями, конические и перемещающиеся иглы.

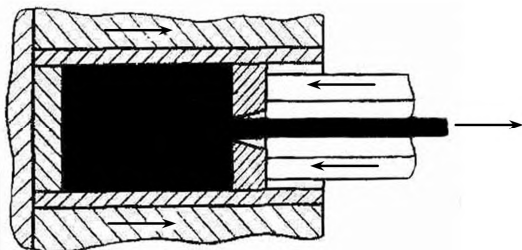


Рисунок 32 – Схема прессования с обратным истечением

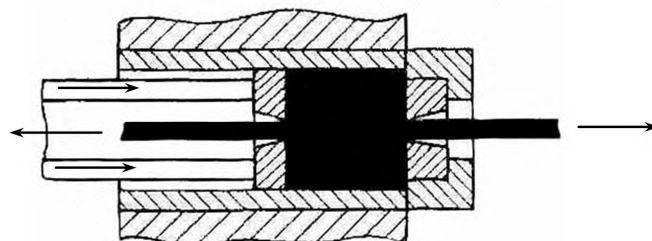


Рисунок 33 – Схема совмещенного прессования

Прессование обладает многими преимуществами по сравнению с другими процессами обработки металлов давлением – прокаткой, волочением, ковкой:

1. Механическая схема деформации (всестороннее сжатие с одной деформацией растяжения), характеризующая процесс прессования, является схемой, обеспечивающей наибольшую пластичность деформируемого металла, поэтому прессованием можно деформировать малопластичные по природе металлы и сплавы, которые другими методами деформировать невозможно.

2. Прессованием можно получать сплошные и полые профили очень сложной формы поперечного сечения (рисунок 34) – трубы с наружными и внутренними продольными и поперечными ребрами, полые профили с несколькими каналами сложной формы и т.п.

Размеры и форму поперечного сечения можно плавно или ступенчато изменять по длине профиля.

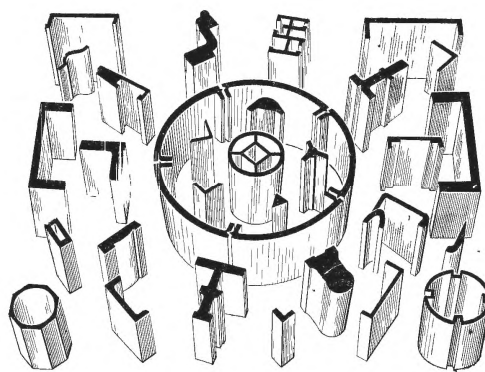


Рисунок 34 – Прессованные профили

3. При прессовании легко осуществляется переход с одного профиля на другой простой заменой матрицы. Поэтому прессование целесообразно применять при мелкосерийном производстве даже таких профилей, которые можно изготовлять прокаткой.

4. При прессовании обеспечивается высокая точность размеров сечения по сравнению с горячей прокаткой, так как упругие деформации инструмента ничтожны.

Вместе с тем прессование имеет следующие недостатки, которые ограничивают область его применения:

1. Механическая схема деформации, обеспечивающая высокую пластичность, требует повышенного усилия для деформации. Это создает тяжелые условия службы матрицы. При прессовании нагретого металла усилие снижается, но условия службы инструмента ухудшаются. В связи с этим инструмент изготавливают из сложнолегированных сплавов, производят частую его смену.

2. Прессованные изделия характеризуются значительной неравномерностью свойств по сечению и длине в результате неравномерности деформации (более резко выраженной, чем при прокатке). Степень неравномерности деформации, а следовательно, и свойств изделий зависит от следующих основных факторов:

- 1) температуры прессуемого металла и инструмента;
- 2) трения на поверхностях контакта металла с инструментом;
- 3) степени деформации;
- 4) скорости прессования и истечения;
- 5) прочностных свойств прессуемого металла.

Для снижения усилия прессования металлов с повышенной прочностью прессование осуществляют при высоких температурах. Вследствие этого неизбежно значительное охлаждение периферийных слоев металла, соприкасающихся с инструментом, особенно в обжимающей части пластической зоны вблизи матрицы. Внутренние слои (более горячие) имеют пониженное сопротивление деформации и стремятся переместиться быстрее наружных, что приводит к неравномерности деформации по сечению. Выравнивание скоростей течения по сечению прутка вследствие его целостности приводит к появлению дополнительных напряжений растяжения в наружных слоях и сжатия в центральных.

При прессовании температура неодинакова и по длине прутка: задний конец обычно имеет пониженную температуру по сравнению с передним – из-за большей длительности контакта с инструментом. В связи с этим предлагают нагревать заготовку неравномерно: наружные слои и ее задний конец до более высокой температуры по сравнению с внутренними слоями и передним концом. Это компенсирует неравномерность охлаждения при прессовании. Однако при значительном перепаде температуры по сечению наружные слои горячее внутренних и могут течь быстрее их. В результате во внут-

ренных слоях появятся дополнительные напряжения растяжения, что может привести к внутренним разрывам.

Трение, как и во всех процессах обработки металлов давлением, увеличивает неравномерность деформации и требуемое усилие. Трение сдерживает течение металла периферийных слоев. Для снижения трения при прессовании применяют смазку инструмента или заготовки. При прессовании нагретого металла смазка должна иметь незначительную теплопроводность, чтобы уменьшить охлаждение поверхности заготовки и нагрев инструмента. Смазка уменьшает трение, а, следовательно, и неравномерность деформации и усилие.

Повышение степени деформации увеличением сечения заготовки или уменьшением сечения изделия приводит к неравномерности деформации. Однако при высоких степенях деформации разница в свойствах частей прессованного изделия, получивших различную степень деформации, будет уменьшаться в связи с уменьшением интенсивности упрочнения с ростом степени деформации. Поэтому прессование осуществляют большими степенями деформации для получения изделий с равномерными свойствами. Если прессованное изделие в дальнейшем не подвергается обработке давлением (прокатка, волочение), то вытяжка должна быть не менее десятикратной; если прессуют заготовку для дальнейшей обработки давлением, то вытяжка должна быть не менее пятикратной.

Скорость прессования определяет длительность контакта прессуемого металла с инструментом. При прессовании с нагревом заготовки для уменьшения охлаждения металла и разогревания инструмента скорость прессования должна быть большой (чем больше скорость, тем равномернее деформация). Однако при повышении скорости прессования увеличивается сопротивление деформации и требуемое усилие. При прессовании сплавов, имеющих узкий температурный интервал пластичности, увеличение скорости прессования приводит к снижению пластичности в связи с повышением температуры из-за выхода тепла деформации.

3. При прессовании по сравнению с прокаткой получается больший расход металла из-за необходимости осуществлять прессование не до конца, оставляя пресс-остаток.

Указанные преимущества и недостатки прессования ограничивают область его применения производством профилей из малопластичных металлов и сплавов, профилей сложной формы, при мелкосерийном изготовлении профилей.

Основным деформационным параметром, характеризующим процесс прессования, является степень деформации.

Степень деформации при прессовании оценивают коэффициентом вытяжки, равным отношению площади сечения заготовки к площади сечения готового изделия, т. е.

$$\lambda_{\text{прес}} = \frac{F_0}{F_1}, \quad (46)$$

где  $\lambda_{\text{прес}}$  – коэффициент вытяжки при прессовании;

$F_0$  и  $F_1$  – соответственно площадь поперечного сечения заготовки до прессования и после прессования, мм<sup>2</sup>.

Степень деформации может оцениваться истинной деформацией, являющейся натуральным логарифмом коэффициента вытяжки

$$\delta_{\text{прес}} = \ln \frac{F_0}{F_1}, \quad (47)$$

где  $\delta_{прес}$  – истинная деформация при прессовании.

Оба показателя степени деформации являются условными. В действительности степень деформации различна по сечению и по длине прутка.

Основным энергосиловым параметром при прессовании является усилие прессования. Усилие прессования складывается из следующих основных составляющих:

- а) усилия, затрачиваемого на формоизменение металла в обжимающей части;
- б) усилия, затрачиваемого на перемещение частиц металла в пластической зоне, т.е. в объеме слитка вне обжимающей части;
- в) усилия на преодоление трения по контактными поверхностям контейнера и матрицы.

Полное усилие прессования – сумма этих составляющих.

Силовые условия прессования определяются свойствами деформируемого металла, температурным режимом, размерами заготовки, скоростью и степенью деформации, величиной контактного трения, геометрией инструмента. К сожалению, в настоящее время еще не разработана методика, позволяющая связать все эти факторы в математическое выражение для определения усилий прессования.

Хорошие результаты при определении усилия выдавливания металла с прямым истечением дает формула Е.П. Унксова, которая имеет следующий вид:

$$P_{прес} = F_0 \cdot \sigma_s \cdot \left[ \frac{2 \cdot l_0}{D_0} + \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{F_0}{F_1} + 4 \cdot \frac{f \cdot l_k}{D_1} \right], \quad (48)$$

где  $P_{прес}$  – усилие прессования, МН;

$\sigma_s$  – сопротивление металла пластической деформации при прессовании, МПа;

$l_0$  – длина заготовки в момент начала выхода металла из формующей цилиндрической части матрицы, мм;

$D_0, D_1$  – соответственно диаметр заготовки и диаметр изделия (диаметр цилиндрической части очка матрицы), мм;

$\alpha$  – угол при вершине конуса матрицы, рад;

$l_k$  – длина цилиндрической части очка матрицы, мм.

### 3.2 Оборудование для прессования

Прессование производится на гидравлических или механических прессах с вертикальным или горизонтальным перемещением пресс-шайбы и пуансона мощностью до 10 МН. Наибольшее распространение имеют прессы с гидравлическим приводом. Они отличаются простотой конструкции и развивают значительные усилия. Прессы с механическим приводом от электродвигателя применяют реже.

Основным инструментом при прессовании является матрица, которая обеспечивает получение правильных размеров профиля и качество поверхности.

Матрицы, применяемые при прессовании, классифицируются по двум основным критериям:

- 1) по количеству отверстий – одноочковые и многоочковые. Количество отверстий в матрице определяется видом получаемого изделия и необходимой производительностью прессы. При прессовании круглых профилей небольших размеров матрица может иметь до тридцати и более отверстий, которые расположены на равных расстояниях по концент-



рическим окружностям.

2) по форме – конические (с одним или двумя конусами), плоские и радиальные (рисунок 35).

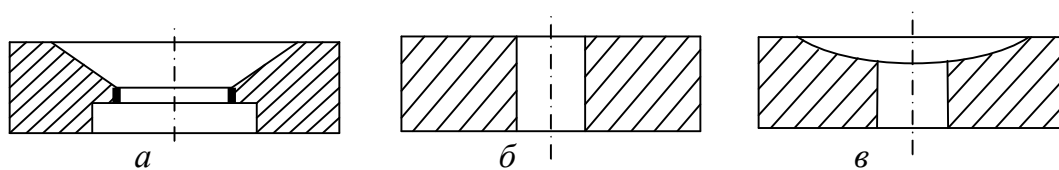


Рисунок 35 – Схемы конической (а), плоско (б) и радиальной (в) матриц

### 3.3 Технологические операции при прессовании

Впервые метод прессования был научно обоснован академиком Курнаковым Н.С. в 1813 году и применялся главным образом для получения прутков и труб из оловянисто – свинцовых сплавов.

В настоящее время в качестве исходной заготовки при прессовании используют слитки или прокат из углеродистых и легированных сталей, а также из цветных металлов и сплавов на их основе (медь, алюминий, магний, титан, цинк, никель, цирконий, уран, торий).

Процесс прессования металла включает следующие операции: подготовку заготовки к прессованию (удаление наружных дефектов, порезку на мерные длины); нагрев заготовки до заданной температуры в пламенной или электропечи; подачу нагретого металла в контейнер; выдавливание металла из контейнера через очко матрицы (собственно прессование); отделку полученного изделия (ломку заднего конца для полного удаления прессуемости, удаление окалины, резку на мерные длины, правку и т.д.).

При прессовании выход годного составляет 70–80 %. Коэффициент вытяжки: 8–50 и выше.

#### Контрольные вопросы

1. Дайте определение процессу прессования.
2. Перечислите основные способы прессования. Назовите их особенности.
3. В чем заключается сущность гидропрессования?
4. Какие профили возможно получать при прессовании?
5. Каковы основные преимущества и недостатки процесса прессования?
6. Что является основным инструментом при прессовании?
7. Какие виды прессов используются для прессования металлов?
8. Назовите основные технологические операции при прессовании.

## 4 Волочение

### 4.1 Сущность волочения. Характеристики деформации при волочении

Волочение металлов применяют при производстве изделий малых сечений и относительно большой длины – проволоки, труб малого диаметра и с тонкой стенкой.

Широко применяют также волочение относительно крупных сечений горячекатаных прутков с целью повышения точности размеров сечения и улучшения качества поверхности.

Пластическая обработка металла волочением имеет ряд явных преимуществ перед другими способами производства изделий. Основные из них следующие:

1. Получение изделий с размерами поперечного сечения высокой точности и высоким качеством поверхности;
2. Возможность изготовления полых и сплошных изделий, производство которых другими способами не всегда представляется возможным (например, прутки значительной длины);
3. В сочетании с термической обработкой волочение обеспечивает придание изделиям высоких механических свойств.

При волочении передний конец заготовки заостряют, вставляют в отверстие волоки меньшего диаметра, чем заготовка, захватывают клещами и протягивают через волоку (рисунки 36). При этом площадь сечения прутка уменьшается, длина увеличивается.

Волочение отличается от других процессов обработки металлов давлением тем, что коэффициент вытяжки при волочении ограничивается прочностью выходящего конца изделия и практически не превышает 1,3–1,5.

Волочение, как правило, применяют для обработки металла в холодном состоянии. Только в некоторых случаях для труднодеформируемых металлов (вольфрам, молибден) применяют горячее или теплое волочение. Теплое волочение проводят в узком интервале температур в районе рекристаллизации с тем, чтобы в процессе деформации полностью или частично восстановились прочностные свойства металла. В процессе волочения металл наклепывается и приобретает волокнистое строение (текстуру). Это обуславливает изменение физических, химических и особенно механических свойств металла.

Несмотря на кажущуюся простоту процесса волочения и то, что он применяется в состоянии, близком к современному, более ста лет, многие его элементы изучены еще недостаточно. На этот процесс влияет большое число самых разнообразных факторов, причем пока для многих из них трудно установить не только количественные, но иногда даже и качественные зависимости.

Преимущественное влияние на течение процесса оказывают прочностные и пластические свойства протягиваемого металла, степень и скорость деформации, форма профиля волочильного канала, материал волоки, качество трущихся поверхностей и смазка, а также тепловые процессы, происходящие при волочении.

Основной инструмент при волочении – волоки различной конструкции. Волока работает в сложных условиях: большое напряжение сочетается с износом при протягивании, поэтому их изготавливают из твердых сплавов. Для получения особо точных профилей волоки изготавливают из алмаза.

Для уменьшения трения при волочении, снижения усилия волочения и повышения возможной степени деформации разработаны специальные конструкции волок.

Так, было предложено сообщать обычной волоке вращательное движение вокруг оси протягиваемого круглого прутка. Благодаря вращательному движению волоки уменьшаются силы трения, а, следовательно, и усилие волочения. Этот способ волочения не по-

лучил практического применения, так как для заметного снижения усилия волочения при высоких скоростях волочения число оборотов волоки должно быть чрезмерно большим.

Для снижения сил трения применяют валковые волоки (рисунок 37), в которых канал образован валками, вращающимися в подшипниках качения.

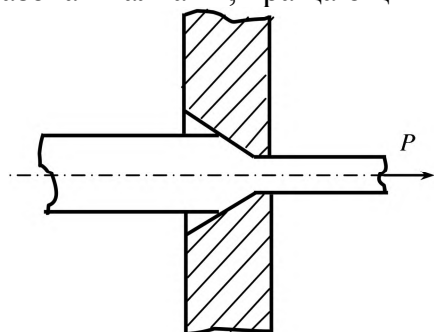


Рисунок 36 – Схема волочения круглого сплошного профиля

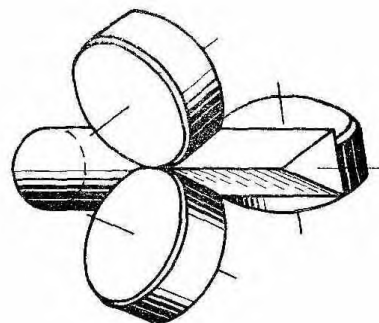


Рисунок 37 – Валковая волока для трехгранного профиля

Основными параметрами деформации при волочении являются:  $F_0, F_1$  – площадь поперечного сечения до и после волочения соответственно, мм<sup>2</sup>;  $D_0, D_1$  – диаметр заготовки до и после волочения соответственно, мм;  $\alpha_{вол}$  – полуугол рабочего конуса волоки, град;  $\alpha_{пр}$  – приведенный полуугол рабочего конуса волоки, град;  $\sigma_{вол}$  – напряжение волочения, МПа;  $P_g$  – сила волочения, МН;  $Q$  – сила противонатяжения, МН.

Важнейшей характеристикой процесса волочения является напряжение волочения. Оно используется для проверки надежности применяемых и разработки новых режимов волочения, для определения усилия волочения с целью подбора соответствующего волочильного оборудования.

Напряжением волочения называется продольное напряжение растяжения, возникающее от действия приложенной внешней силы в переднем, вышедшем из очага деформации конце обрабатываемого изделия.

Напряжение волочения определяется по формуле

$$\sigma_{вол} = \frac{P_g}{F_1}, \quad (49)$$

где  $\sigma_{вол}$  – напряжение волочения, МПа;

$P_g$  – сила волочения (усилие, прикладываемое к прутку), МН;

На основании многочисленных экспериментальных данных можно считать, что основное влияние на напряжение и силу волочения оказывают следующие факторы:

- сопротивление металла деформации (прочностные характеристики протягиваемого металла);
- величина деформации за проход (переход);
- форма продольного профиля канала волоки;
- условия трения на контактной поверхности (свойства смазки и способ ее ввода в зону деформации);
- форма начального и конечного поперечного сечения протягиваемого изделия;
- противонатяжение (которое прикладывают к заднему концу заготовки для снижения трения);
- скорость и температура волочения;

– диаметр протягиваемого изделия.

Для обеспечения нормальных условий процесса волочения необходимо, чтобы напряжение волочения было меньше величины сопротивления пластической деформации металла после его выхода из деформационной зоны. В противном случае пластическая деформация будет происходить и после выхода металла из волоки, что может привести к образованию шейки и разрыву переднего конца обрабатываемого изделия, что недопустимо.

Иногда процесс волочения ведут с противонатяжением. Противонатяжение – это сила, прикладываемая к концу заготовки, входящей в волоку в направлении, противоположном направлению силы волочения. Отношение силы противонатяжения к начальному сечению заготовки называется напряжением противонатяжения

$$\sigma_{\sigma} = \frac{Q}{F_0}, \quad (50)$$

где  $\sigma_{\sigma}$  – напряжение противонатяжения, МПа.

Чтобы не произошел обрыв заготовки на входе в волоку, напряжение противонатяжения и ее сила должны быть ограничены.

Сила и напряжение волочения – основные параметры процесса волочения.

Определение их значений необходимо при выборе мощности привода и обжатий по переходам и т.д.

Сила волочения – основной параметр, определяющий ход процесса волочения; и при прочих равных условиях максимально возможную степень деформации за переход.

Зона деформации при волочении проволоки состоит из двух участков: конического деформирующего и цилиндрического калибрующего (рисунок 38). Основная деформация осуществляется на коническом участке волоки, деформация на цилиндрическом участке обеспечивает повышение точности и качества поверхности готовой проволоки.

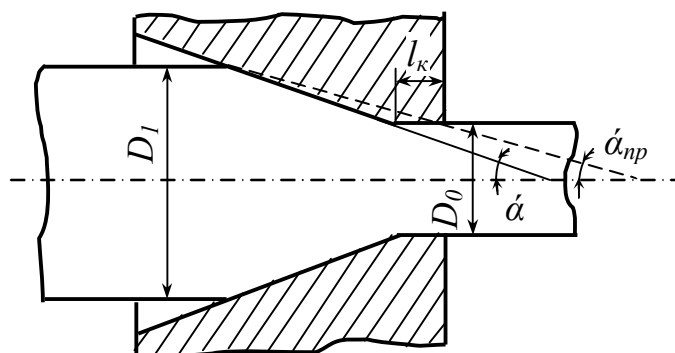


Рисунок 38 – Зоны деформации при волочении

Степень деформации при волочении определяется выражением

$$\varepsilon_{\text{вол}} = \frac{F_0 - F_1}{F_0} = \frac{D_0^2 - D_1^2}{D_0^2}, \quad (51)$$

где  $\varepsilon_{\text{вол}}$  – степень деформации при волочении.

Степень деформации можно изменить за счет изменения начального сечения, за счет изменения конечного сечения или одновременного изменения того и другого сечения.

Коэффициент вытяжки при волочении рассчитывается по формуле

$$\lambda_{\text{вол}} = \frac{F_0}{F_1}.$$

Обжатие и вытяжка при волочении связаны между собой следующими соотношениями, основанными на законе постоянства объема металла

$$\varepsilon_{\text{вол}} = \frac{(\lambda_{\text{вол}} - 1)}{\lambda_{\text{вол}}}; \quad (52)$$

$$\lambda_{\text{вол}} = \frac{1}{(1 - \varepsilon_{\text{вол}})}. \quad (53)$$

По сравнению с показателем обжатия коэффициент вытяжки точнее характеризует степень деформации металла при волочении, причем с повышением степени деформации разница между показателями деформации увеличивается.

Волочение можно вести либо через одну волоку, либо при помощи специальных устройств одновременно через несколько волок. В первом случае волочение называют однократным, а во втором – многократным. В последнем случае зависимость между начальным и конечным сечениями протягиваемой заготовки, числом протяжек и средней вытяжкой за переход выражается формулой

$$n = \frac{(\ln F_0 - \ln F_n)}{\ln \lambda_{\text{cp}}}, \quad (54)$$

$$\lambda_{\text{cp}} = \sqrt[n]{\lambda_{\text{общ}}} = \sqrt[n]{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_n},$$

где  $\lambda_{\text{cp}}$ ,  $\lambda_{\text{общ}}$  – средний и общий коэффициенты вытяжки при волочении;

$\lambda_1 \div \lambda_n$  – коэффициенты вытяжки в каждом переходе;

$F_n$  – площадь поперечного сечения прутка после  $n$  переходов, мм<sup>2</sup>.

Напряжение волочения определяют либо экспериментально, либо по теоретическим, полуэмпирическим и эмпирическим формулам.

Упрощенная формула И.Л. Перлина для определения напряжения волочения сплошных круглых профилей

$$\sigma_{\text{вол}} = \frac{1}{\cos^2 \frac{\alpha_{\text{вол}} + \rho}{2}} \cdot \left\{ \sigma_{\text{сcc}} \cdot \frac{a+1}{a} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_0} \right)^{2 \cdot a} \right] + \sigma_{\text{д}} \cdot \left( \frac{D_1}{D_0} \right)^{2 \cdot a} \right\}, \quad (55)$$

где  $\rho$  – угол трения (угол, под которым на поверхности заготовки в очаге деформации действует напряжение трения), град;

$\sigma_{\text{сcc}}$  – среднее значение сопротивления металла деформации, МПа;

$a$  – коэффициент, равный

$$a = \cos^2 \rho \cdot (1 + f \cdot \text{ctg} \alpha_{\text{np}}), \quad (56)$$

Приведенный угол учитывает влияние на напряжение волочения калибрующего участка волочильного канала и определяется по формуле

$$\operatorname{tg}\alpha_{np} = \frac{(D_0 - D_1) \cdot \operatorname{tg}\alpha_{вол}}{(D_0 - D_1) + 2 \cdot l_k \cdot \operatorname{tg}\alpha_{вол}}, \quad (57)$$

где  $l_k$  – длина калибрующего участка волочильного канала (рисунок 38), мм, определяемая по формуле

$$l_k = D_1 \cdot m \quad (58)$$

где  $m$  – коэффициент, выбираемый в пределах (0,1 – 1,5).

На напряжение волочения как непосредственно (в соответствии с формулой), так и вследствие изменения сопротивления деформации обрабатываемого металла влияет величина деформации, а также изменения размеров контактной поверхности. Так, при увеличении степени деформации возрастает величина среднего сопротивления деформации, что вызывает рост напряжения волочения.

Среднее сопротивление деформации определяется из выражения

$$\sigma_{сcc} = \frac{\sigma_{s0} + \sigma_{s1}}{2}, \quad (59)$$

где  $\sigma_{s0}$  и  $\sigma_{s1}$  – сопротивление деформации металла соответственно до и после деформации, МПа.

Сопротивление деформации металла после волочения определяется по формуле

$$\sigma_{s1} = \sigma_{s0} + 100 \cdot a_1 \cdot \varepsilon_{вол}^{n_1}, \quad (60)$$

где  $a_1$ ,  $n_1$  – коэффициенты для конкретных марок стали.

Увеличение деформации при сохранении профиля волокна вызывает прирост контактной поверхности и контактных сил трения, которые в свою очередь влияют на величину напряжения волочения.

Одним из важных технологических показателей процесса волочения является так называемый коэффициент запаса

$$\gamma_z = \frac{\sigma_{s1}}{\sigma_{вол}}. \quad (61)$$

С учетом того, что расчетные формулы для определения напряжения волочения многие факторы, от которых оно зависит, учитывают приближенно, а некоторые не учитывают вообще (наличие поверхностных и внутренних дефектов, ослабляющих вытягиваемый конец изделия, несовпадение осей протягиваемого изделия и канала волокна, вибрация, динамические нагрузки и т.п.), рекомендуемая величина коэффициента запаса при волочении прутков, толстостенных труб и профилей  $\gamma_z = 1,3 - 1,4$ ; при волочении тонкостенных труб и профилей, а также проволоки малых диаметров  $\gamma_z = 1,6 - 1,8$ .

## 4.2 Оборудование для волочения

Технологический процесс волочения осуществляется на специальных волочильных станах.

В зависимости от типа тянущего устройства различают станы: с прямолинейным

движением протягиваемого металла (цепной, реечный); с наматыванием обрабатываемого металла на барабан (барабанный).

Цепные или реечные станы используют для волочения профилей, наматывание которых в бунт вызывает определенные трудности, например, из-за значительных размеров поперечного сечения.

На цепных (реечных) станах протягивают профили и трубы в виде длинных штанг. Протягивание заготовки через волоку осуществляется электрическим двигателем, вращательное движение которого преобразуется в прямолинейное движение цепи и волочильной тележки. Передний конец заготовки, выходящий из волоки, зажимается специальными захватами тележки. Заготовка, протягиваясь через волоку, приобретает форму заданного изделия.

Барабанные станы применяются для волочения проволоки, профилей, форма поперечного сечения которых позволяет сматывать их в бунт. Барабанные станы могут быть однократного или многократного волочения, что определяется числом осуществляемых на них протяжек (рисунок 39).

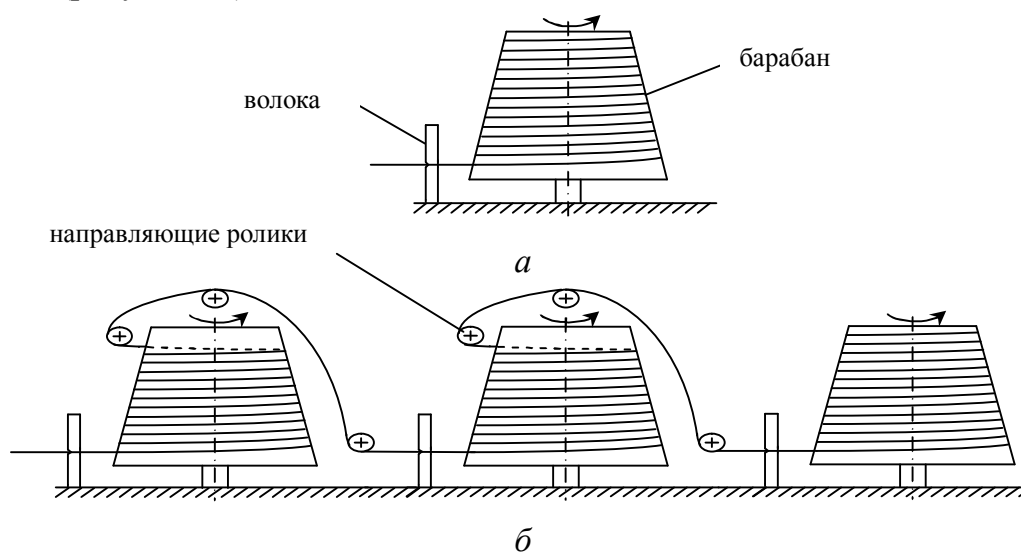


Рисунок 39 – Схемы барабанного стана однократного (а) и многократного (б) волочения

Принцип работы станов многократного волочения заключается в том, что пластическое деформирование прутка последовательно выполняется в нескольких волоках. Причем по выходе из одной волоки протягиваемый металл наматывается на барабан и в тоже время другой конец прутка сматывается с него, поступая через следующую волоку на другой барабан и т.д. Это сокращает количество вспомогательных операций и существенно повышает производительность.

Барабан воспринимает значительные усилия волочения при наматывании изделия. Для уменьшения износа барабана его рабочей поверхности придают повышенную твердость.

### 4.3 Технологические операции при волочении

В качестве исходного материала для волочения применяют катанную или прессованную заготовку. Независимо от способа получения исходная заготовка перед волочением проходит тщательную предварительную подготовку, которая заключается в проведении того или иного вида термической обработки, удалении окалины, подготовки поверхности для закрепления и удержания на ней смазки в процессе волочения.

Эти предварительные операции обеспечивают нормальное протекание пластической деформации в волочильном отверстии, способствуют получению высокого качества поверхности, уменьшают усилия и энергию на волочение и снижают износ.

Термическая обработка металла перед волочением снимает наклеп, придает металлу необходимые пластические свойства, обеспечивает получение оптимальной структуры. В зависимости от химического состава и назначения применяют отжиг, нормализацию, закалку и т.д. В процессе получения готового изделия волочением термообработку для снятия наклепа и улучшения структуры можно выполнить несколько раз в зависимости от размеров исходного и конечного продукта и окончательных конечных показателей. Обычно промежуточную термообработку проводят после относительного обжатия 75–85 %. Готовый продукт также может подвергаться термообработке для получения требуемых механических свойств и структуры.

При производстве проволоки и прутков удаление окалины в волочильных цехах проводят механическим, химическим и комбинацией этих способов.

При механической очистке проволоку или прутки подвергают периодическим перегибам между роликами. Окончательную обработку проводят механическими щетками (рисунок 40). Такой способ пригоден для очистки поверхности прутков и проволоки из углеродистой стали, окалина которой при перегибах легко разрушается и опадает.

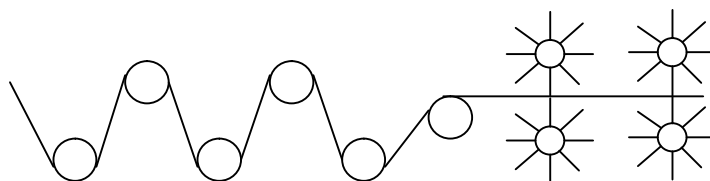


Рисунок 40 – Схема удаления окалины при перегибе через ролики

Из механических способов, обеспечивающих достаточно успешное удаление окалины, широкое применение находит дробеметная очистка (рисунок 41), при которой под действием ударов дроби из отбеленного чугуна, стального литья или высокопрочной мелконарезанной стальной проволоки окалина на поверхности обрабатываемого изделия разрушается и удаляется.

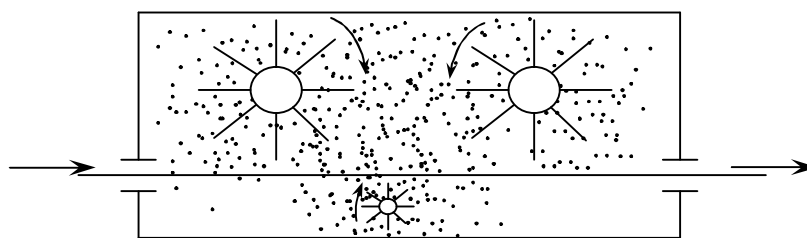


Рисунок 41 – Схема дробеметной установки для удаления окалины

Химические способы удаления окалины получили широкое распространение благодаря своей надежности. Травление углеродистых и ряда легированных сталей проводят в Серной или соляной кислоте. Высоколегированные стали травят в смесях кислот: серной и соляной, серной и азотной.

Травление металла для очистки от окалины проводят с добавлением присадок и ингибиторов, которые уменьшают скорость растворения основного металла, но не влияют на скорость растворения окалины, что предотвращает перетрав. После травления металл тщательно промывают. Промывку проводят немедленно, так как задержка приводит к высыханию травильной жидкости и выделению труднорастворимых солей железа



(сначала горячей водой, что обеспечивает интенсивное растворение солей, а затем холодной).

После удаления окалины наносят подсмазочный слой, который должен хорошо удерживать смазку при волочении и способствовать предохранению налипания металла на рабочую поверхность волокна.

Подсмазочный слой наносят при операциях желтении, меднения, фосфотирования и известкования.

При желтении поверхность изделия покрывают тонким слоем гидроксида железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  желтого цвета, который совместно с известью выполняет роль наполнителя при волочении с мыльным порошком.

Прутки и проволоку из углеродистой и легированной стали часто подвергают меднению в течение 1–5 мин в растворе серной кислоты и медного купороса. Обработка меднением позволяет проводить волочение с большими суммарными обжатиями, так как тонкая пленка меди заметно снижает коэффициент трения, что облегчает процесс волочения.

Иногда применяют фосфатирование – процесс образования на проволоки мелкой кристаллической пленки фосфатов марганца, железа или цинка. Фосфатная пленка в сочетании со смазкой способствует уменьшению усилия и износа волокон.

При известковании металл погружают на 5 мин в раствор извести. При этом выполняются две задачи: нейтрализация остатков кислоты на поверхности металла после травления; выполнение осевшими частицами извести роли наполнителя при сухой смазке мыльным порошком.

После травления, промывки и нанесения подсмазочного слоя, металл сушат в камерах с температурой воздуха 300–350 °С. Во время сушки удаляется вода и часть растворенного в металле водорода; это способствует устранению травильной хрупкости металла.

До волочения на сухую поверхность металлической заготовки наносят соответствующую смазку. Смазка уменьшает усилие волочения и расход энергии, способствует получению гладкой поверхности протягиваемого металла и повышает стойкость инструмента (волокон).

Применяемые при волочении смазки разделяют на твердые (мыльные порошки, графит, парафин), консистентные или полужидкие (солидолы, минеральные масла в смеси с мылом, петролатумом и т.д.) и жидкие (водные эмульсии минеральных масел и мыла, масляные эмульсии с добавлением керосина в качестве диспергатора). Часто применяют сухие смазки, к которым относят стеараты натрия, кальция и алюминия. Применяют жирные кислоты, причем, наибольшего эффекта достигают при применении стеариновой кислоты. Содержание жирных кислот в смазке колеблется от 40 до 90 %. Жидкие смазки, кроме их прямого назначения, должны обладать и высокими охлаждающими свойствами и хорошей смачиваемостью. С этой целью в них добавляют поверхностно активные вещества. Введение в смазку небольших количеств поверхностно активных веществ (серы, фосфора) облегчает процесс деформирования металла. Эти вещества проникают в микротрещины на поверхности протягиваемой заготовки и создают в них дополнительные раздвигающие усилия, облегчающие процесс деформации под воздействием внешних сил.

Выбор режима волочения, т.е. обжатия, скорости волочения и смазки зависит от свойств металла и свойств материала волокна, профиля и величины поперечного сечения изделия.

Готовый профиль разрезают на мерные длины в случае необходимости, подвергают правке на роликоправильных машинах, которые устанавливают или в потоке производства или отдельно, смазывают и упаковывают.

## Контрольные вопросы

1. Перечислите основные преимущества процесса волочения.
2. Что относится к основным параметрам деформации процесса волочения?
3. Какие факторы влияют на напряжение волочения?
4. Дайте классификацию волочильным станам.
5. Основные преимущества волочильных станов многократного волочения.
6. Какими способами удаляют окалину перед волочением?
7. В чем заключается операция нанесения подмазочного слоя? Его назначение.
8. Перечислите основные отделочные операции готового профиля после волочения.

## 5 Ковка металла

### 5.1 Сущность ковки. Операции свободной ковки. Характеристики деформации при ковке

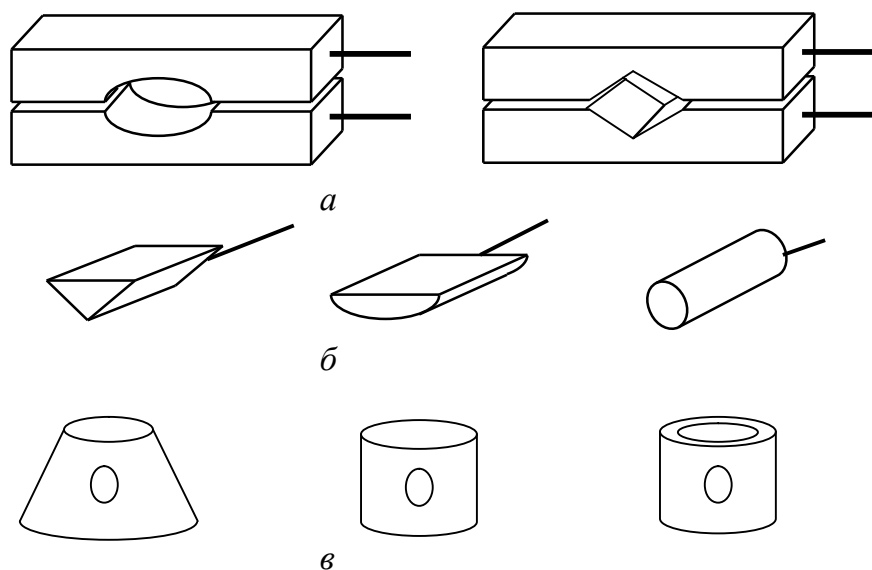
Ковка представляет собой широко распространенный способ обработки металлов давлением с целью получения изделий, называемых поковками.

*Ковка* – способ обработки давлением, при котором деформирование нагретого (реже холодного) металла осуществляется или многократными ударами молота или однократным давлением прессы.

Формообразование при ковке происходит за счет пластического течения металла в направлениях, перпендикулярных к движению деформирующего инструмента. При свободной ковке течение металла ограничено частично, трением на контактной поверхности деформируемый металл – поверхность инструмента: бойков плоских или фигурных, подкладных штампов.

Различают ручную и машинную свободную ковку, которые осуществляются с помощью различного кузнечного инструмента (рисунок 42). Ручную ковку применяют главным образом при ремонтных и сборочных работах, а также при изготовлении мелких поковок в небольшом количестве.

Машинная свободная ковка осуществляется с применением кузнечно – прессовых машин. Мелкие и средние по массе поковки (массой до 750 кг) изготавливают на молотах, а крупные (массой до 350 т) – на прессах.



*a* – обжимки; *б* – наметки, пережимки, раскатки; *в* – прошивки

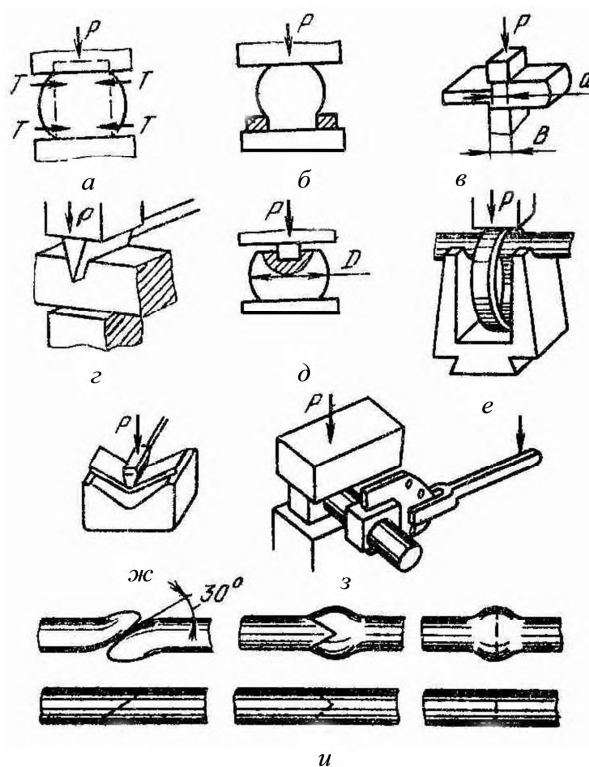
Рисунок 42 – Основной кузнечный инструмент

Технологические процессы ковки представляют собой различное сочетание и последовательность основных и вспомогательных операций, таких как осадка, протяжка, прошивка, гибка, кручение, рубка, кузнечная сварка, а также операции отделки и термической обработки (если это требуется).

*Осадка* – это операция, при которой за счет обжатия по высоте увеличивается площадь поперечного сечения заготовки, перпендикулярного к деформирующей силе (рисунок 43, *a*).

Осадка является основной операцией для получения формы поковки, но может при-

меняться также как промежуточная для устранения литой структуры или анизотропии свойств металла.



*a* – осадка; *б* – высадка; *в* – протяжка; *г* – рубка; *д* – прошивка; *е* – раскатка;  
*ж* – рубка; *з* – кручение; *и* – сварка

Рисунок 43 – Операции свободнойковки

При выполнении осадки требуется, чтобы инструмент перекрывал заготовку. Вследствие трения боковая поверхность осаживаемой заготовки приобретает бочкообразную форму, это характеризует неравномерность деформации. Повторяя осадку несколько раз с разных сторон, можно привести заготовку к первоначальной форме или близкой к ней, получив при этом более высокое качество металла и одинаковые его свойства по всем направлениям.

Во избежание продольного изгиба заготовки необходимо, чтобы при осадке выполнялось следующее условие:

$$h_0 \leq 2,5 \cdot D_0(b_0),$$

где  $h_0, b_0$  и  $D_0$  – соответственно начальная толщина, ширина или диаметр заготовки, мм.

Деформация металла при осадке характеризуется коэффициентомковки:

$$K = \frac{h_0}{h_1} = \frac{F_1}{F_0}, \quad (62)$$

где  $K$  – коэффициентковки при осадке;

$h_1$  – толщинапоковки после осадки, мм;

$F_0, F_1$  – площадь поперечного сечения заготовки и поковки, мм<sup>2</sup>.

Разновидностью осадки является высадка части заготовки. Высадка может быть

осуществлена при нагревании только определенной части заготовки (на конце или в середине) или ограничением деформации части заготовки кольцевым инструментом (рисунок 43, б).

Очень важным условием при осадке является условие плоской (двумерной) деформации, т.е. деформации без уширения: при  $\frac{l_0}{b_0} \geq 8$  (где  $l_0$  и  $b_0$  – соответственно начальные длина и ширина заготовки, мм) деформация является двумерной, и металл течет только в направлении длины.

Усилие при осадке определяется по той же формуле, что и при прокатке  $P = P_{cp} \cdot F_{\kappa}$ .

Однако контактная площадь определяется иначе

$$F_{\kappa} = b_1 \cdot l_1, \quad (63)$$

где  $b_1, l_1$  – ширина и длина полученной поковки, мм.

Среднее давление металла на инструмент можно определять, как и при прокатке по формуле

$$P_{cp.осад} = 1,15 \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_s.$$

Однако в отличие от процесса прокатки коэффициент напряженного состояния при ковке определяется весьма сложно и в зависимости от отношения  $\frac{b_1}{h_1}$  определяется по-разному.

Таким образом

1) при отношении  $\frac{b_1}{h_1} > 2 + \left| \frac{\ln(2 \cdot f)}{f} \right|$  и  $0 < f < 0,5$

$$n_{\sigma} = \frac{h_1}{f \cdot b_1} \cdot \left\{ \frac{1}{2 \cdot f} - 1 - \frac{f}{3} + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{b_1}{h_1} - \left| \frac{\ln(2 \cdot f)}{f} \right| \right) \cdot \left[ 1 + \frac{f}{2} \cdot \left( \frac{b_1}{h_1} - \left| \frac{\ln(2 \cdot f)}{f} \right| \right) \right] \right\}, \quad (64)$$

где  $h_1$  – толщина поковки, мм;  $f$  – коэффициент трения в процессековки.

2) при  $2 < \frac{b_1}{h_1} < 2 + \left| \frac{\ln(2 \cdot f)}{f} \right|$  и  $0 < f < 0,5$

$$n_{\sigma} = \frac{h_1}{f \cdot b_1} \cdot \left[ \left( 1 + 2 \cdot f + \frac{4}{3} \cdot f^2 \right) \cdot e^{2 \cdot f \cdot \left( \frac{b_1}{2 \cdot h_1} - 1 \right)} - 1 \right]. \quad (65)$$

3) при  $\frac{b_1}{h_1} \leq 2$  и  $0 < f < 0,5$

$$n_{\sigma} = 1 + \frac{f}{3} \cdot \frac{b_1}{h_1}. \quad (66)$$

4) при  $\frac{b_1}{h_1} \geq 2$  и  $f \geq 0,5$

$$n_\sigma = 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{b_1}{h_1} - \frac{1}{3} \cdot \frac{h_1}{b_1}. \quad (67)$$

Сопротивление металла деформации при ковке необходимо определять по уравнению Л.В. Андреюка – Г.Г. Тюленева.

Скорость деформации при операцияхковки определяется из выражения

$$\xi = \frac{\varepsilon_h \cdot \mathcal{G}_{осад}}{\Delta h}, \quad (68)$$

где  $\varepsilon_h$  – высотная деформация при осадке, определяемая как и при прокатке;

$\Delta h$  – абсолютное обжатие, мм;

$\mathcal{G}_{осад}$  – скорость осадки, м/с.

*Протяжка* – операция, в процессе которой длина заготовки увеличивается за счет уменьшения ее поперечных размеров при последовательных по длине нажатиях бойками.

При протяжке в отличие от осадки заготовку обрабатывают участками при последовательной подаче ее под бойки молота или прессы (рисунок 43, в).

Если сечение нужно уменьшать за счет толщины и ширины заготовки, то после каждой подачи производится осаживание толщины и затем после кантовки на  $90^\circ$  – осадки ширины.

Металл, осаживаемый участками по высоте, течет в направлении длины и ширины. К деформируемому за каждый обжим участку с обеих сторон примыкают участки, не подвергающиеся непосредственно действию инструмента. Эти участки сдерживают течение металла в направлении ширины и принудительно выравнивают деформации в длину по всей ширине.

Так как целью протяжки является увеличение длины за счет уменьшения сечения, необходимо обжим осуществлять так, чтобы течение металла в ширину было минимальным. Этого достигают обжимом малыми подачами при малом отношении подачи к ширине заготовки. Однако при малых подачах увеличивается число обжимов и снижается производительность.

Для интенсификации процесса протяжки и получения достаточно гладкой поверхности подачу следует принимать в следующих пределах

$$a = (0,4 \div 0,8) \cdot B, \quad (69)$$

где  $a$  – величина подачи заготовки, мм;

$B$  – ширина бойков, мм.

Для определения размеров заготовки после обжатия вводится понятие уковки.

Уковка – это коэффициент вытяжки за обжатие:

$$\gamma = \frac{F_0}{F_1}, \quad (70)$$

где  $\gamma$  – коэффициент уковки при протяжке;

$F_0, F_1$  – площадь поперечного сечения заготовки до протяжки и поковки после протяжки, мм<sup>2</sup>.

Кроме того, при осадке и протяжке показателем деформации является высотная деформации

$$\varepsilon_h = \frac{h_0 - h_1}{h_0}.$$

Удельное усилие (т.е. усилие, приходящееся на единицу площади или среднее давление) при протяжке определяется по формуле

$$P_{cp.прот} = 1,15 \cdot \sigma_s \cdot \left( 1 + \frac{f \cdot A}{3 \cdot h_0} \right). \quad (71)$$

Осадку и протяжку являются основными операциями свободнойковки.

Помимо них к операциямковки относятся следующие.

*Рубка*, которую применяют для разделения заготовки на несколько частей или для удаления концов поковок при помощи зубил и кузнечных топоров (рисунок 43, з).

Рубка производится в холодном и горячем состоянии. В холодном состоянии рубят тонкие и узкие полосы и прутки сечением 15 – 20 мм. Более толстые заготовки нагревают.

Схема рубки основана на действии деформирующей силы на малую площадь соприкосновения инструмента с заготовкой, а реакция этой силы со стороны нижней части распределена по большой поверхности заготовки, и пластической деформации здесь не возникает.

В зависимости от габаритов и формы заготовок используют следующие способы рубки:

- с одной стороны – для тонких заготовок;
- с двух сторон, сначала осуществляется предварительная надрубка заготовки на 0,5–0,75 высоты, после кантовки на 180° проводится окончательная рубка;
- с трех сторон – для круглых и крупных заготовок, осуществляются две надрубки на глубину 0,4 диаметра заготовки с кантовкой на 120°, после второй кантовки на 120° проводят окончательную рубку;
- с четырех сторон – для крупных заготовок, после надрубки с четырех сторон в центре остается перемычка прямоугольного сечения, по месту которой производят разделение заготовки на части.

*Прошивку* применяют с целью получения сквозных или глухих отверстий в металле при помощи прошивня (рисунок 43, д), который может быть сплошным или пустотелым. Сквозное отверстие обычно получают за два прохода. Сначала на заготовке, уложенной на подкладное кольцо, прошивнем делается наметка отверстия, затем заготовка кантуется на 180° и прошивается сквозное отверстие с удалением отхода, называемого выдрой. Прошитая заготовка далее может раскатываться по диаметру.

*Раскатка по диаметру* (рисунок 43, е) осуществляется с применением оправки, что приводит к утонению кольца и увеличению его диаметра. Заготовка опирается внутренней поверхностью на цилиндрическую оправку, устанавливаемую концами на подставках, и деформируется между оправкой и узким длинным бойком. После каждого обжатия заготовку поворачивают относительно оправки.

При *гибке* заготовку изгибают по заданному контуру (рисунок 42, ж). Гибку можно

осуществлять при зажатии одного конца заготовки между бойками ударами кувалды по другому концу. Крупные заготовки подвергают гибке в специальных гибочных штампах или нагибочных машинах.

Гибка сопровождается искажением первоначальной формы поперечного сечения заготовки и уменьшением его площади в месте изгиба (утяжка). Для компенсации утяжки в зоне изгиба заготовке придают увеличенные поперечные размеры. При гибке возможно образование складок по внутреннему контуру и трещин по наружному. Для избежания этого явления по заданному углу изгиба подбирают соответствующий радиус скругления. Радиус в месте изгиба не должен быть меньше полутора толщин заготовки.

Этой операцией получают угольники, скобы, крючки, кронштейны.

*Кручение* состоит в повороте одной части заготовки относительно другой на заданный угол (рисунок 43, з). При кручении один конец заготовки зажимают между бойками, а на другой надевают вилку. Кручение производят ударом кувалды по противоположному концу вилки или с помощью крана.

Различают два случая:

- 1) поворот на угол до  $180^{\circ}$  – для пространственной ориентации отдельных частей;
- 2) многократное скручивание на  $360^{\circ}$  – для придания витого характера (используется как элемент украшения композиций решеток, перил, лестниц и т.д.).

*Кузнечная сварка* состоит в соединении в одно целое отдельных частей поковки различными способами: в нахлестку, в разруб, в стык (рисунок 42, и). Место соединения нагревают до температуры  $1275 - 1400^{\circ}\text{C}$  и сваривают, применяя внешнее давление. Такой вид сварки используют для низкоуглеродистых сталей с содержанием углерода  $0,15 - 0,25\%$ .

В производственных условиях рассмотренные операции при изготовлении поковок применяются в различном сочетании в зависимости от характера выполняемой работы.

## 5.2 Оборудование для свободной ковки

В качестве оборудования для ковки применяются ковочные молоты и ковочные прессы.

Оборудование выбирают в зависимости от режима ковки данного металла или сплава, массы поковки и ее конфигурации. Необходимую мощность оборудования определяют по приближенным формулам или справочным таблицам.

Молоты – машины динамического ударного действия. Продолжительность деформации на них составляет тысячные доли секунды. Металл деформируется за счет энергии, накопленной падающими частями молота к моменту их соударения с заготовкой. Часть энергии теряется на упругие деформации инструмента и колебания шабота – детали, на которую устанавливают нижний боек. Чем больше масса шабота, тем выше КПД. Обычно масса шабота в 15 раз превышает массу падающих частей, что обеспечивает КПД на уровне  $0,8-0,9$ .

Для получения поковок массой до 20 кг применяют ковочные пневматические молоты, работающие на сжатом воздухе. Сила удара определяется силой давления сжатого воздуха, и может регулироваться в широких пределах. Масса падающих частей составляет 50 – 1000 кг. Основные параметры молотов регламентируются ГОСТами.

Для получения поковок массой до 350 кг применяют ковочные паровоздушные молоты. Они приводятся в действие паром или сжатым воздухом давлением  $0,7-0,9$  МПа. Масса падающих частей составляет 1000–8000 кг. Параметры регламентируются ГОСТами.

Различают молоты простого действия, когда пар или воздух только поднимают



поршень, и двойного действия, когда энергоноситель создает дополнительное деформирующее усилие.

Прессы ковочные гидравлические – машины статического действия. Продолжительность деформации составляет до десятков секунд. Металл деформируется приложением силы, создаваемой с помощью жидкости (водной эмульсии или минерального масла), подаваемой в рабочий цилиндр прессы. Выбираются прессы по номинальному усилию, которое составляет 5 – 100 МН. Применяют в основном для получения крупных заготовок из слитков.

### **5.3 Технологические операции при свободной ковке**

Исходным материалом дляковки крупных поковок служат слитки, а для средних и мелких поковок – сортовой, профильный, периодический прокат, полосовая заготовка и реже прессованные заготовки.

Ковка может производиться в горячем и холодном состоянии.

Холодной ковке поддаются драгоценные металлы – золото, серебро; а также медь. Технологический процесс холоднойковки состоит из двух чередующихся операций: деформации металла и рекристаллизационного отжига. В современных условиях холодная ковка встречается редко, в основном в ювелирном производстве.

Горячая ковка применяется для изготовления различных изделий, а также инструментов: чеканов, зубил, молотков и т.п.

Материалом для горячейковки являются малоуглеродистые стали, углеродистые инструментальные и некоторые легированные стали. Каждая марка стали имеет определенный интервал температур начала и концаковки, зависящий от состава и структуры обрабатываемого металла.

Технологический процесс включает операции: подготовку исходной заготовки, нагрев материала до требуемой температуры, формообразующую операцию, очистку заготовок от окалины, контрольковки.

Подготовка металла осуществляется в заготовительном отделении цеха, при этом удаляются поверхностные дефекты, производят резку на мерные длины. Точность и производительность резки определяется способом резки.

На практике обычно применяют нагрев в пламенной печи, как способ, не требующий дополнительных затрат. Нагретую заготовку подают к молоту или прессу дляковки. Основная операция включает переходы: установку – снятие заготовки, формоизменяющую операцию (осадку, вытяжку, прошивку и т.д.).

Очистку поковок от окалины осуществляют в галтовочных барабанах обдувкой стальной дробью, травлением в водных растворах серной или соляной кислоты.

При контроле поковок выявляют внешние и внутренние дефекты, проверяют соответствие геометрическим и функциональным техническим условиям.

### **Контрольные вопросы**

1. В каких случаях применяют ручную и машинную ковку?
2. Перечислите основные операции свободнойковки.
3. Назовите основные характеристики деформации процессов осадки и протяжки.
4. С какой целью применяют кузнечную сварку?
5. Каковы критерии выбора оборудования дляковки?
6. В каких случаях при ковке применяют прессы и молоты?
7. Для каких металлов проводят горячую и холодную ковку?

## 6 Штамповка металла

### 6.1 Объемная штамповка

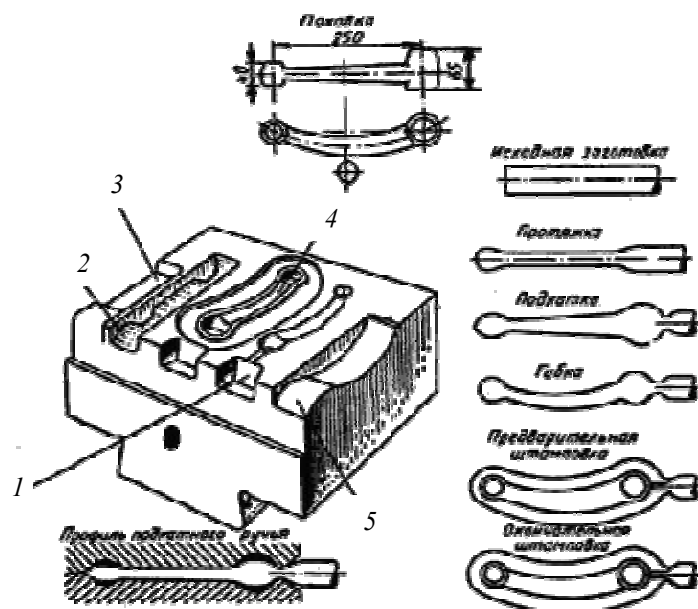
*Объемной штамповкой* называют процесс получения поковок, при котором формообразующую полость штампа, называемую *ручьем*, принудительно заполняют металлом исходной заготовки и перераспределяют его в соответствии с заданной чертежом конфигурацией.

Применение объемной штамповки оправдано при серийном и массовом производстве. При использовании этого способа значительно повышается производительность труда, снижаются отходы металла, обеспечиваются высокие точность формы изделия и качество поверхности. Штамповкой можно получать очень сложные по форме изделия, которые невозможно получить приемами свободнойковки.

Объемную штамповку осуществляют при разных температурах исходной заготовки и, в соответствии с температурой, делят на холодную и горячую. Наиболее широкое распространение получила горячая объемная штамповка, которую ведут в интервале температур, обеспечивающих снятие упрочнения.

#### 6.1.1 Сущность горячей объемной штамповки. Формообразование при горячей объемной штамповке

Основная операция горячей объемной штамповки может быть выполнена за один или несколько переходов. При каждом переходе формообразование осуществляется специальной рабочей полостью штампа – *ручьем*. Переходы и ручки делятся на две группы: *заготовительные* и *штамповочные*. Схема технологического процесса получения сложной заготовки в нескольких ручьях представлена на рисунке 44.



1 – черновой ручей; 2 – подкатной ручей; 3 – протяжной ручей;  
4 – чистовой ручей, 5 – гибочный ручей

Рисунок 44 – Стадии получения сложной поковки в нескольких ручьях

*Заготовительные ручки* предназначены для фасонирования в штампах.

Фасонирование – перераспределение металла заготовки с целью придания ей формы, обеспечивающей последующую штамповку с малым отходом металла.

К заготовительным ручьям относятся протяжной, подкатной, гибочный и пережимной, а также площадка для осадки.

Протяжной ручей предназначен для увеличения длины отдельных участков заготовки за счет уменьшения площади их поперечного сечения, выполняемого воздействием частых слабых ударов с кантованием заготовки.

Подкатной ручей служит для местного увеличения сечения заготовки (набора металла) за счет уменьшения сечения рядом лежащих участков, то есть для распределения объема металла вдоль оси заготовки в соответствии с распределением его в поковке. Переход осуществляется за несколько ударов с кантованием.

Пережимной ручей предназначен для уменьшения вертикального размера заготовки в местах, требующих уширения. Выполняется за 1–3 удара.

Гибочный ручей применяют только при штамповке поковок, имеющих изогнутую ось. Служит для придания заготовке формы поковки в плоскости разъема. Из гибочного ручья в следующий заготовку передают с поворотом на  $90^{\circ}$ .

При штамповке поковок, имеющих в плане форму окружности или близкую к ней, часто применяют осадку исходной заготовки до требуемых размеров по высоте и диаметру. Для этого на плоскости штампа предусматривают площадку для осадки.

*Штамповочные ручьи* предназначены для получения готовой поковки. К штамповочным ручьям относятся черновой (предварительный) и чистовой (окончательный).

Черновой ручей предназначен для максимального приближения формы заготовки к форме поковки сложной конфигурации. Глубина ручья несколько больше, а поперечные размеры меньше, чем у чистового ручья (чтобы заготовка свободно укладывалась в чистовой ручей). Радиусы скругления и уклоны увеличиваются. В открытых штампах черновой ручей не имеет облойной канавки. Применяется для снижения износа чистового ручья, но может отсутствовать.

Чистовой ручей служит для получения готовой поковки, имеет размеры «горячей поковки», то есть больше, чем у холодной поковки, на величину усадки. В открытых штампах по периметру ручья предусмотрена облойная канавка, для приема избыточного металла. Чистовой ручей расположен в центре штампа, так как в нем возникают наибольшие усилия при штамповке.

Технологический процесс горячей объемной штамповки зависит от формы поковки. По форме в плане поковки делятся на две группы: диски и поковки удлиненной формы.

К первой группе относятся круглые или квадратные поковки, имеющие сравнительно небольшую длину: шестерни, диски, фланцы, ступицы, крышки и др. Штамповка таких поковок производится осадкой в торец исходной заготовки с применением только штамповочных переходов.

Ко второй группе относятся поковки удлиненной формы: валы, рычаги, шатуны и др. Штамповка таких поковок производится протяжкой исходной заготовки (плашмя). Перед окончательной штамповкой таких поковок в штамповочных ручьях требуется фасонирование исходной заготовки в заготовительных ручьях штампа, свободной ковкой или на ковочных вальцах.

Так как характер течения металла в процессе штамповки определяется типом штампа, то этот признак можно считать основным для классификации способов штамповки. В зависимости от типа штампа выделяют штамповку в открытых и закрытых штампах (рисунок 45).

Штамповка в открытых штампах (рисунок 45, а) характеризуется переменным зазором между подвижной и неподвижной частями штампа. В этот зазор вытекает часть ме-

талла – облой, который закрывает выход из полости штампа и заставляет остальной металл заполнить всю полость. В конечный момент деформирования в облой выжимаются излишки металла, находящиеся в полости, что позволяет не предъявлять высокие требования к точности заготовок по массе. Штамповкой в открытых штампах можно получить поковки всех типов.

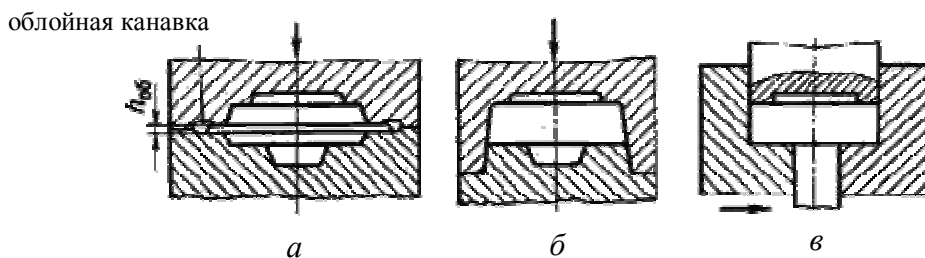


Рисунок 45 – Схемы штамповки в открытых и закрытых штампах

Штамповка в закрытых штампах (рисунок 45, б) характеризуется тем, что полость штампа в процессе деформирования остается закрытой. Зазор между подвижной и неподвижной частями штампа постоянный и небольшой, образование в нем облая не предусмотрено. Устройство таких штампов зависит от типа машины, на которой штампуют. Например, нижняя половина штампа может иметь полость, а верхняя – выступ (на прессах), или верхняя – полость, а нижняя – выступ (на молотах). Закрытый штамп может иметь две взаимно перпендикулярные плоскости разъема (рисунок 45, в).

При штамповке в закрытых штампах необходимо строго соблюдать равенство объемов заготовки и поковки, иначе при недостатке металла не заполняются углы полости штампа, а при избытке размер поковки по высоте будет больше требуемого. Отрезка заготовок должна обеспечивать высокую точность.

Существенное преимущество штамповки в закрытых штампах – уменьшение расхода металла из-за отсутствия облая. Поковки имеют более благоприятную структуру, так как волокна обтекают контур поковки, а не перерезаются в месте выхода металла в облой. Металл деформируется в условиях всестороннего неравномерного сжатия при больших сжимающих напряжениях, это позволяет получать большие степени деформации и штамповать малопластичные сплавы.

### 6.1.2 Оборудование для горячей объемной штамповки

Оборудование для горячей объемной штамповки: молоты штамповочные, горячештамповочные кривошипные прессы. Процессы штамповки на этих машинах имеют свои особенности, обусловленные устройством и принципом их действия.

Основным типом молотов для горячей объемной штамповки являются паровоздушные штамповочные молоты. Их конструкция несколько отличается от ковочных молотов. Стойка станины устанавливается непосредственно на шаботе. Молоты имеют усиленные регулируемые направляющие для движения бабы. Масса шабота превышает массу падающих частей в 30 раз. Все это обеспечивает необходимую точность соударения штампов. Масса падающих частей составляет 6,3–25 МН.

Используются молоты бесшаботной конструкции. Шабот заменен подвижной нижней бабой, связанной с верхней бабой механической или гидравлической связью. Энергия удара поглощается механизмами молота. При соударении верхней и нижней баб развивается значительная энергия, что позволяет штамповать поковки в одноручьевых штампах.

Особенностями горячей объемной штамповки на молотах являются ударный характер деформирующего воздействия и возможность регулирования хода подвижных частей и

величины удара при одновременном кантовании заготовки, что позволяет более эффективно производить перераспределение металла. На молотах возможно выполнение всех заготовительных переходов, в том числе протяжки и подката. Верхняя часть штампа заполняется лучше. Части штампа при штамповке на молоте должны смыкаться.

На молотах поковки изготавливаются с самыми низкими классами точности. Это обусловлено возможностью смещения частей штампа, отсутствием направляющих в конструкции штампа, ударным характером деформирования.

Допускаемые отклонения от номинальных размеров поковки соответствуют припускам, поэтому также являются увеличенными.

Кузнечные напуски имеют максимальные значения. Ввиду ударного характера работы молота в конструкции штампа нельзя использовать выталкиватели, поэтому для извлечения поковки из ручья штампа на вертикальных поверхностях поволоков оформляются значительные штамповочные уклоны: наружные – до  $7^{\circ}$ , внутренние – до  $10^{\circ}$ . Радиусы закругления назначаются для облегчения течения металла, повышения стойкости штампа, обеспечения расположения волокон.

Наиболее часто для горячей объемной штамповки используются кривошипные горячештамповочные прессы. Выбор прессы осуществляется по номинальному усилию, которое составляет 6,7–100 МН.

К особенностям конструкции прессы следует отнести жесткий привод, не позволяющий изменять ход ползуна, отсутствие ударных нагрузок.

Жесткий привод не позволяет производить переходы, требующие постепенно возрастающего обжатия с кантованием. Для фасонирования заготовки могут быть использованы заготовительные ручьи: пережимной, гибочный. Поэтому при штамповке на прессах сложных заготовок, имеющих удлиненную форму в плане (шатуны, турбинные лопатки), фасонирование осуществляется ковочными вальцами, свободной ковкой, высадкой на горизонтально–ковочных машинах.

Отсутствие ударных нагрузок позволяет не применять массивные шаботы, использовать сборную конструкцию штампов (блок-штампы).

Поковки, полученные на прессах, характеризуются высокой точностью, которая достигается за счет снижения припусков на механическую обработку (в среднем на 20–30 % по сравнению с поковками, полученными на молотах) и допускаемых отклонений на номинальные размеры, снижения штамповочных уклонов в два – три раза. Наличие постоянного хода приводит к большей точности поволоков по высоте, а жесткость конструкции прессы делает возможным применение направляющих колонок в штампах, что исключает сдвиг.

При штамповке на прессах деформация глубже проникает в заготовку, что позволяет штамповать малопластичные материалы, применять штампы с разъемной матрицей с боковым течением металла.

Процессу штамповки на прессах присущи недостатки:

- окалина вдавливается в тело поковки, для предотвращения этого необходимо проводить малоокислительный или безокислительный нагрев или полную очистку заготовки от окалины;

- из-за невысокой скорости деформирования время контакта металла с инструментом больше, чем на молотах, поэтому имеет место переохлаждение поверхности заготовки, что приводит к худшему заполнению полости штампа.

### **6.1.3 Технологические операции при горячей объемной штамповке**

Исходным материалом для горячей объемной штамповки являются сортовой прокат,

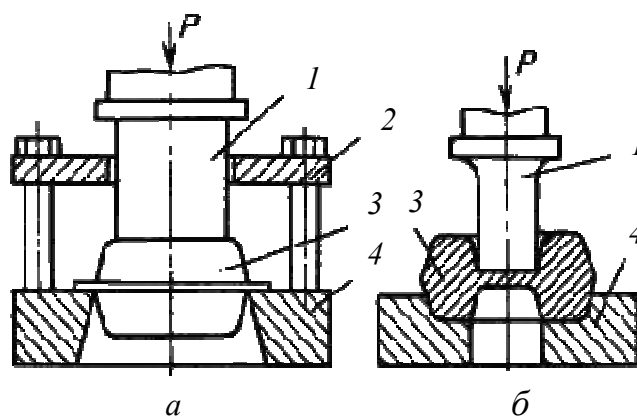
прессованные прутки, литая заготовка, в крупносерийном производстве – периодический прокат, что обеспечивает сокращение подготовительных операций.

Технологический процесс изготовления поковки включает следующие операции: отрезка проката на мерные заготовки, нагрев, штамповка, обрезка облоя и пробивка пленок, правка, термическая обработка, очистка поволоков от окалины, калибровка, контроль готовых поволоков.

Перед штамповкой заготовки должны быть нагреты равномерно по всему объему до заданной температуры. При нагреве должны быть минимальными окисление (окинение) и обезуглероживание поверхности заготовки. Используются электроконтактные установки, в которых заготовка, зажата медными контактами, нагревается при пропускании по ней тока; индукционные установки, в которых заготовка нагревается вихревыми токами; газовые печи, с безокислительным нагревом заготовок в защитной атмосфере.

Штамповку осуществляют в открытых и закрытых штампах. В открытых штампах получают поковки удлиненной и осесимметричной формы. В закрытых штампах – преимущественно осесимметричные поковки, в том числе из малопластичных материалов. Поволки простой формы штампуют в штампах с одной полостью. Сложные поковки с резкими изменениями сечений по длине, с изогнутой осью и т.п. штампуют в многоручьевых штампах.

После штамповки в открытых штампах производят обрезание облоя и пробивку пленок в специальных штампах, устанавливаемых на кривошипных прессах (рисунок 46).



1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – поковка; 4 – матрица  
Рисунок 46 – Схемы обрезания облоя (а) и пробивки пленок (б)

Правку штампованных поволоков выполняют для устранения искривления осей и искажения поперечных сечений, возникающих при затрудненном извлечении поволоков из штампа, после обрезания облоя, после термической обработки. Крупные поковки и поковки из высокоуглеродистых и высоколегированных сталей правят в горячем состоянии либо в чистовом ручье штампа сразу после обрезания облоя, либо на обрезном прессе (обрезной штамп совмещается с правочным штампом), либо на отдельной машине. Мелкие поковки правят на винтовых прессах в холодном состоянии после термической обработки.

Термическую обработку применяют для получения требуемых механических свойств поволоков и облегчения их обработки резанием. Отжиг снимает в поволоках из высокоуглеродистых и легированных сталей остаточные напряжения, измельчает зерно, снижает твердость, повышает пластичность и вязкость. Нормализацию применяют для устранения крупнозернистой структуры в поволоках из сталей с содержанием углерода до 0,4 %.

Очистку поволоков от окалины производят для облегчения контроля поверхности поволоков, уменьшения износа металлорежущего инструмента и правильной установки заго-

товки на металлорежущих станках. На дробеструйных установках окалину с поковок, перемещающихся по ленте конвейера, сбивают потоком быстро летящей дроби диаметром 1–2 мм. В галтовочных барабанах окалина удаляется благодаря ударам поковок друг о друга и о металлические звездочки, закладываемые во вращающийся барабан.

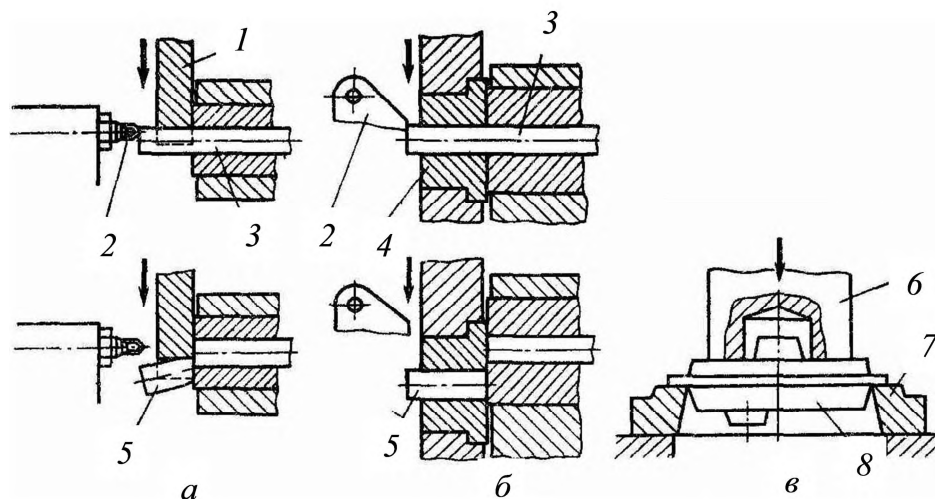
Калибровка поковок повышает точность размеров всей поковки или отдельных ее участков. В результате этого последующая механическая обработка устраняется полностью или ограничивается только шлифованием. Различают плоскостную и объемную калибровку. Плоскостная калибровка служит для получения точных вертикальных размеров на одном или нескольких участках поковки. Объемной калибровкой повышают точность размеров поковки в разных направлениях и улучшают качество ее поверхности. Калибруют в штампах с ручьями, соответствующими конфигурации поковки.

#### 6.1.4 Сущность холодной объемной штамповки. Операции холодной объемной штамповки

Холодная объемная штамповка является высокопроизводительным способом изготовления деталей из сталей и цветных металлов и сплавов. Этот способ получения деталей характеризуется высокой точностью и хорошим качеством поверхности.

Холодная объемная штамповка применяется для изготовления стандартных, нормализованных и нестандартных деталей, таких как болтов, винтов, заклепок, фасонных гаек, шариков, роликов, корпусов часов и т.д.

Операции холодной объемной штамповки подразделяют на *разделительные* и *формообразующие*. К разделительным операциям относят отрезку, обрезку и др. (рисунок 47), к формообразующим – открытую и закрытую осадку, высадку, прямое и обратное выдавливание и др. (рисунок 48).

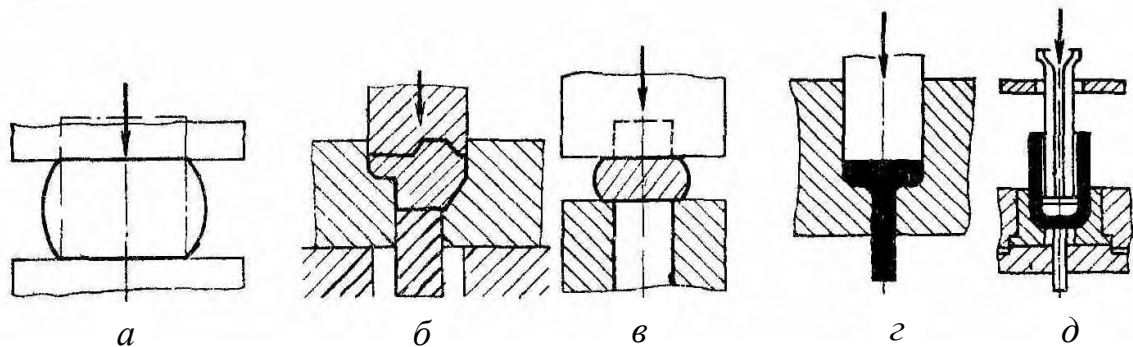


*a* – ножом; *б* – втулкой; *в* – пуансоном; 1 – нож; 2 – упор; 3 – заготовка; 4 – режущая втулка; 5 – обрезанная заготовка; 6 – пуансон; 7 – матрица; 8 – отштампованная деталь

Рисунок 47 – Разделительные операции холодной объемной штамповки

При выдавливании заготовку помещают в полость, из которой металл выдавливают в отверстия, имеющиеся в рабочем инструменте. Рабочими частями штампа являются матрица и пуансон.

При прямом выдавливании металл вытекает в отверстия, расположенные в донной части матрицы в направлении, совпадающем с направлением движения пуансона.



*a* – открытая осадка; *б* – закрытая осадка; *в* – высадка;  
*г* – прямое выдавливание; *д* – обратное выдавливание

Рисунок 48 – Формообразующие операции холодной объемной штамповки

При обратном выдавливании направление течения металла противоположно направлению движения пуансона. Наиболее часто встречается схема, при которой металла может течь в кольцевой зазор между пуансоном и матрицей. Реже применяют схему обратного выдавливания, при которой металл выдавливается в отверстия в пуансоне.

### 6.1.5 Оборудование для холодной объемной штамповки

Разделительные операции холодной объемной штамповки выполняют на прессножницах, прессах в штампах или на отрезных пресс-автоматах, формообразующие – на специальных кривошипных или гидравлических прессах и на различных холодновысадочных пресс-автоматах. Обычно на пресс-автоматах объединено выполнение разделительных и формообразующих операций.

### 6.1.6 Технологические операции при холодной объемной штамповке

Технологический процесс холодной объемной штамповки состоит из следующих операций: подготовки исходного металла (очистка от окалины и загрязнений, смазка), изготовления заготовок (отрезка, вырубка, пробивка), штамповки (осадка, высадка, выдавливание), отделки (термическая обработка, травление, нанесение покрытий, сверление отверстий, фрезерование пазов, зачистка, удаление заусенцев и т.п.). Сочетание этих операций определяется сложностью детали.

Производство поковок способом холодной объемной штамповки характеризуется выходом годного и расходным коэффициентом. Выход годного представляет собой отношение массы поковки к массе заготовки, выраженного в процентах, а расходный коэффициент является обратной величиной выходу годного. Следует отметить, что выход годного при холодной штамповке значительно выше, чем при горячей, а коэффициент использования металла доходит до единицы или равен единице, так как многие поковки, получаемые методом холодной объемной штамповки, являются готовыми изделиями.

Вместе с тем процесс холодного объемного деформирования сопровождается наклепом, что приводит к увеличению показателей прочности и снижению пластичности. Это снижает степень деформации на каждом переходе формоизменения, увеличивает число переходов, между которыми необходимо применять отжиг и травление металла.

## 6.2 Листовая штамповка

Листовая штамповка является одним из наиболее прогрессивных и высокопроизводительных способов получения деталей сложной формы с тонкими стенками. При листо-



вой штамповке изделия получают с очень малыми допусками и высоким качеством поверхности.

Листовую штамповку обычно осуществляют в холодном состоянии. Горячую листовую штамповку применяют при штамповке из листов большой толщины (для изготовления крупных поковок – котлов, цистерн, корпусов кораблей и т.д.) и при штамповке изделий из сплавов, имеющих малую пластичность в холодном состоянии.

### **6.2.1 Операции холодной листовой штамповки. Формообразование при холодной листовой штамповке**

Операции холодной листовой штамповки подразделяют на *разделительные* и *формообразующие*.

К разделительным операциям, связанным с отделением одной части материала от другой по замкнутому или незамкнутому контуру, относят отрезку, разрезку, вырубку по контуру, пробивку отверстий, обрезку и т.д. К формообразующим операциям, в процессе которых плоская или полая заготовка превращается в пространственную деталь требуемой формы без изменения толщины материала, относят гибку, вытяжку, раздачу, отбортовку и т.д.

*Отрезка* – полное отделение одной части материала от другой по незамкнутому контуру, по прямой или по кривой линии.

*Разрезка* – разделение плоски, гнутых или полых заготовок на две или несколько отдельных частей. Такую операцию приходится использовать при изготовлении несимметричных изделий. Для этого вначале штампуют симметричную заготовку, а затем ее уже разрезают на несколько несимметричных деталей. Подобная схема операций значительно упрощает процесс штамповки деталей и снижает трудоемкость изготовления штампов.

*Вырубка* – полное отделение металла по замкнутому контуру, при котором отделяемая часть заготовки является изделием.

*Пробивка* – операция, имеющая целью получение в вырубленной детали или в листе отверстия путем отделения части материала по замкнутому контуру. Отличие этой операции от вырубки состоит в том, что при вырубке часть материала, проталкиваемая пуансоном в матрицу, является деталью, а оставшаяся на матрице часть – отходом; при пробивке же, наоборот, провалившаяся через матрицу часть материала является отходом, а оставшаяся на ней – изделием.

*Обрезка* – полное отделение неровного края или лишнего металла по наружному контуру плоских, гнутых или вытянутых изделий. Схема процесса обрезки не отличается от вырубки, разница заключается лишь в конструкциях штампов.

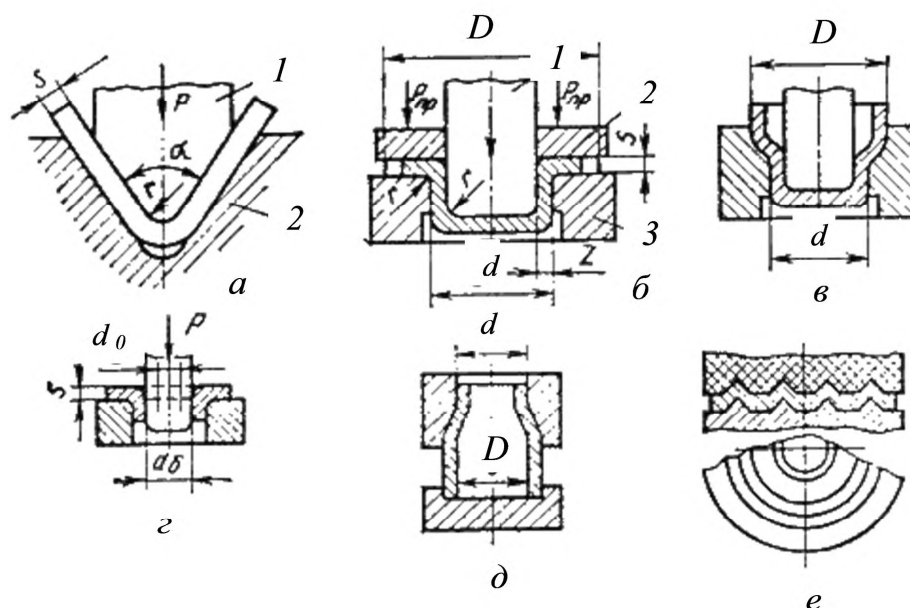
При формообразующих операциях стремятся получить заданную величину деформации, чтобы заготовка приобрела требуемую форму. Схемы формообразующих операций представлены на рисунке 49.

*Гибка* – образование угла между частями заготовки или придание заготовке криволинейной формы.

При гибке пластически деформируется только участок заготовки в зоне контакта с пуансоном (рисунок 49, а): наружные слои заготовки растягиваются, а внутренние – сжимаются. Деформация растяжения наружных слоев и сжатия внутренних увеличивается с уменьшением радиуса скругления рабочего торца пуансона, при этом возрастает вероятность образования трещин. Поэтому минимальный радиус пуансона ограничивается величиной в пределах 0,1–2,0 от толщины заготовки, в зависимости от механических свойств материала.

При снятии нагрузки растянутые слои заготовки упруго сжимаются, а сжатые – рас-

тягиваются, что приводит к изменению угла гибки  $\alpha$ , т.е. к пружинению детали. Это следует учитывать или уменьшением угла инструмента на величину пружинения, или применением в конце рабочего хода дополнительного усилия.



$a$  – гибка;  $б, в$  – вытяжка;  $г$  – отбортовка;  $д$  – обжим;  $е$  – рельефная формовка:  
1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – матрица

Рисунок 49 – Формообразующие операции листовой штамповки

Гибку производят в штампах, а также вращающимися фигурными роликами, играющими роль матрицы, на профилегибочных станах.

*Вытяжка* – образование полого изделия из плоской или полой заготовки (рисунок 49, б).

Вырубленную заготовку укладывают на плоскость матрицы. Пуансон надавливает на заготовку и она, смещаясь в отверстие матрицы, образует стенки вытянутой детали.

Формоизменение при вытяжке оценивают коэффициентом вытяжки

$$k_e = \frac{D}{d}, \quad (72)$$

где  $k_e$  – коэффициент вытяжки;

$D$  – диаметр заготовки, мм;

$d$  – диаметр изделия, мм.

Коэффициент вытяжки в зависимости от механических характеристик металла и условий вытяжки не должен превышать 2,1.

При  $D - d > (18-20)S$ , где  $S$  – толщина заготовки, возможны потеря устойчивости фланца и образование складок при вытяжке. Их предотвращают прижимом фланца заготовки к матрице с определенным усилием.

Высокие детали малого диаметра получают за несколько операций вытяжки с постепенным уменьшением диаметра полуфабриката и увеличением его высоты (рисунок 49, в). При последующих переходах для предотвращения разрушения металла принимают коэффициент вытяжки равным 1,2–1,4.

Промежуточный отжиг для устранения наклепа позволяет увеличить коэффициент вытяжки до 1,4–1,6.

Опасность разрушения заготовок устраняют применением смазочных материалов

для уменьшения сил трения между поверхностями заготовок и инструмента.

*Отбортовка* – получение борта путем вдавливания центральной части заготовки с предварительно пробитым отверстием в матрицу (рисунок 49, з).

Формоизменение оценивают коэффициентом отбортовки

$$k_o = \frac{d_6}{d_0} < 1,8, \quad (73)$$

где  $k_o$  – коэффициент отбортовки;  $d_6$  – диаметр борта, мм;  $d_0$  – диаметр отверстия в заготовке, мм.

Коэффициент отбортовки зависит от механических характеристик металла заготовки и ее относительной толщины, т.е. от  $\frac{S}{d_0}$ . Большое увеличение диаметра можно получить, если заготовку отжечь перед отбортовкой или изготовить отверстие резанием, создающим меньшее упрочнение у края отверстия.

Отбортовку применяют для изготовления кольцевых деталей с фланцами и для образования уступов в деталях для нарезания резьбы, сварки, а также для увеличения жесткости конструкции при малой массе.

Выделяется отбортовка наружного контура – образование невысоких бортов по наружному криволинейному краю заготовки.

*Обжим* – уменьшение периметра поперечного сечения концевой части полый заготовки. Производится заталкиванием заготовки в сужающуюся полость матрицы (рисунок 48, д). Для большего формоизменения выполняют несколько последовательных операций обжима.

*Раздача* – увеличение периметра поперечного сечения концевой части полый заготовки коническим пуансоном; это операция противоположная обжиму.

*Рельефная формовка* – местное деформирование заготовки с целью образования рельефа в результате уменьшения толщины заготовки (рисунок 48, е).

Формовкой получают конструкционные выступы и впадины, ребра жесткости, лабиринтные уплотнения.

Штампы для листовой штамповки делятся по технологическому признаку в зависимости от выполняемой операции: вырубные, гибочные, вытяжные и т.д. В зависимости от числа выполняемых операций различают одно- и многооперационные штампы. Многооперационные штампы бывают последовательного действия, в которых операции выполняются последовательно при перемещении заготовки по нескольким рабочим позициям штампа, и совмещенного действия, в которых операции выполняются на одной позиции, например, одновременно вырубка и пробивка, вырубка и вытяжка и т.д.

## 6.2.2 Оборудование для холодной листовой штамповки

Основным оборудованием при листовой штамповке являются прессы.

Прессы по принципу действия разделяют на механические, гидравлические, электромагнитные и пневматические. Для холодной листовой штамповки из механических прессов наиболее часто применяют кривошипные прессы.

По технологическому признаку приводные механические прессы бывают простого, двойного и тройного действия, прессы – автоматы, чеканочные, многопозиционные и др. прессы простого действия имеют один движущийся ползун, они применяются для вырезки, пробивки, гибки, формовки, неглубокой вытяжки и др. операций. Прессы двойного

действия имеют два независимо движущихся ползуна: наружный для прижима заготовки и внутренний для глубокой вытяжки. Прессы тройного действия имеют два верхних ползуна и один нижний, эти прессы применяются для штамповки некоторых деталей кузова автомобиля.

Процессы листовой штамповки подвергают механизации и автоматизации. При механизации механизмами выполняются отдельные операции, такие как подача заготовок в полость штампа, выталкивание детали из штампа, передача заготовки из одной позиции в другую с помощью крюковых, шибберных, грейферных и др. механизмов, а для удаления отштампованных деталей используют различные выталкиватели или сбрасыватели – пружинные, механические руки.

Для подачи штучных заготовок в штамп и удаления отштампованных деталей применяют промышленные роботы. Роботами оснащаются автоматические линии листовой штамповки.

### **6.2.3 Технологические операции при холодной листовой штамповке**

Выбор рационального технологического процесса листовой штамповки зависит от количества изготавливаемых деталей, формы детали, заданной точности изготовления и качества поверхности.

Для изготовления плоских деталей невысокой точности обычно предусматривают вырубку и пробивку, а для этих же деталей, но высокой точности предусматривают дополнительную зачистку, правку и другие операции. При изготовлении пространственных тонкостенных деталей высокой точности применяют операции вырубки, формовку, правку и т.д.

В общем случае при изготовлении любых деталей технологический процесс включает следующие операции: подготовку исходного материала (очистку, смазку и т.д.), получение заготовок (резкой, вырубкой, пробивкой), формоизменение заготовок (гибкой, вытяжкой, формовкой), термическую обработку (перед штамповкой, если структура и механические свойства металла не удовлетворительны; для снятия наклепа – после нескольких операций формоизменения; и после окончания штамповки – для получения заданной структуры и свойств), отделку (травление, полирование, нанесение покрытий).

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается сущность объемной штамповки?
2. Какие штампы применяются при горячей объемной штамповке?
3. Какое оборудование используется при горячей объемной штамповке?
4. Каким образом производят обрезку облоя после штамповки в открытых штампах?
5. Какова сущность штамповки жидкого металла?
6. Перечислите основные операции холодной объемной штамповки.
7. Чем обуславливается более высокий выход годного при холодной объемной штамповке в отличие от горячей объемной штамповки?
8. Чем отличаются операции вырубки и пробивки холодной листовой штамповки?
9. С какой целью применяется отбортовка?
10. Перечислите основные технологические операции холодной листовой штамповки.

## 7 Специальные процессы обработки металлов давлением

В машиностроении и металлообработке находят все более широкое применение такие прогрессивные процессы обработки металлов давлением, при которых обеспечивается значительная экономия металла благодаря рациональному построению профиля, максимальному приближению формы и размеров заготовки к размерам готовых деталей. К ним относят производство гнутых профилей, периодического проката, железнодорожных и зубчатых колес, шаров и др.

### 7.1 Производство гнутых профилей

Тонкостенные гнутые профили находят широкое применение в автотракторной промышленности, машиностроении, строительном производстве и в других отраслях промышленности. По сравнению с горячекатаными гнутые профили имеют ряд преимуществ: их можно изготавливать весьма малой толщиной (до 0,5 мм) и сложной конфигурации, в том числе замкнутые (рисунок 14). Благодаря рациональной форме поперечного сечения, гнутые профили позволяют уменьшить массу конструкции без снижения прочности и получить значительную экономию металла.

Тонкостенные гнутые профили изготавливают из углеродистых и низколегированных сталей, цветных сплавов на профилегибочных агрегатах.

Исходным материалом для производства гнутых профилей служат горячекатаные и холоднокатаные листы, полосы и ленты толщиной 0,5 – 10 мм и шириной до 2000 мм. При профилировании можно использовать листы и полосы оцинкованные, луженные и покрытые пластиком.

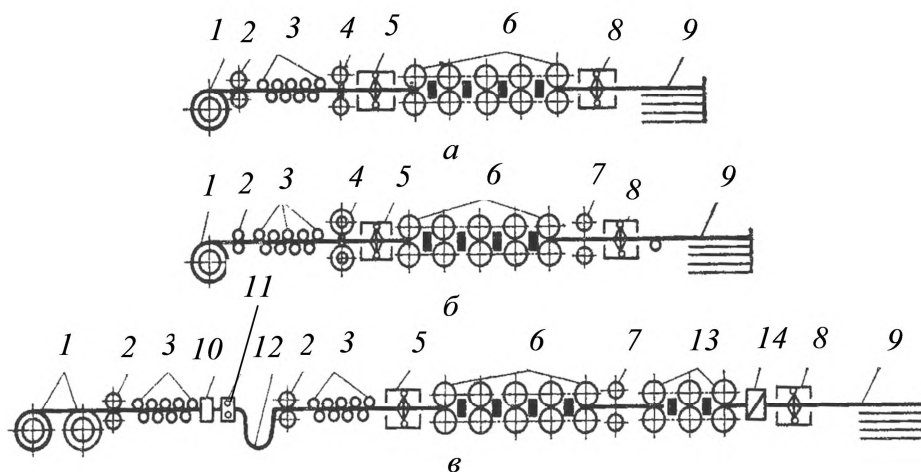
Гнутые профили получают путем холодной гибки исходного материала на агрегатах периодического или непрерывного действия. Современные агрегаты непрерывного действия представляют собой ряд последовательно расположенных клеток с приводными роликами (рисунок 50). Эти агрегаты выполняют четырех типов:

1) поточные агрегаты для поштучного профилирования (рисунок 50, *а*). Полоса в рулоне поступает на разматыватель, задается передним концом в тянущие ролики и направляется в правильную машину. После разрезки на летучих ножницах на длины готовых профилей и смазки в промасливающей машине, листы задаются в ролики первой клетки собственно непрерывного профилегибочного стана. По выходе из первой клетки передний конец листа поступает во вторую и последующие клетки, постепенно изгибаясь до заданной формы и размеров. По выходе из последней клетки стана профили промасливаются и укладываются в пачки.

2) поточные агрегаты с комбинированным (непрерывным и поштучным) процессом профилирования листов, полос и лент (рисунок 50, *б*). Полоса в рулоне поступает на разматыватель, где она разматывается, задается в тянущие ролики, далее в правильную машину и после промасливания поступает к непрерывному формовочному стану и далее готовые профили разрезаются летучими ножницами с профильными ножами на мерные длины. После промасливания листы укладываются в пачки. Для получения тяжелых профилей используются отдельные листы или полосы, разрезаемые летучими ножницами, установленными перед формовочным станом.

3) поточные агрегаты с непрерывным процессом профилирования бесконечной полосы, получаемой путем сварки в стык концов отдельных рулонов и последующей резки готовых профилей на мерные длины (рисунок 50, *в*). В составе технологического оборудования агрегата до формовочного стана имеется: два разматывателя рулонов, тянущие ролики, правильная машина, гильотинные ножницы для обрезки переднего и заднего концов

рулона, стыкосварочная машина, вторая правильная машина и промасливающая машина. За формовочным станом установлены летучие ножницы с профильными ножами для резки готовых профилей на мерные длины, а также промасливающая машина и укладчик готовых профилей.



*а* – с поштучным процессом профилирования; *б* – с комбинированным процессом профилирования; *в* – с непрерывным процессом профилирования: 1 – разматыватель; 2 – тянущие ролики; 3 – правильная машина; 4 – летучие ножницы; 5 – промасливающая машина; 6 – формовочный стан; 7 – летучие ножницы с профильными ножами; 8 – промасливающая машина; 9 – укладчик; 10 – гильотинные ножницы для обрезки переднего и заднего концов; 11 – стыкосварочная машина; 12 – петлеобразователь; 13 – калибровочные клетки; 14 – летучая пила

Рисунок 50 – Технологические схемы профилирующих агрегатов

4) поточные агрегаты с порулонным процессом профилирования, когда технология непрерывного процесса реализуется в пределах одного рулона, операция сварки рулонов отсутствует, а порезка готового профиля производится летучими ножницами, установленными за формовочным станом.

Технологический процесс профилирования состоит в подготовке металла к профильной гибке, собственно профилировании, и отделки получаемых изделий.

## 7.2 Производство периодического проката

Периодическим профилем, получаемым продольной прокаткой, называют прокат, состоящий из повторяющихся, последовательно расположенных участков по длине полосы различного периодического сечения.

Расстояние между одинаковыми по форме и положению сечениями на двух последовательно расположенных участках называется длиной периода профиля.

Периодические профили используются, как фасонные заготовки для дальнейшей горячей штамповки, либо как готовые профили.

Применение периодических профилей позволяет сократить расход металла на 15–40 % и увеличить производительность штамповочного оборудования в 1,5–2 раза.

Исходным материалом для производства периодических профилей служит квадратный, прямоугольный, круглый или фасонный прокат, полученный в черновых и предчистовых клетях стана, на котором осуществляется прокатка периодического профиля. Прокатку предчистовой заготовки требуемой формы и размеров производят на станах любых

типов, а периодический профиль прокатывают за один проход в обычных чистовых или специальных клетях повышенной жесткости, оборудованных устройствами для совмещения периодов валков.

При продольной периодической прокатке получают профили с односторонним периодом, с двухсторонним совпадающим периодом, с несовпадающим верхним и нижним периодом. Окончательную форму изделию придают за один проход. Длина периода профиля определяется длиной окружности валка. При каждом обороте валков из них должен выходить отрезок полосы с целым числом периодов, поэтому наибольшая длина периода не может быть больше длины окружности валков.

Поперечная прокатка периодических профилей характеризуется тем, что заготовка и готовый профиль представляют собой тела вращения. Схема прокатки на трехвалковом стане представлена на рисунке 51.

Прокатка осуществляется дисковыми или коническими валками, расположенными под углом  $120^{\circ}$  друг к другу. Валки могут быть установлены с некоторым перекосом. Способ заключается в том, что три приводных валка вращают заготовку, которая принудительно перемещается в осевом направлении со значительным натяжением. Гидравлическое устройство перемещает зажимной патрон вместе с металлом в направлении рабочего хода. Во время прокатки валки сближаются и разводятся на требуемый размер гидравлической следящей системой в соответствии с заданным профилем копировальной линейки или системой ЧПУ по заранее заданной программе. Переход от одного профиля к другому осуществляется без замены валков, только за счет смены копира или программы.

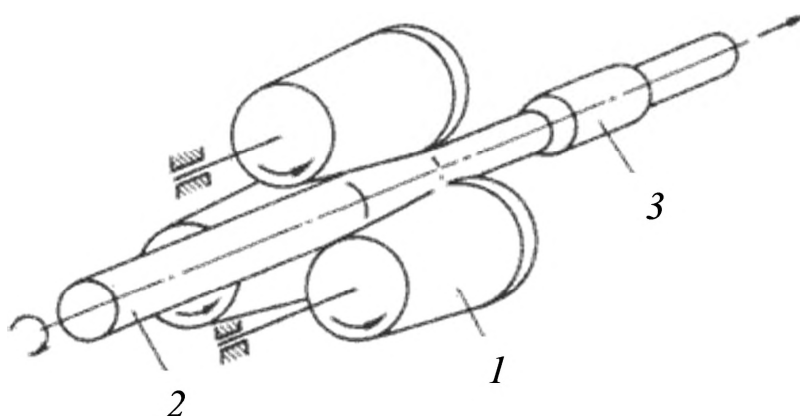


Рисунок 51 – Схема прокатки периодического профиля на трехвалковом стане

Технология производства периодических профилей включает следующие операции: подготовку исходной заготовки к прокатке (удаление поверхностных дефектов), нагрев до заданной температуры, прокатку заготовок с целью получения подката заданной формы и размеров постоянного сечения по длине, подачу подката в чистовую клеть периодической прокатки и прокатку в ней, отделку готового профиля (резка, правка, контроль качества).

### 7.3 Производство железнодорожных колес

Колеса в процессе эксплуатации испытывают ряд физико-механических воздействий, например, в местах стыка рельсов при движении вагонов колеса подвергаются значительным динамическим воздействиям. Одновременно между контактными поверхностями колеса и рельса проявляется трение-скольжение. Колеса работают при знакопеременных температурных условиях.

Эти основные факторы обуславливают определенный технологический процесс производства колес.

Производство колес для железнодорожного транспорта является комбинированным процессом обработки металлов давлением, включающим ковку и прокатку.

Исходным материалом для изготовления цельнокатаных колес служат слитки многогранного сечения, вес которых выбирают таким образом, чтобы из одного слитка можно было изготовить несколько колес.

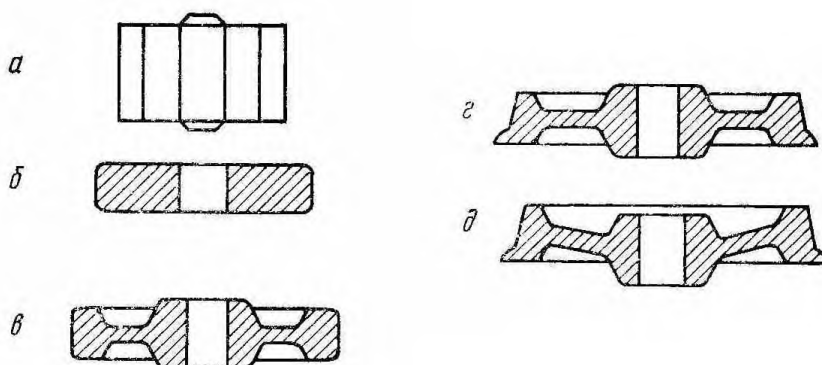
Последовательность операций изготовления колес следующая (рисунок 52).

Мартеновские слитки двенадцатигранного сечения весом 3–5 т поступают в пролет склада слитков, где их осматривают и в случае необходимости зачищают. Затем производят нарезку слитка и разделение его на части. После взвешивания слитки нагревают. Нагретую заготовку вынимают из печи и подают ее в окалиноломатель для сбивки окалины с торцов заготовки. Затем передают на пресс для предварительной осадки с целью удаления окалины с боковых поверхностей заготовки, после чего производится осадка в кольцо и прошивка отверстия в центре заготовки. Прошитую заготовку транспортируют к другому прессу, где штампуют ступицу, диск и грубые контуры обода. Операция выполняется за один ход пресса.

Колесная заготовка, полученная на штамповочном прессе, поступает на колесопрокатный стан, на котором производится раскатка диска, прилегающего к ободу, раскатка обода, а также выкатка гребня на ободу колеса.

Прокатанное колесо передают на третий пресс, где производится выгибка диска колеса, калибровка обода и горячее клеймение всех знаков на колесе.

После пресса колеса передают к печам с целью предупреждения образования флокенов. Затем осуществляют закалку и отпуск.



*a* – резка и ломка холодных слитков на заготовки со взвешиванием и рассортировкой последних по весовым группам; *б* – обжатие (осадка) и прошивка отверстия в заготовке на прессе; *в* – формовка заготовки в колесо на прессе; *г* – раскатка заготовки в колесо; *д* – калибровка колес и выгибка диска на прессе

Рисунок 52 – Операции при производстве железнодорожных колес

#### 7.4 Производство зубчатых колес

Раньше зубчатые колеса получали путем механической обработки. Такой способ характеризовался большими отходами металла в стружку и недостаточной производительностью. В настоящее время разработан метод изготовления зубчатых колес прокаткой нагретой заготовки в специально профилированных зубчатых валках. Этот способ обеспечивает увеличение производительности, повышение механической прочности и снижение расхода металла.

Накатка зубчатых колес методом прокатки происходит путем пластического дефор-



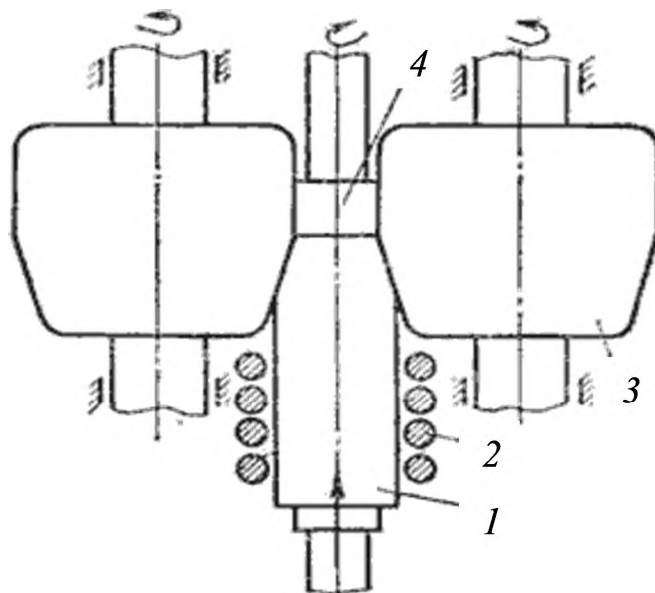
мирования поверхностного слоя нагретого металла, волокна которого изгибаются по конфигурации зубьев. Металл при этом уплотняется и получает поверхностный наклеп, обеспечивающий повышенную прочность и твердость.

Основными преимуществами прокатки зубчатых колес являются экономия металла, улучшение структуры металла, повышение прочности и твердости, более высокая износостойкость.

Технологический процесс прокатки зубчатых колес включает следующие операции: подготовку исходного материала, нагрев, горячую прокатку, термическую обработку.

Возможны два способа обработки зубьев: с осевой подачей обрабатываемой заготовки (прутковая прокатка) и прокатка с радиальной подачей валков (штучная прокатка). Прутковая прокатка шестерен (рисунок 53) применяется для обработки прямозубых и косозубых шестерен с небольшими модулями (до 6 мм) и диаметром до 200 мм. Образование зубьев при прокатке осуществляется перемещением нагретой в кольцевом индукторе заготовки между двумя вращающимися зубчатыми валками, модуль которых равен модулю прокатываемой шестерни.

В начале прокатки заготовка приводится во вращение дополнительным зубчатым колесом, находящимся в зацеплении с валками. После выхода из зацепления шестерня вращается валками.



1 – заготовка; 2 – кольцевой индуктор; 3 – зубчатые валки; 4 – шестерня  
Рисунок 53 – Схема прокатки шестерни с осевой подачей заготовки

Способ прокатки шестерен с осевой подачей заготовки может осуществляться также двумя различными путями:

- в качестве заготовки используется плоский диск;
- прокатка ведется из круглой длинной заготовки или из заготовок, сложенных стопой. После прокатки и охлаждения зубчатый цилиндр разрезается на отдельные шестерни.

## 7.5 Производство шаров

Раньше шары, ролики, кольца изготавливали штамповкой или механической обработкой с большими отходами металла в стружку. В настоящее время эти изделия получают методом поперечно – винтовой прокатки. Этот способ отличается высокой производи-

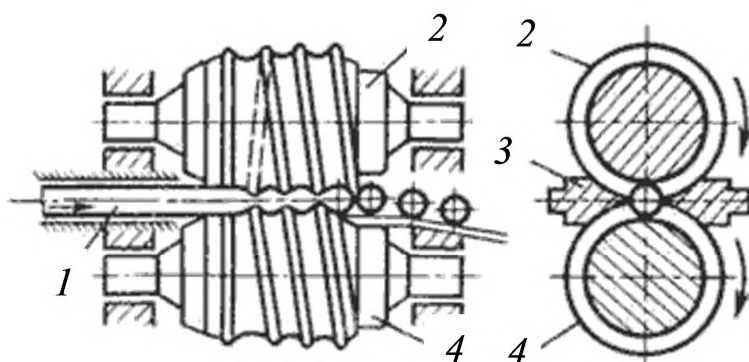
тельностью, точностью размеров и позволяет значительно сэкономить расход металла. Это существенно снижает себестоимость изготовления ряда массовых деталей.

Сущность поперечно-винтовой прокатки состоит в том, что процесс пластической деформации круглой заготовки осуществляется между двумя или тремя вращающимися в одном направлении валками, на бочках которых нарезаны винтовые ручьи. Профиль и размеры ручьев соответствует профилю и размерам прокатываемой детали.

Поперечно-винтовая прокатка на двухвалковых станах разработана применительно к производству шаров для шаровых мельниц, шариков для подшипников.

Исходным материалом для производства шаров и роликов подшипников служат круглые горячекатаные штанги из стали ШХ15 диаметром, приблизительно равным диаметру шара или ролика. Для прокатки подшипниковых колец – трубная заготовка из той же стали, для прокатки шаров для шаровых мельниц – круглые штанги из углеродистой конструкционной стали.

Перед прокаткой штанги нагреваются в индукторе и подаются в валки. Передний конец штанги захватывается винтовыми ручьями валков, и заготовка, вращаясь, продвигается по оси калибра (рисунок 54). По мере продвижения заготовка приобретает форму шара. За каждый оборот валков прокатывается один шар, поэтому производительность стана определяется окружной скоростью вращения валков.



1 – заготовка; 2, 4 – валки; 3 – центрирующие упоры  
Рисунок 54 – Схема прокатки шаров

Шарики диаметром 1 – 4 мм, а иногда и более прокатывают в холодном состоянии. Готовые шары проходят операции отделки.

### Контрольные вопросы

1. Перечислите основные преимущества гнутых профилей.
2. Какие станы используются для производства гнутых профилей?
3. Дайте определение периодическому прокату.
4. Какова технология производства периодического проката?
5. Перечислите основные технологические операции при производстве железнодорожных колес?
6. Какими способами возможно получение шестерен?
7. Что является исходной заготовкой при производстве катаных шаров?
8. Какое оборудование применяется для прокатки шаров?

### Список использованных источников

1. Бахтинов В.Б. Технология прокатного производства. – М.: Металлургия, 1983.
2. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1978.
3. Зотов В.Ф. Производство проката. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000.
4. Кузнецов Е.В., Галкин С.П. Технологические процессы обработки металлов давлением. – М.: МИСиС, 2002.
5. Материаловедение и технология конструкционных материалов. / В.Т. Жадан, П.И. Полухин, А.Ф. Нестеров и др., – М.: Металлургия, 1994.
6. Обработка металлов давлением / Ю.Ф. Шевакин, В.Н. Чернышев, Р.Л. Шаталов, Н.А. Мочалов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005.
7. Суворов И.К. Обработка металлов давлением. М.: Высшая школа, 1980.

КУНИЦИНА НАТАЛЬЯ ГЕННАДЬЕВНА

**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЦЕССОВ  
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Учебное пособие  
по дисциплинам «Обработка металлов давлением»,  
«Технологии процессов обработки металлов давлением»  
для студентов направлений подготовки  
22.03.02 «Металлургия», 38.03.01 «Экономика»  
всех форм обучения

Подписано в печать 16.12.2015		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег.№ 77	Печать офсетная Тираж 30 экз.	Уч.-изд.л. 6,25

ФГАОУ ВПО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: [nfmisis@yandex.ru](mailto:nfmisis@yandex.ru)

Контактный тел. 8 (3537) 679729.