

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.Н. САМОХВАЛОВ

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.04.01 Ракетные комплексы и космонавтика, 22.14.00 Управление качеством

© Самарский университет, 2019

ISBN 978-5-7883-1424-2

САМАРА
Издательство Самарского университета
2019

УДК 621.77(075)
ББК 34.5я7
С177

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Л. В. К у д ю р о в,
д-р техн. наук, проф. В. А. М и х е е в

Самохвалов, Владимир Николаевич

С177 Научные основы технологических процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие / *В.Н. Самохвалов.* – Электрон. текст. и граф. дан. (3,5 Мб). – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019. – 1 опт. компакт-диск (CD-ROM). – Систем. требования: PC, процессор Pentium, 160 МГц ; оперативная память 32 Мб ; на винчестере 16 Мб ; Microsoft Windows XP/Vista/7; разрешение экрана 1024x768 с глубиной цвета 16 бит; DVD-ROM2-х и выше, мышь; Adobe Acrobat Reader. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-7883-1424-2

Рассмотрены физические основы обработки металлов давлением, строение металлов, типы и роль дислокаций в процессе деформирования металлов. Дано понятие о сопротивлении деформации и изложены основные законы деформации. Рассмотрено изменение механических характеристик металлов при пластической деформации, виды деформации, факторы, влияющие на пластичность металлов и сплавов, роль и параметры нагрева в технологических процессах обработки давлением. Показана роль трения при обработке металлов давлением, виды и законы трения. Приведена связь между напряжениями и деформациями, даны условия пластичности. Рассмотрены основы технологических процессов обработки металлов давлением: прокатного, волочильного, прессового и заготовительно-штамповочного производства. Изложены основы специальных методов обработки металлов давлением.

УДК 621.77(075)
ББК 34.5я7

Редактор Н.С. Куприянова

Компьютерная верстка И.И. Спиридоновой

Подписано для тиражирования 10.10.2019.

Объем издания 3,5 Мб.

Количество носителей 1 диск.

Тираж 10 дисков.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

Изд-во Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. Физические основы обработки металлов давлением	8
1.1. Строение металлов. Типы дислокаций	9
1.2. Основные законы пластической деформации.....	18
2. Изменение механических характеристик металлов при пластической деформации	30
2.1. Виды деформации при обработке давлением	35
2.2. Пластичность металлов и факторы, влияющие на нее.....	37
3. Нагрев металлов в технологических процессах обработки давлением	49
3.1. Температурный интервал обработки металлов давлением. Скорость и время нагрева	50
3.2. Нагревательные устройства.....	55
3.3. Борьба с окислением и обезуглероживанием металла при нагреве ..	58
4. Внешнее трение при обработке металлов давлением	61
4.1. Роль трения при обработке металлов давлением.....	61
4.2. Виды трения. Законы трения.....	63
4.3. Влияние различных факторов на коэффициент (показатель) трения	67
5. Сопротивление металлов пластической деформации	69
5.1. Связь между напряжениями и деформациями.....	71
5.2. Условия пластичности	72
5.3. Сопротивление деформации при холодной и горячей обработке.....	73
6. Основы технологических процессов обработки давлением	76
6.1. Научные основы технологических процессов прокатки.....	76
6.1.1. Геометрия очага деформации при прокатке.....	78
6.1.2. Способы прокатки	82

6.1.3. Технологический процесс прокатки.....	83
6.2. Научные основы технологических процессов прессования	90
6.2.1. Течение металла при прессовании.....	91
6.2.2. Силовые условия процесса прессования	96
6.2.3. Оборудование и инструмент для прессования.....	98
6.2.4. Технологические особенности разных видов прессования	99
6.2.5. Технологический процесс прессования	105
6.3. Научные основы технологических процессов волочения.....	108
6.3.1. Инструмент и основные параметры процесса волочения	109
6.3.2. Влияние различных факторов на силу и напряжение волочения.....	113
6.3.3. Технологические операции при волочении	118
6.4. Научные основы технологических процессов заготовительно- штамповочного производства	119
6.4.1. Ковка	119
6.4.2. Объемная штамповка.....	125
6.4.3. Специальные методы обработки металлов давлением	134
 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	 142
 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	 148

ВВЕДЕНИЕ

Целью раздела «Технологические процессы обработки металлов давлением» дисциплины «Научные основы технологических процессов» является изучение и освоение современных представлений о физических основах технологических процессов обработки металлов давлением и их взаимосвязи с технологическим обеспечением качества деталей летательных аппаратов (ЛА).

Технологические процессы обработки металлов давлением являются одним из этапов в процессе производства изделий ракетно-космической техники. Их назначение заключается в изменении геометрической формы и размеров заготовок с целью придания определенных механических и физических свойств. Выбор технологического процесса обработки металлов для получения изделий с требуемыми физико-химическими и эксплуатационными свойствами определяется технико-экономическими соображениями применительно к конкретным условиям производства.

Научные основы технологических процессов обработки металлов давлением включают:

- основные законы и принципы, на которых базируется поведение металлов при пластической деформации;
- термические и механические условия, при которых обеспечиваются наиболее оптимальные режимы пластической деформации металлов и сплавов;
- характер формоизменения заготовок при различных операциях с учетом влияния контактного трения и возникающей при этом неоднородности деформации;
- влияние параметров обработки на механические и физические свойства металлов с целью получения бездефектной продукции и достижения ее наилучших эксплуатационных показателей.

Задачи раздела дисциплины:

- Изучение основных представлений и понятий о технологическом процессе производства заготовок и деталей ЛА методами обработки давлением, методах его разработки, совершенствования и обеспечения качества изделий.

– Изучение структуры и физических основ технологических методов производства деталей ЛА обработкой давлением.

– Изучение основных физических процессов при обработке металлов давлением, протекающих в материалах при воздействии на них технологических факторов, и их влияния на эксплуатационные свойства материалов и качество изделий.

После освоения данного раздела курса обучающийся должен знать:

– основные начальные понятия о технологическом процессе производства заготовок и деталей ЛА обработкой давлением, средствах его технологического оснащения; методах его разработки и совершенствования;

– основные технологические методы производства заготовок и деталей ЛА, их структурные составляющие и физические основы этих методов;

– основные физические процессы, протекающие при технологическом воздействии высоких давлений на материалы;

– влияние физического механизма основных технологических методов обработки давлением на свойства материалов и качество изделий.

Магистр данного профиля должен уметь:

– проводить анализ влияния основных технологических методов обработки давлением на свойства изготавливаемых изделий;

– оценивать влияние технологических факторов и физических процессов, протекающих при реализации технологических методов обработки давлением, на свойства материалов;

– выбирать технологические методы обработки давлением для повышения ресурса и надежности деталей ЛА.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Обработкой давлением называются процессы получения заготовок или деталей машин силовым воздействием инструмента на исходную заготовку из исходного материала.

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.

Теория обработки металлов давлением рассматривает и изучает:

- термические и механические условия, при которых обеспечивается возможность наибольшего формоизменения металла, что необходимо для установления оптимальных режимов технологических процессов;

- влияние обработки давлением на механические и физические свойства металлов в целях получения лучших эксплуатационных характеристик заготовок и деталей;

- характер формоизменения заготовок при различных операциях в целях отыскания наиболее благоприятных соотношений между размерами и формой исходных заготовок и деталей, получаемых после обработки;

- сопротивление металла деформациям при операциях обработки, т.е. распределение напряжений, необходимые усилия и работы для осуществления этих операций в целях правильного выбора оборудования и прочностного расчета рабочего инструмента.

Основной базой для теории обработки металлов давлением является:

1. Физика процесса деформации металла. Это направление изучает экспериментально и теоретически механизм деформи-

рования металла, устанавливает влияние различных факторов на этот процесс: температуры, степени и скорости деформации и вида напряженного состояния, а также устанавливает условия, при которых металл переходит из состояния упругого в состояние пластическое.

2. Физико-химия процесса деформации, рассматривающая связь деформации с химическим составом и фазовым состоянием металла.

3. Механика деформации, математически разрабатывающая вопросы напряженного и деформированного состояния, величины и распределения напряжений и деформаций в деформируемом теле, анализирующая условия перехода тела в пластическое состояние.

1.1. Строение металлов. Типы дислокаций

В твердых телах существуют достаточно большие силы взаимосвязи атомов. Приложение внешних сил к твердому телу вызывает изменение его формы и размеров, что сопровождается изменением расстояния между отдельными материальными точками, составляющими данное тело, или же изменением размеров и формы элементарных объемов, на которые можно разделить рассматриваемое твердое тело.

Все металлы и их сплавы имеют кристаллическое строение, которое характеризуется в целом закономерным периодичным расположением атомов в пространстве. Кристаллизация металлов, т.е. образование кристаллической структуры, происходит при переходе металла из жидкого состояния в твердое. Сначала образуются центры кристаллизации – элементарные кристаллы, к ним присоединяются из жидкого металла атомы, создавая кристаллообразование с одинаковой ориентировкой кристаллографических осей, т.е. зерно.

Расположение атомов в кристалле изображают в виде пространственных схем – элементарных кристаллических ячеек. Элементарная ячейка – это наименьшее количество атомов, которое при многократном повторении в пространстве образует кристаллическую решетку. Каждому металлу при определенной температуре и давлении свойственно характерное строение кристаллической решетки.

Кристаллическая решетка – это воображаемая пространственная сетка, состоящая из элементарных ячеек, в узлах которой располагаются атомы. Существует 14 типов кристаллических решеток. Основными являются:

1. Кубическая. У кубической кристаллической решетки существует несколько разновидностей: простая кубическая, кубическая объемно-центрированная (ОЦК), кубическая гранецентрированная (ГЦК) (рис. 1.1).

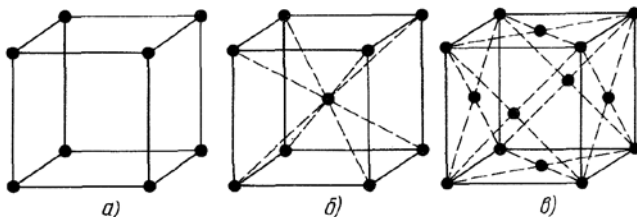


Рис. 1.1. Виды кубических кристаллических решеток:
 а – простая; б – кубическая объемно-центрированная;
 в – кубическая гранецентрированная

В ячейке ОЦК атомы располагаются в вершинах и центре куба, она содержит 9 атомов и характерна для таких металлов: α Fe, Cr, W, Mo, Li, V. В ячейке ГЦК атомы находятся в вершинах куба и на пересечениях диагоналей каждой плоскости, она содержит 14 атомов и характерна для таких металлов: γ Fe, Al, Cu, Co, Pb.

2. Гексагональная (рис. 1.2). В ячейке гексагональной кристаллической решетки атомы располагаются в вершинах и центре шестигранных оснований призм, а три атома – в средней ее плоскости, такая ячейка содержит 17 атомов. Гексагональную плотно упакованную (ГПУ) решетку с отношением высоты шестигранной призмы к стороне основания, равным 1,633, имеют цинк, магний, титан, бериллий и др.

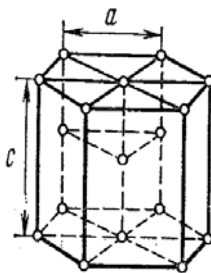


Рис. 1.2. Гексагональная кристаллическая решетка

Изображение кристаллической структуры металла вместо реальных атомов безразмерными точками и пренебрежение при ее построении влиянием колебаний атомов и наличием местных дефектов, всегда имеющихся в реальных кристаллах, существенно отличают изображенную структуру от действительно существующей. Это идеализированное изображение строения какого-либо металла.

При определенных условиях некоторые металлы (железо, титан, кобальт) могут перестраивать кристаллическую решетку одного вида в другой, например из ОЦК в ГЦК или даже в гексагональную. Это *поллиморфизм* – способность металла в твердом состоянии при изменении температуры перестраивать свою кристаллическую решетку.

Размер кристаллической решетки определяется расстоянием между параллельными атомными плоскостями, образующими элементарную ячейку, и называется периодом решетки, находится в пределах $0,1 \dots 0,7$ нм. Чем больше период решетки, тем менее прочен металл.

Все свойства кристаллов определяются взаимодействием атомов между собой. Но так как расстояния в кристалле между атомами и их взаимное расположение в разных кристаллографических направлениях различны, то и свойства его в разных направлениях будут неодинаковы.

Различие свойств по разным направлениям называется анизотропией. Анизотропия является характерной особенностью кристаллического строения и наиболее резко выражена в монокристалле.

Расстояния между атомами в твердых телах имеют определенную величину, зависящую от рода материала, его химического состава и температурных условий и изменяющуюся в данном теле в весьма узких пределах. Величины межатомных расстояний устанавливаются в результате силового взаимодействия между атомами.

Между атомами (рис. 1.3) действуют силы P_1 притяжения и силы отталкивания P_2 , величина межатомных расстояний a определяется условием равенства этих противодействующих сил.

Приложение системы внешних или внутренних сил к металлическому телу вызывает в нем изменения размеров (деформацию). Деформация может быть упругой и пластической.

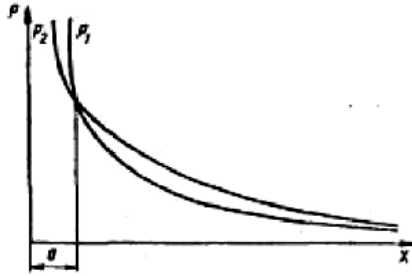


Рис.1.3. Закон изменения межатомных сил

Упругой называется деформация, которая исчезает после снятия нагрузки. При упругой деформации под действием приложенной нагрузки происходит незначительное относительное смещение атомов. После снятия нагрузки атомы, смещенные на расстояния, меньшие параметра решетки, вследствие действия сил притяжения или отталкивания возвращаются в свое первоначальное состояние (рис. 1.4, а, б).

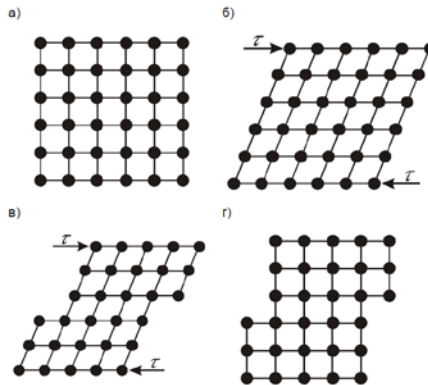


Рис. 1.4. Принципиальная схема упругой и остаточной деформации металла:
а – первоначальный ненапряженный кристалл; б – упругая деформация;
в – увеличение упругой и возникновение пластической деформации;
г – остаточная деформация

Для металлов в определенных пределах нагружения обычно существует пропорциональная зависимость между деформирующими силами (напряжениями) и смещением атомов из положений равновесия (т.е. деформациями), которая соответствует условиям упругой деформации и известна как закон Гука.

Вследствие изменения межатомных расстояний упругая деформация вызывает обратимое изменение объема. Обратимое изменение объема составляет, например, при всестороннем сжатии давлением, равным 1000 МПа, для стали ~0,6%, для меди ~1,3%.

Цель обработки давлением – создание остаточной (пластической) деформации, которая не исчезает после снятия нагрузки. Основным механизмом получения пластической деформации считается скольжение атомов относительно друг друга в кристаллической решетке, которое может быть вызвано только сдвигом.

Скольжение атомов кристаллической решетки под действием сдвигающей силы будет совершаться прежде всего в кристаллографических плоскостях с наибольшей упаковкой атомов. При сдвиге атомов в этих плоскостях требуются меньшие сдвигающие напряжения.

В основе пластического деформирования металлов лежит перемещение дислокаций практически при любых температурах и скоростях деформирования. Сущностью пластического деформирования является сдвиг, в результате которого одна часть кристалла смещается по отношению к другой части. Пластическая деформация монокристалла может происходить в основном двумя путями: скольжением и двойникованием (рис. 1.5).

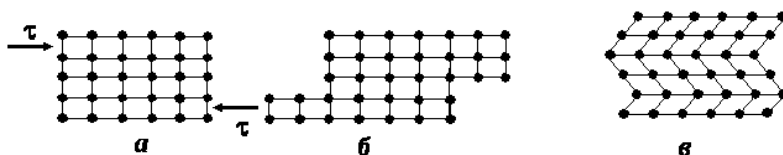


Рис. 1.5. Разновидности сдвига: а – кристаллическая решетка до деформации; б – деформация сдвига (скольжение), в – деформация сдвига (двойникование)

У металлов процесс пластической деформации в основном осуществляется путем скольжения. Скольжение представляет собой параллельное смещение тонких слоев монокристалла относительно друг друга. Движение охватывает ряд плоскостей или тончайших слоев (полосы скольжения), в промежутках между которыми элементы пластической деформации отсутствуют.

Обычно плоскостями скольжения являются плоскости с наибольшей плотностью размещения атомов, а направлениями скольжения – те направления, по которым межатомные расстояния минимальны.

В металлах с ОЦК решеткой направление плотной упаковки совпадает с направлением диагональной плоскости, а само скольжение – с направлением диагонали в этой плоскости.

В металлах с ГЦК решеткой внутри элементарной ячейки имеются четыре октаэдрических плоскости с наиболее плотной упаковкой. В каждой из этих плоскостей имеются три направления плотной упаковки. Всего в кристалле с ГЦК имеется 12 наиболее вероятных систем скольжения.

Скольжение в ГПУ кристаллах совершается в плоскостях, параллельных основанию шестигранной призмы основной ячейки. В самой плоскости скольжения имеются три направления минимального расстояния между атомами.

Повышение температуры, а следовательно и амплитуды тепловых колебаний атомов, приводит к тому, что процесс скольжения может происходить и по другим плоскостям. Сдвигающее напряжение, необходимое для начала пластической деформации скольжения для данного металла, при данной температуре и скорости деформации есть величина постоянная, не зависящая от ориентировки плоскостей скольжения относительно действующих сил.

Экспериментально установлено, что полосы скольжения отстоят одна от другой в среднем на расстоянии около 1 мкм, в то время как расстояния между соседними атомными плоскостями составляют порядка 10^{-4} мкм.

Вторым механизмом пластической деформации является двойникование, представляющее собой смещение одной части кристалла по отношению к другой с последующим поворотом частей кристалла. В результате поворота получается зеркальное отображение одной части кристалла по отношению к другой. Двойникование отличается от сдвига (скольжения) тем, что меняется положение кристаллографических плоскостей. При статическом нагружении двойникование наблюдается редко, при деформировании ударом – значительно чаще.

Процесс скольжения не является одновременным смещением всех атомов одной плоскости относительно атомов соседней, а происходит путем последовательного смещения отдельных групп атомов. Возможность относительного смещения в процессе деформации лишь части атомов, расположенных в параллельных кристаллографических плоскостях, обуславливается наличием в металле нарушений правильного кристаллического строения – дислокаций.

Существование дислокаций было подтверждено как прямыми методами исследования (с помощью ионного проектора, рентгеновской топографии, электронно-микроскопического исследования), так и косвенными методами исследования (метод ямок травления, муаровых фигур и др.).

Типы дислокаций

Основными типами дислокаций, встречающихся в реальных монокристаллах, являются краевая и винтовая дислокации.

Краевая дислокация (рис. 1.6) возникает, если по одну сторону от плоскости скольжения количество атомных плоскостей, перпендикулярных к плоскости скольжения, больше, чем по другую.

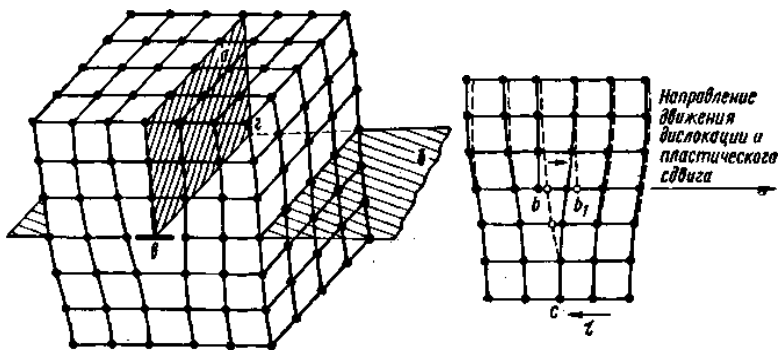


Рис. 1.6. Краевая дислокация

В области *винтовой дислокации* (рис. 1.7) кристаллографические плоскости, перпендикулярные к плоскости скольжения, получают изгиб. Схематично возникновение винтовой дислокации можно представить следующим образом: часть кристаллической решетки разрезана по плоскости скольжения и разделенные участки смещены один относительно другого на одно межатомное расстояние.

Дислокация данного типа названа винтовой вследствие того, что смещенные из положений равновесия атомы располагаются в пространстве по винтовой линии.

В реальных монокристаллах дислокации возникают в процессе кристаллизации, а также в процессе пластической деформации.

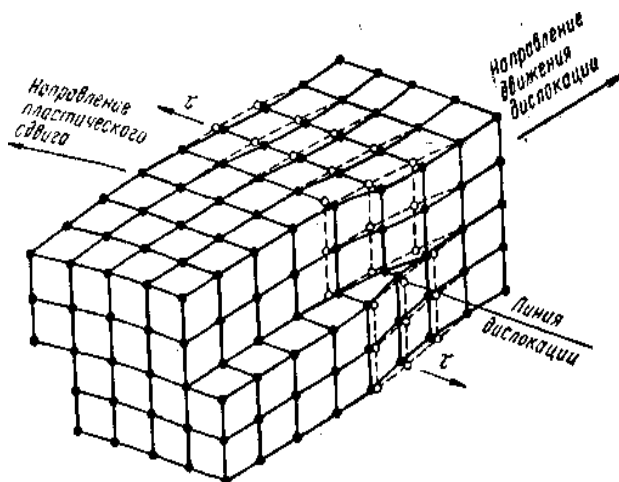


Рис. 1.7. Винтовая дислокация

Возникновение дислокаций в процессе кристаллизации связано с несовершенством условий кристаллизации: конвекционными токами, градиентами температур, действием инородных атомов и другими причинами, приводит к тому, что реальный монокристалл состоит из субзерен (блоков мозаики), имеющих сравнительно правильное кристаллическое строение, но повернутых один относительно другого.

Дислокации возникают и в процессе пластической деформации, причем хотя часть дислокаций выходит на поверхность монокристалла или взаимно уничтожается (например, слияние положительной и отрицательной краевых дислокаций), общее количество дислокаций в процессе холодной деформации увеличивается. Согласно теоретическим расчетам в хорошо отожженном металле число дислокаций составляет примерно 10^8 в 1 см^2 , а в наклепанном металле может достигать 10^{12} в 1 см^2 .

В процессе деформации пара движущихся дислокаций порождает сотни и сотни новых, в результате этого плотность дислокаций повышается, что и приводит к упрочнению (повышению предела прочности) – рис. 1.8.

Влияние плотности дислокаций на сопротивление деформированию можно представить графически (рис. 1.9).

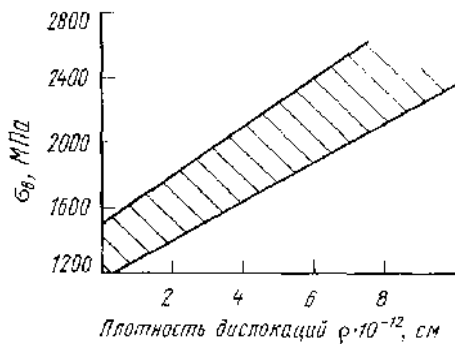


Рис. 1.8. Изменение прочности в зависимости от плотности дислокаций (высокопрочная сталь)

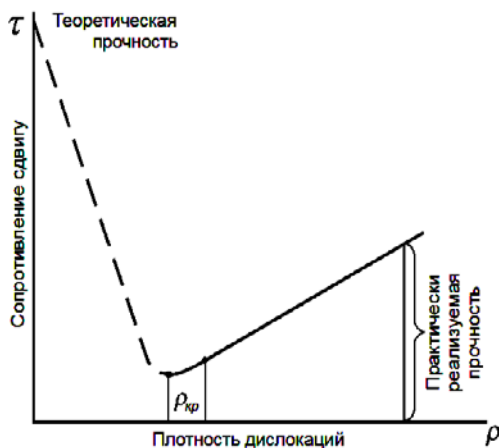


Рис. 1.9. Зависимость сопротивления сдвигу от плотности дислокаций

При низкой плотности дислокаций имеет место высокое сопротивление деформированию. Отсутствие дислокаций и других дефектов кристаллической решетки приближает механические свойства материала к теоретическим свойствам идеального кристалла.

Увеличение плотности дислокаций уменьшает сопротивление деформированию только до критического значения $\rho_{кр}$. После этого начинает преобладать взаимодействие однозначных дислокаций, что увеличивает сопротивление деформированию, т.е. начинает проявляться упрочнение металла (наклеп или нагартовка).

1.2. Основные законы пластической деформации

Процессам обработки металлов давлением присущи определенные закономерности. В теории пластической деформации принимается ряд условий, которые объединяются под общим понятием законов пластической деформации. Основными из них являются законы:

- постоянства объема;
- сдвигающих напряжений;
- наименьшего сопротивления;
- подобия.
- дополнительных напряжений.

Закон постоянства объема

Приложение внешних сил к твердому телу вызывает изменение его форм и размеров. Это сопровождается изменением расстояния между отдельными материальными точками, составляющими данное тело, а также изменением размеров и формы элементарных объемов, на которые можно разделить рассматриваемое твердое тело.

Деформация, вызванная внешними силами, исчезающая при прекращении действия внешних сил, когда твердое тело полностью восстанавливает свои исходные форму и размеры, называется упругой. Если же при прекращении действия внешних сил твердое тело полностью не восстанавливает свои исходные форму и размеры, то такая деформация называется пластической. Оба вида деформации происходят без разрушения деформируемого тела или отдельных его участков, т.е. без нарушения сплошности.

При пластической деформации тело приобретает иную форму за счет перемещения частиц металла в новое положение их устойчивого равновесия при постоянстве массы. Пластическая деформация практически не влияет на плотность металла, поэтому действует закон постоянства объема: объем тела при его пластической деформации остается неизменным. Математически условие постоянства объема можно записать в виде

$$V_i = \text{const.}$$

Это выражение является частным случаем закона сохранения массы $m = \rho V = \text{const}$, когда плотность металла ρ в процессе пластической деформации не изменяется.

Закон применяется для расчетов объема и размеров исходной заготовки, необходимой для получения поковки с заданными размерами, а также переходов и изменения размеров заготовки в процессе деформирования.

Однако в отдельных случаях обработки давлением наблюдается изменение плотности металла.

Этот закон является неточным при обработке давлением литых слитков, имеющих дефекты в виде газовых пузырей, усадочной рыхлости и раковин. При ковке таких слитков, когда ликвидируются указанные пустоты, объем слитка уменьшается на 5–7 %. Это относится, прежде всего, к начальным стадиям деформирования литых заготовок, когда устраняются неплотности, образовавшиеся в результате несовершенства процесса кристаллизации.

Например, при прокатке слитка кипящей стали на обжимном стане после первых четырех-пяти проходов плотность металла увеличивается от 6900 до 7858 кг/м³. Дальнейшая деформация происходит практически при постоянном объеме, если не принимать во внимание потери на окалину.

При холодной деформации металла вследствие внутризеренного и межзеренного скольжения, а также дробления зерен на части происходит образование микропустот; при этом плотность металла может уменьшиться на 0,1...0,2 %. Однако при последующих процессах рекристаллизации металл приобретает исходную плотность. Вследствие этого при горячей обработке давлением обеспечивается постоянство плотности металла.

Снижением объема за счет упругого уменьшения межатомных расстояний можно пренебречь. Достаточно деформированный металл характеризуется постоянством объема до и после пластической деформации.

Поскольку, кроме случаев уплотнения литого металла, плотность изменяется очень мало, допускают, что объем металла при обработке давлением остается постоянным. Уравнение постоянства обычно широко используют в расчетах изменения формы при всех процессах обработки давлением, т.к. оно позволяет связать размеры тела до пластической обработки, в момент обработки и после нее.

Например, для прямоугольного параллелепипеда, который в процессе деформации сохраняет свою форму и имеет размеры до обработки – h_0, b_0, l_0 , а после обработки – h_1, b_1, l_1 , этот закон пишется так:

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

т.е. объем тела до деформации равен объему тела после деформации.

Это соотношение можно выразить иначе:

$$\frac{h_1}{h_0} \cdot \frac{b_1}{b_0} \cdot \frac{l_1}{l_0} = 1,$$

т.е. произведение коэффициентов деформации равно единице.

Условие постоянства объема неразрывно связано с рассматриваемым в теории ОМД условием несжимаемости, согласно которому алгебраическая сумма истинных степеней деформации по трем взаимно перпендикулярным направлениям равна нулю. Истинные деформации представляют логарифм отношения размеров до и после деформации:

$$\varepsilon_b = \ln \frac{b_0}{b_1}; \varepsilon_h = \ln \frac{h_0}{h_1}; \varepsilon_l = \ln \frac{l_0}{l_1}.$$

Логарифмируя полученное уравнение, найдем:

$$\ln \frac{b_0}{b_1} + \ln \frac{h_0}{h_1} + \ln \frac{l_0}{l_1} = 0$$

или

$$\varepsilon_b + \varepsilon_h + \varepsilon_l = 0,$$

т.е. при пластической деформации алгебраическая сумма трех главных деформаций равна нулю (условие несжимаемости).

Это есть первое следствие закона постоянства объема, которое позволяет установить взаимосвязь между тремя главными деформациями.

В этом случае, по крайней мере, одна из степеней деформации имеет знак, противоположный знаку двух других. Одна из трех главных деформаций равна сумме двух других и противоположна им по знаку:

$$\varepsilon_b = -(\varepsilon_h + \varepsilon_l).$$

Условие постоянства объема позволяет решать задачи по определению размеров деформированного тела при известных размерах исходной заготовки или определять размеры заготовки для получения изделия с заданными размерами. Такие задачи обычно сводятся к определению деформаций в трех направлениях. Если при решении подобных задач две деформации известны, то третья легко находится из условия постоянства объема.

Особое значение закон постоянства объема имеет при расчете заготовок под штамповку в закрытых штампах. При ведении расчетов поковок сложной конфигурации последние разбиваются на отдельные элементы простой геометрической формы.

С использованием закона постоянства объема устанавливают взаимосвязь между скоростью движения металлов и изменениями размеров поперечного сечения деформируемой заготовки при непрерывном режиме обработки (прессование, прокатка и т.п.). На его основе формулируется закон постоянства секундных объемов: объем металла, проходящий в единицу времени через определенное сечение очага деформации, формируемого рабочим инструментом, не меняется при переходе от одного сечения к другому при непрерывном режиме обработки. Математически закон постоянства секундных объемов выражается соотношением:

$$V_i \times F_i = \text{const},$$

где V_i – средняя скорость движения металла в i -ом сечении очага деформации площадью F_i .

Закон сдвигающих напряжений

Основные закономерности деформации зерен изучают на монокристаллах. Чаще деформация кристаллов осуществляется скольжением. При скольжении отдельные части кристалла смещаются одна относительно другой по взаимно параллельным плоскостям (рис. 1.10).

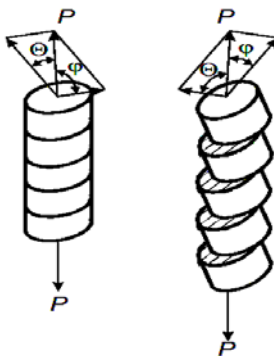


Рис. 1.10. Схема сдвиговой деформации монокристалла

Такие сдвиги не нарушают целостности кристаллической решетки. Скольжение начинается, когда сдвигающие напряжения в плос-

костях сдвига достигнут определенной величины, характерной для данного металла при данной скорости и температуре деформации, не зависящей от схемы приложения сил. Это положение известно как закон сдвигающих напряжений. На нем основано большинство методов расчета усилия при пластической деформации.

Сдвиг начинается в плоскости скольжения, где действует наибольшее сдвигающее напряжение. По мере развития деформации растяжения увеличивается угол Θ между нормалью к плоскости сдвига и направлением деформирующей силы, а угол φ между направлением сдвига и направлением деформирующей силы уменьшается. При деформации сжатия угол Θ уменьшается, а угол φ растёт. За счет этого кристалл приобретает предпочтительную ориентировку по направлению к деформирующей силе. Возникает текстура деформации.

Закон наименьшего сопротивления

При обработке металлов давлением необходимо знать соотношение между перемещениями металла в разных направлениях. Качественно направление течения металла определяют на основании принципа наименьшего сопротивления, который можно сформулировать следующим образом: в случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления.

Для практического применения закона наименьшего сопротивления необходимо знать направление траектории, по которой для точек, на ней расположенных, сопротивление течению будет наименьшим.

Для случая сжатия призматических и цилиндрических тел между параллельными плитами при наличии трения по плоскостям контакта эти траектории определяются по принципу кратчайшей нормали (рис. 1.11, а), заключающемуся в том, что перемещение любой точки тела в плоскости, перпендикулярной к направлению действия внешней силы, происходит по кратчайшей нормали к периметру сечения.

Согласно указанному принципу, прямоугольник можно разделить на два треугольника и две трапеции линиями, представляющими собой граничные линии или линии раздела сечения, поскольку длина профилей к периметру сечения по обе стороны из каждой

точки, лежащей на этих линиях, будет одинаковой. Направление движения точек показано на рис. 1.11 стрелками.

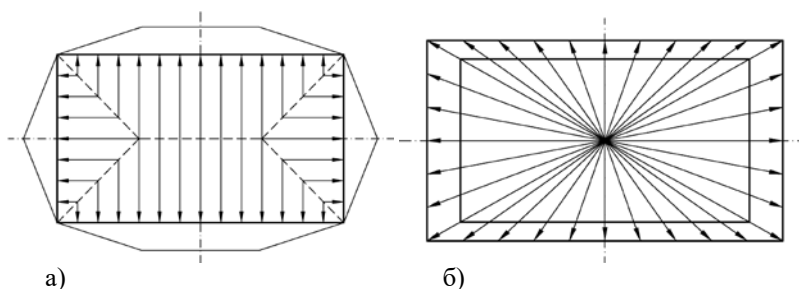


Рис. 1.11. Направление движения точек при осадке призмы с прямоугольным основанием: а – в условиях значительного трения; б – в условиях минимального трения

С учетом действия контактного трения сопротивление перемещению точек металла, расположенных на контактной поверхности, будет тем больше, чем дальше удалена точка от границ контактной поверхности, поэтому движение точек направлено к ближайшей границе. В этом случае направлением наименьшего сопротивления является кратчайшая нормаль к периметру сечения. Аналогичный характер перемещения частиц наблюдается в глубинных слоях металла, удаленных от контактной поверхности.

Действием закона наименьшего сопротивления объясняется и бочкообразование при осадке цилиндрической заготовки. Из-за наличия сил трения на поверхности контакта с инструментом, тормозящих течение металла у торца, металл быстрее течет в центральной по высоте зоне, что и ведет к бочкообразованию.

На рис. 1.12 показана схема течения металла при осадке прямоугольного параллелепипеда.

Сечение осаждаемого параллелепипеда разделяют на участки биссектрисами углов и линией, соединяющей точки пересечения биссектрис. В каждой зоне течение металла имеет одинаковое направление. Так как металл по направлению к ближайшей границе течет более интенсивно, то расстояния от центра контактной поверхности до ее границ по мере осадки постепенно выравниваются.

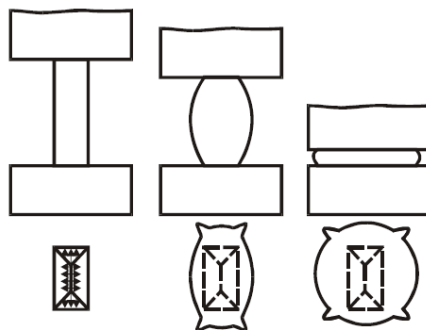


Рис. 1.12. Схема движения частиц металла при осадке заготовки прямоугольного сечения

Отсюда вытекает правило наименьшего периметра: при осадке с трением поперечное сечение любой формы стремится принять форму круга, имеющего наименьший периметр при данной площади сечения. Это выполняется тогда, когда силы трения на контактной поверхности значительны и коэффициент трения одинаков по всем направлениям (изотропия трения). При наличии смазки на контактной поверхности можно изменить схему течения металла и правило наименьшего периметра не будет выполняться.

Закон наименьшего сопротивления позволяет наиболее рационально подбирать форму поперечного сечения заготовок для конкретных случаев пластического деформирования. На основании закона наименьшего сопротивления (периметра) возможно применение заготовок квадратного сечения при штамповке поковок, имеющих в плане круглое сечение.

Этот закон справедлив для случая, когда трение на поверхностях контакта металла с инструментом изотропно, т.е. одинаково по всем направлениям, и значительно.

При осадке прямоугольного параллелепипеда плоскими бойками без контактного трения движение частиц в плоскостях, нормальных к направлению действия внешней силы, носит радиальный характер. Поперечные сечения параллелепипеда в процессе деформации будут оставаться подобными исходным (рис. 1.11, б).

Закон наименьшего сопротивления используется в обработке металлов давлением, например, при разработке технологии объемной штамповки в открытых штампах. Он позволяет учесть предпочтительное направление течения металла, определить, какая часть по-

лости штампа заполнится быстрее, какие размеры и форму будет иметь поперечное сечение заготовки в процессе ее обработки давлением (рис. 1.13).

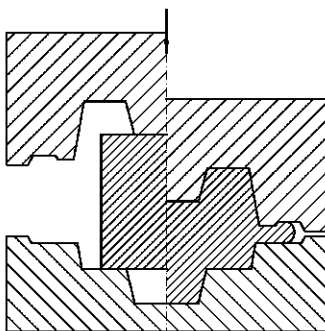


Рис. 1.13. Схема процесса штамповки в открытом штампе

Металл в начальный период штамповки начинает вытекать в стороны за пределы гравюры штампа в зазор между верхним и нижним штампами. Заполнение же элементов полости штампа возможно, если сопротивление течению металла в разъем между штампами становится больше сопротивления течению в те или иные участки полости. По мере смыкания половин штампа зазор между ними уменьшается, сопротивление течению в него металла возрастает, что и обеспечивает заполнение всех элементов полости.

Закон подобия

Усилия, напряжения и деформации при обработке давлением в ряде случаев не могут быть определены экспериментально в производственных условиях при изготовлении изделий на промышленных агрегатах. Постановка этих экспериментов часто сопряжена с большими затратами материалов и простоями оборудования.

Некоторые вопросы, например, распределение напряжений по объему тела, вообще невозможно экспериментально изучать в производственных условиях. Невозможна постановка экспериментов в производственных условиях при разработке принципиально новых технологических процессов обработки давлением.

Для этого тот или иной вопрос исследуется в лабораторных условиях на образцах (моделях) в широком диапазоне изменения различных параметров. Эксперименты проводят на установках мень-

шей мощности и с образцами меньших размеров по сравнению с размерами натуры. Полученные результаты пересчитывают с модели на натуру.

Для того чтобы закономерности и количественные данные, полученные в лабораторных условиях, можно было бы распространить на производственные условия, необходимо соблюдать подобие этих процессов.

Принцип подобия: при осуществлении в одинаковых условиях одних и тех же процессов пластического деформирования геометрически подобных тел из одинакового материала отношение усилий деформирования равно квадрату, а отношение затраченных работ – кубу отношений соответствующих линейных размеров. Этот закон, основанный на принципе моделирования, используется для приближенного определения усилий деформирования и затрачиваемой работы.

Под удельным усилием деформирования понимают отношение потребного для деформирования активного усилия P к площади проекции поверхности металла F на плоскость, нормальную к направлению действия этого усилия:

$$P_y = P/F.$$

Удельное усилие деформирования почти всегда можно представить как

$$P_y = m \cdot \sigma_s,$$

где σ_s – сопротивление металла пластической деформации; m – некоторый безразмерный коэффициент, зависящий от вида осуществляемого процесса деформирования, относительных размеров и формы деформируемой заготовки, а также от условий контактного трения.

Основные условия подобия процессов пластического деформирования: геометрически подобными могут быть тела, у которых отношение объемов равно кубу линейных размеров, а отношение площадей равно квадрату линейных размеров.

Этот закон дает возможность на базе результатовковки небольших образцов (моделей) в лабораториях определять технологические параметры для деформирования крупных заготовок из того же металла в производственных условиях. Принцип подобия требует выполнения следующих основных условий:

1. Натура и модель, а также деформирующий инструмент должны быть геометрически подобными, т.е. отношения соответствен-

ных размеров (длины, ширины, высоты и т.п.) природы и модели были одинаковыми, т.е. $l_n/l_m = a_n/a_m = h_n/h_m = m$, где m – масштаб моделирования.

2. Степени и скорости деформаций природы и модели должны быть равны, т.е. $\varepsilon_n = \varepsilon_m$.

3. Материал природы и модели должен быть физически подобным, т.е. иметь одинаковый химический состав, микро- и макроструктуру, степени упрочнения и разупрочнения и т.д.

4. Условия трения между соприкасающимися (контактными) поверхностями деформирующего инструмента и металла должны быть одинаковы.

Согласно закону подобия удельные усилия деформирования природы и модели равны между собой, полные усилия деформирования пропорциональны площадям поперечного сечения модели и природы, а работы деформации пропорциональны их объемам.

В качестве примера рассмотрим два подобных прямоугольных параллелепипеда со сторонами h, b, l и h_1, b_1, l_1 (рис. 1.13)

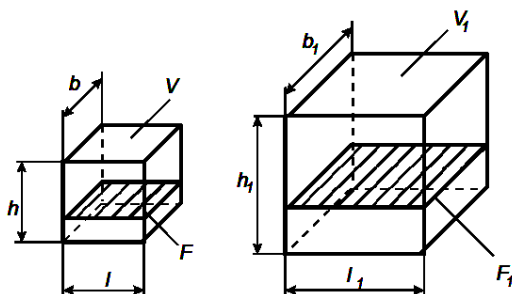


Рис. 1.13. Схема к пояснению закона подобия

Соотношение соответствующих сторон

$$\frac{h_1}{h} \cdot \frac{b_1}{b} \cdot \frac{l_1}{l} = m,$$

где m – масштаб моделирования.

Математически закон подобия запишется следующим образом: отношение усилий, необходимых для деформирования, будет пропорционально площади поперечного сечения

$$\frac{P_1}{P} = \frac{F_1}{F} = \frac{b_1 \cdot l_1}{b \cdot l} = m^2,$$

а отношение потребных работ будет пропорционально объемам

$$\frac{A_1}{A} = \frac{V_1}{V} = \frac{b_1 \cdot l_1 \cdot h_1}{b \cdot l \cdot h} = m^3.$$

Закон подобия положен в основу принципа моделирования, который широко используется в практике. Применение закона подобия требует точного определения условий подобия деформаций не только геометрических, но также механических и физических. Однако вследствие сложности обеспечения теплового подобия природы и модели, а также одинаковых физических свойств и др. точное моделирование осуществить не удастся. Поэтому при расчетах вводят поправочные коэффициенты, учитывающие масштабные, скоростные и другие факторы.

Закон дополнительных напряжений

Деформация не бывает однородной, так как степень деформации разных частей тела неодинакова. При неравномерной деформации размеры отдельных слоев и элементов пластически деформируемого тела изменяются по-разному, что, в свою очередь, влияет на соседние слои и элементы. Поэтому в металле возникают внутренние напряжения, которые называют дополнительными. При неравномерной деформации в более обжимаемых частях тела, которые стремятся получить большую продольную деформацию, возникают сжимающие напряжения, а в менее обжимаемых частях тела, которые стремятся получить меньшую продольную деформацию, возникают растягивающие напряжения.

Причинами дополнительных напряжений могут быть:

- Неравномерность деформации по ширине, приводящая к образованию дополнительных напряжений растяжения на кромках и сжатия посередине или сжатия на кромках и растяжения посередине.
- Поверхностная деформация, при которой внутренние слои не деформируются, в результате чего в поверхностных слоях появляются дополнительные напряжения сжатия, а в средних слоях – напряжения растяжения.
- Форма деформируемого инструмента (валков).
- Неравномерность свойств полосы.
- Неравномерный нагрев заготовки.

Дополнительные напряжения являются взаимно уравновешенными; после окончания пластической деформации они часто сохраняются в виде остаточных напряжений. При горячей обработке до-

полнительные напряжения могут сниматься в результате процессов отдыха и рекристаллизации. После холодной обработки снятие дополнительных напряжений иногда сопровождается разрушением тела.

Дополнительные (остаточные) напряжения подразделяют:

- на напряжения первого рода, которые уравниваются между отдельными частями тела;
- второго рода, которые уравниваются между отдельными зёрнами;
- третьего рода, которые уравниваются внутри отдельных зёрен.

2. ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Реальные металлы и сплавы – поликристаллы (огромное скопление монокристаллов), состоящие из большого количества различного ориентированных зерен. При беспорядочном, случайном расположении зерен в металле его механические и другие свойства во всех направлениях одинаковы и определяются некоторыми средними значениями. В данном случае металл ведет себя как изотропное тело с усредненными свойствами, хотя каждое зерно анизотропно. Поэтому металлические тела называют квазиизотропными (условно изотропными).

Деформация поликристаллического тела складывается из деформации отдельных зерен – внутривзеренной деформации и по границам зерен – межзеренной деформации. Отдельные зерна деформируются скольжением и двойникованием аналогично монокристаллу.

Механизм пластической деформации поликристалла сложнее, чем монокристалла, так как в поликристалле зерна отличаются между собой по форме и размерам, обладают неодинаковыми физико-механическими свойствами, различно ориентированы по отношению к деформирующей нагрузке и т.п.

Общее формоизменение поликристаллического тела складывается из пластической деформации составляющих его зерен и их относительного смещения. Поэтому различают внутрикристаллитную и межкристаллитную деформации поликристалла. Первая протекает путем скольжения и двойникования, вторая – путем поворота и перемещения одних зерен относительно других. Преобладание того или иного вида деформации определяется соотношением прочности отдельных зерен и их границ в данных условиях деформирования. При комнатной температуре прочность границ зерен, как правило, выше прочности зерен. Поэтому при холодной обработке давлением внутрикристаллитная деформация является основным процессом, обуславливающим изменение форм поликристалла.

С повышением температуры прочность зерен становится больше прочности их границ из-за наличия на границах зерен легкоплавких примесей и меньшей термодинамической устойчивости пограничных зон самого металла. Поэтому при горячей обработке давлением преобладает межкристаллитная деформация.

Пластическая деформация поликристалла при действии внешних сил начинается в наиболее благоприятно расположенных зернах. В этих зернах плоскости скольжения составляют с направлением усилия угол, близкий к 45° . Остальные зерна в это время поворачиваются, и когда их плоскости скольжения составят с направлением действия усилия угол 45° , они также начинают деформироваться. В конце концов, большинство зерен вытягивается в направлении наиболее интенсивного течения металла. После деформации плоскости скольжения большинство зерен ориентированы в одном направлении. Иными словами возникает текстура деформации, приводящая к анизотропии свойств поликристалла. Механические и другие свойства также получают направленность, которая на материалах, подвергнутых обработке с большими степенями деформации, полностью не устраняется даже отжигом при высоких температурах.

Основным признаком, по которому в теории ОМД производится деление пластической деформации на виды, является температура. Она определяет соотношение процессов упрочнения и разупрочнения, происходящих параллельно в деформируемом теле.

Совокупность явлений, связанных с повышением прочностных свойств металлов в процессе пластической деформации, называется деформационным упрочнением или наклепом. Если в ходе пластической деформации прочностные характеристики металла понижаются, то речь идет о так называемом разупрочнении металла.

Наклеп и рекристаллизация

Наклепом называют совокупность структурных изменений и связанных с ними изменений физико-механических свойств под действием пластической деформации.

Формоизменение металла при обработке давлением происходит путем пластической деформации каждого зерна. При малых степенях деформации металлографический анализ фиксирует следы скольжения в виде прямых линий, одинаково ориентированных в пределах одного зерна (рис. 2.1, а).

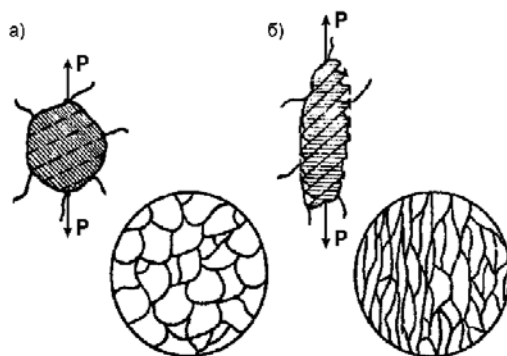


Рис. 2.1. Изменение структуры при пластической деформации:
 а – при малых степенях деформации; б – при больших степенях деформации

При большей деформации в результате протекания процессов скольжения зерна меняют свою форму и размеры, вытягиваясь в направлении действия сдвигающих усилий и образуя волокнистую или слоистую структуру (рис. 2.1, б). Одновременно с изменением формы зерна внутри него происходит дробление блоков, увеличение угла дезориентировки между ними.

В соответствии со схемой деформации изменяется и форма зерен – в направлении деформации растяжения они вытягиваются, а в направлении деформации сжатия – уменьшаются. Такое строение приводит к тому, что механические свойства наклепанного металла будут неодинаковы в разных направлениях, т.е. металл становится анизотропным.

Кроме того, с изменением формы зерен происходит упорядочение ориентировки их решетки в результате кристаллографической направленности скольжения по определенным плоскостям и направлениям. При больших степенях деформации возникает преимущественная кристаллографическая ориентировка зерен. Закономерная ориентировка зерен металла относительно деформирующих сил называется текстурой деформации.

Наклеп сопровождается изменением физических и механических свойств металла. С увеличением степени деформации прочностные характеристики (временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$, предел текучести $\sigma_{\text{т}}$, твердость НВ и др.) повышаются, а характеристики пластичности металла (относительное удлинение δ , относительное сужение ψ и др.) снижаются (рис. 2.2).

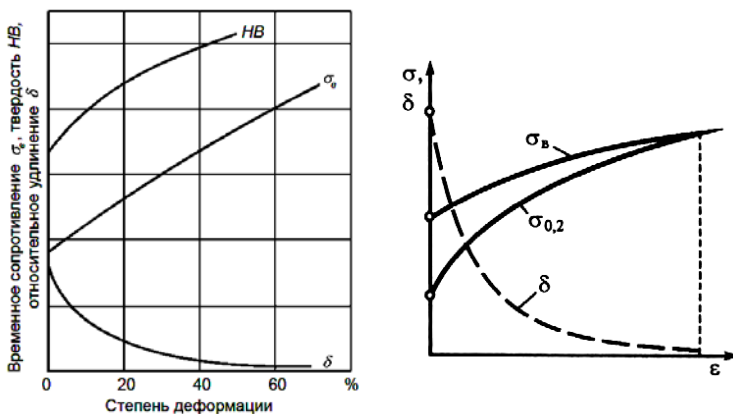


Рис. 2.2. Изменение механических характеристик стали при пластической деформации

При наклепе значение предела текучести металла приближается к его временному сопротивлению, тем самым сильно снижается способность металла к пластической деформации.

Наклеп характеризуется изменением физических свойств: уменьшением теплопроводности и электропроводности металла, снижением его антикоррозийной стойкости, повышением электросопротивления.

Часть энергии, затраченная на наклеп металла, аккумулируется в виде повышенной потенциальной энергии атомов, смещенных из положения равновесия.

При нормальной комнатной температуре состояние наклепа может сохраняться неограниченно долго. Переходу атомов в равновесное состояние способствует повышение температуры.

При нагреве амплитуда тепловых колебаний атомов увеличивается и это облегчает возвращение атомов в положение устойчивого равновесия. В результате этого величина дополнительных напряжений (а следовательно, и остаточных напряжений), возникающих в процессе деформации, снижается и происходит частичное возвращение механических и физико-химических свойств металла к исходному состоянию.

При температурах $(0,25 \dots 0,3)T_{пл}$ происходит незначительное снижение твердости и прочности металла и повышение пластичности.

Особых изменений в структуре при этом не наблюдается. Совокупность указанных явлений именуется возвратом. Здесь происходит частичное снятие внутренних напряжений и практически полное устранение избыточных вакансий, появившихся при наклепе, что и проявляется в частичном восстановлении пластичности.

Дальнейшее повышение температуры увеличивает подвижность атомов. При достижении определенной температуры вместо волокнистой структуры деформированного металла происходит образование новых равноосных мелких зерен. Это явление называется первичной рекристаллизацией. Дальнейший нагрев металла приводит к росту одних рекристаллизованных зерен за счет других. Такой процесс называется собирательной рекристаллизацией.

Температура рекристаллизации не является постоянной физической величиной. Для заданного металла или сплава она зависит от многих факторов: степени предварительной деформации, величины зерна до деформации, длительности нагрева и т.д. Температурный порог рекристаллизации тем выше, чем выше степень деформации и больше длительность нагрева.

Зависимость абсолютной температуры рекристаллизации металла $T_{\text{рекр}}$ от абсолютной температуры плавления его $T_{\text{пл}}$ выражается следующей формулой:

$$T_{\text{рекр}} = \alpha T_{\text{пл}},$$

где α – коэффициент, зависящий от состава и структурного состояния сплава.

Температура T берется в кельвинах. Для металлов высокой чистоты $\alpha = 0,1...0,2$; для технически чистых металлов $\alpha = 0,4$; для твердых растворов $\alpha = 0,5...0,8$.

Приведенная формула позволяет определить температуру начала первичной рекристаллизации металла. Практически для снятия наклепа металл нагревается до более высоких температур. Так, температура рекристаллизации технической чистой меди равна 269°C . Для снятия наклепа медь нагревают до $500...700^{\circ}\text{C}$. Такая термическая обработка получила название рекристаллизационного отжига.

Характер изменения механических свойств наклепанного металла при нагреве показан на рис. 2.3.

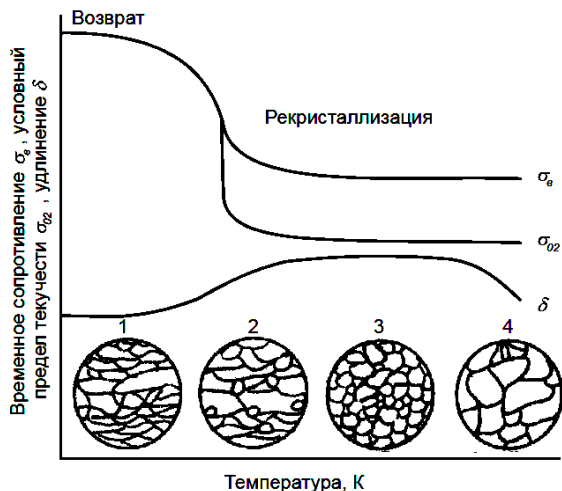


Рис. 2.3. Влияние нагрева на механические свойства и структуру наклепанного металла

В период возврата механические свойства изменяются мало. При достижении температуры начала рекристаллизации временное сопротивление и предел текучести резко уменьшаются, а пластичность металла увеличивается.

Рекристаллизационный отжиг восстанавливает и физические свойства материала: повышаются сопротивление коррозии, теплопроводность, электропроводность и т.д.

2.1. Виды деформации при обработке давлением

Упрочняющие и разупрочняющие процессы протекают во времени с определенными скоростями, обусловленными условиями деформации и природой деформируемого металла. В зависимости от того, какой из процессов является преобладающим, результаты деформации будут различны. Исходя из этого, академиком С.И. Губкиным предложено различать четыре вида деформации и, соответственно, четыре вида обработки давлением:

1. Горячая деформация – деформация, после которой металл не получает упрочнения. Рекристаллизация успевает пройти полностью, новые равноосные зерна полностью заменяют деформированные зерна, искажения кристаллической решетки отсутствуют. Де-

формация имеет место при температурах выше температуры начала рекристаллизации.

2. Неполная горячая деформация характеризуется незавершенностью процесса рекристаллизации, которая не успевает закончиться, так как скорость ее недостаточна по сравнению со скоростью деформации. Частично сохраняются последствия наклепа. Часть зерен остается деформированными и металл упрочняется. Возникают значительные остаточные напряжения, которые могут привести к разрушению. Такая деформация наиболее вероятна при температуре, незначительно превышающей температуру начала рекристаллизации. Ее следует избегать при обработке давлением.

3. Неполная холодная обработка. При неполной холодной деформации рекристаллизация не происходит, но протекают процессы возврата. Температура деформации несколько выше температуры возврата, а скорость деформации меньше скорости возврата. Остаточные напряжения в значительной мере снимаются, интенсивность упрочнения снижается.

4. При холодной деформации разупрочняющие процессы не происходят. Температура холодной деформации ниже температуры начала возврата. Холодная деформация характеризуется сохранением последствий наклепа.

Характер деформации зависит от соотношения температуры деформации и температуры рекристаллизации. Условно считают, что горячая обработка проводится при температурах выше $0,7T_{пл}$, неполная горячая обработка – при $(0,5...0,7)T_{пл}$, неполная холодная обработка – при $(0,3...0,5)T_{пл}$, холодная деформация происходит при температурах ниже $0,3T_{пл}$.

Вид деформации зависит не только от температуры, но и от скорости и степени деформации.

При холодной обработке давлением с увеличением степени деформации возрастает плотность дислокаций, затрудняется их перемещение, блокируются источники дислокаций и пластичность падает.

При горячей обработке степень деформации влияет слабее. При повышении температуры активизируются диффузионные процессы, сопровождающиеся возвратом или рекристаллизацией, которые приводят к частичному или полному восстановлению пластичности.

При высокой степени и скорости деформации и температуре значительно ниже $0,3T_{пл}$ может произойти неполная холодная де-

формация. Частичное разупрочнение металла происходит из-за тепла, выделяющегося внутри металла по плоскостям скольжения.

Даже при температурах выше $0,7T_{пл}$ может иметь место неполная горячая деформация, так как из-за высокой скорости деформации процессы упрочнения протекают быстрее, чем процессы разупрочнения.

Недопустимо принимать во всех случаях деформацию без нагрева (при комнатной температуре) за холодную. Холодная и горячая деформации не связаны с деформацией с нагревом или без нагрева, а зависят только от протекания процессов упрочнения и разупрочнения. Поэтому, например, деформация свинца, олова, кадмия и некоторых других металлов при комнатной температуре является с этой точки зрения горячей деформацией. Так, деформация олова при 25°C не будет сопровождаться наклепом, поскольку температура плавления олова 505 K (232°C). Температура рекристаллизации олова лежит ниже 0°C (-72°C).

2.2. Пластичность металлов и факторы, влияющие на нее

Обработка металлов давлением основана на использовании их пластических свойств. Пластичностью называют способность металла деформироваться при тех или иных значениях термомеханических параметров без разрушения в виде макроскопического нарушения сплошности.

Термомеханическими параметрами называют величины, определяющие термические и механические условия протекания пластической деформации. К числу таких параметров относят, в частности, температуру, составляющие тензоров напряжения и скорости деформации.

Мерой пластичности служит степень деформации сдвига, накопленная металлом к моменту разрушения λ_p .

Кроме понятия «пластичность», в теории ОМД используется понятие «деформируемость», т.е. способность тела в целом изменять свою форму без макроскопического разрушения.

Основными факторами, влияющими на пластичность металлов при обработке давлением, являются: состав и структура деформируемого металла; реализуемая схема напряженного состояния; неравномерность деформации; температура деформации; скорость деформации; степень деформации; режим термической обработки.

Влияние химического состава и структуры

Наибольшей пластичностью обладают чистые металлы и сплавы, образующие твердые растворы, наихудшими пластическими свойствами – сплавы, образующие механические смеси и химические соединения. Техническое железо пластичнее, чем сталь, алюминий пластичнее дюралюминия и т.д.

Однако в чистом виде металлы для получения изделий почти не используются из-за невысоких прочностных свойств. Хром, никель, марганец, молибден, вольфрам и другие элементы, входящие в состав сталей и сплавов в качестве легирующих компонентов, на пластичность влияют по-разному. Решающее значение имеет количественный состав этих элементов, их соотношение в сплаве и т.д.

Сильное влияние на пластичность металлов и сплавов оказывают компоненты, присутствующие в их составе как примеси. Это: олово, сурьма, свинец, сера, мышьяк, фосфор. А также газы: водород (гидриды), азот (нитриды), кислород (оксиды) и др. Они практически не растворяются в металлах и поэтому, располагаясь по границам зерен, ослабляют связь между ними. Температура плавления этих элементов и их соединений достаточно низкая, что при горячей деформации может привести к почти полной потере пластичности металла.

Влияние примесей, содержащихся в сталях, на их пластические свойства: с увеличением содержания углерода в сталях пластичность падает, а сопротивление деформированию растет. Стали, содержащие углерод до 0,5%, обладают хорошей пластичностью и хорошо поддаются обработке давлением. Обработка сталей, содержащих от 0,5 до 1% углерода, затруднена. С повышением содержания углерода в стали растут прочность, которая оценивается параметром σ_B (временное сопротивление), и твердость, например, твердость по Бринеллю (НВ). При этом снижается пластичность. Параметры, характеризующие пластичность, падают (относительное удлинение δ , относительное сужение ψ , ударная вязкость a_n). Влияние содержания углерода на механические свойства сталей показано на рис. 2.4.

Содержание кремния в углеродистых сталях в пределах 0,17...0,35%, а марганца в пределах 0,3...0,85% не оказывает заметного влияния на пластичность стали. Дальнейшее повышение содержания Si и Mn в стали приводит к снижению ее пластических свойств.

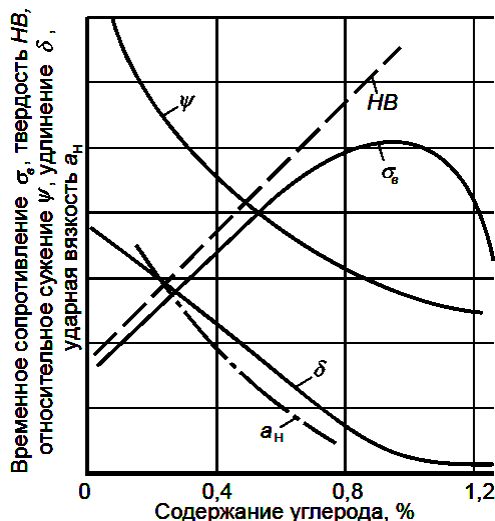


Рис. 2.4. Влияние углерода на механические свойства стали

Сера находится в стали в виде химических соединений FeS и MnS. Она вызывает красноломкость стали. Причина этого – наличие эвтектики (FeS+Fe) с температурой плавления 1258 К (985°C), располагающейся по границам зерен. К моменту нагрева стали до ковочных температур 1473К (порядка 1200°C) эвтектика оплавляется и при горячей обработке в металле возникают трещины. По этой причине содержание серы в стали не должно превышать 0,03...0,05%.

Фосфор присутствует в твердом растворе (феррите). Он вызывает хладноломкость сталей, поэтому содержание его должно быть не более 0,03...0,05%.

Азот, кислород и водород в сталях значительно снижают ее пластичность и повышают порог хладноломкости.

Наряду с постоянными примесями в сталь вводится ряд элементов, легирование которыми придает сталям те или иные свойства, в том числе повышает сопротивление пластической деформации.

Никель увеличивает вязкость сталей и их прочность. Хром, как и никель, повышает прочность, увеличивает твердость сталей. Ванадий повышает вязкость сталей, увеличивает мелкозернистость, твердость и стойкость при высоких температурах. Молибден и вольфрам повышают твердость и сопротивление деформации.

Марганец, понижая пластичность, повышает сопротивление деформации средне- и высокоуглеродистой стали. Кремний еще более, чем марганец, повышает сопротивление деформации углеродистой стали. Таким образом, пластичность стали снижается с увеличением содержания в ней С, Mn, Si, S, P и всех легирующих элементов.

Неоднородная структура также снижает пластичность. Сильное влияние оказывает на пластичность наличие избыточной фазы в виде интерметаллических соединений. При одинаковом химическом составе однофазный сплав будет пластичнее двухфазного. В последнем фазы имеют разные механические свойства и деформация протекает неравномерно. Металл с мелкозернистой структурой будет пластичнее металла с крупнозернистым строением, а деформированная заготовка во многих случаях оказывается пластичнее слитка, т.к. литая структура имеет резкую неоднородность зерен, включения и другие дефекты.

Влияние температуры

Температура оказывает существенное влияние на пластичность металлов и сплавов. Все металлы и сплавы имеют тенденцию к увеличению пластичности и снижению сопротивления деформированию при повышении температуры.

При температурах обработки, близких к комнатной, металлы имеют минимальную пластичность. Это обусловлено низкой тепловой подвижностью его атомов. С другой стороны, при температурах, несколько меньших температуры плавления, наблюдается резкое снижение пластичности, являющееся результатом значительного роста зерен и последующего пережога (окисления границ зерен).

Общим положением для всех металлов и сплавов является то, что наибольшую пластичность они имеют при температурах выше температуры начала рекристаллизации, т.е. в условиях горячего деформирования. Это является следствием не только увеличения подвижности атомов, но и роста пластичности межкристаллических прослоек, содержащих повышенное количество примесей.

Влияние температуры нагрева на механические свойства стали, содержащей 0,42% углерода, показано на рис. 2.5. Увеличение температуры примерно стали до 100°C вызывает некоторое повышение пластичности δ и уменьшение прочности σ_B стали. Однако при температурах около 300°C наблюдается повышение прочности и сниже-

ние пластичности. Это вызвано выделением дисперсных частиц карбидов, нитридов и т.п. по плоскостям скольжения. Интервал 250...350°C называется зоной синеломкости. Называется так по синему цвету побежалости, приобретаемому сталью при этих температурах.

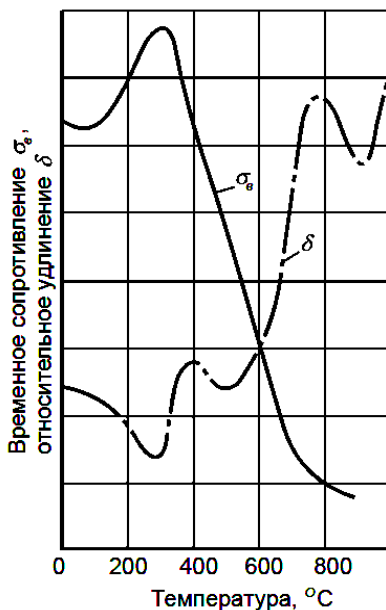


Рис. 2.5. Изменение механических свойств углеродистой стали в зависимости от температуры

Снижение пластичности вызвано выделением дисперсных частиц карбидов и нитридов. Дальнейшее повышение температуры приводит к снижению прочности стали. Характеристика пластичности δ в интервале температур 800...900°C резко понижается. Причиной этого считают фазовый наклеп при перекристаллизации. Металлические фазы обладают различной пластичностью, вследствие чего происходит разрушение металла по их границам. Подобная закономерность характерна и для других металлов и сплавов.

Влияние скорости деформации

Скоростью деформации называется изменение степени деформации в единицу времени. Она выражается формулой

$$W = \frac{d\varepsilon}{dt},$$

где W – скорость деформации, с^{-1} ; ε – степень деформации; t – время, с.

При постоянной скорости деформации

$$W = \frac{\varepsilon}{t}.$$

Общим в оценке влияния скорости деформации на пластичность является то, что если повышение скорости деформации затрудняет разупрочняющие процессы в металле во время деформации, то это снижает пластичность.

При горячем деформировании надо учитывать как наличие двух противоположных процессов – упрочняющего и разупрочняющего, а также тепловой эффект пластической деформации. Тепловой эффект выражается в том, что энергия, расходуемая на пластическую деформацию, превращается в основном в теплоту. Коэффициент выхода теплоты составляет для чистых металлов 0,85...0,90, для сплавов 0,75...0,85.

При горячей обработке увеличение скорости деформации понижает пластичность в том случае, если скорость упрочнения металла вследствие его деформирования превышает скорость разупрочнения вследствие нагрева.

При холодной деформации увеличение скорости деформации вызывает нагрев металла по плоскостям скольжения. Тепло, аккумулируясь в металле, способствует развитию процессов разупрочнения, что, в свою очередь, сказывается на повышении пластичности металла. Интенсивность роста этого влияния больше в диапазоне малых скоростей и незначительна в диапазоне больших скоростей.

Скорость деформации следует отличать от скорости движения деформирующего инструмента и скорости течения металла при деформации. Диапазон скоростей деформации составляет $10^{-1} \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Скорость деформации связана с понятием скорости деформирования, которым определяется скорость хода инструмента (например, пресса или молота). Например, при осадке скорость деформирования

$$v = \frac{dh}{dt},$$

где v – скорость деформирования, м/с; h – высота изделия, м; t – время, с.

Отсюда скорость деформации в данный момент будет

$$W = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dh/h}{dt} = \frac{v}{h}.$$

Следовательно, скорость деформации зависит от скорости деформирования и размера тела в направлении деформации. В зависимости от скорости деформирования все способы обработки давлением делятся на низкоскоростные и высокоскоростные.

При обработке давлением на прессах скорость деформирования составляет 0,1...0,5 м/с. При обработке давлением на молотах скорость деформирования в момент удара достигает 5...10 м/с. Указанные способы обработки давлением относятся к низкоскоростным. Скорость деформации составляет $10^{-1} \dots 10^1 \text{ с}^{-1}$.

При высокоскоростных методах (обработка взрывом, магнитно-импульсная обработка и др.) скорость деформирования может достигать 200...300 м/с. Скорость деформации достигает $10^3 \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Влияние схемы напряженного состояния и схемы главных деформаций

Внешние силы вызывают появление в теле внутренних сил, которые уравнивают действие внешних сил. Интенсивность внутренних сил называют напряжением. Внутренние напряжения возникают не только под действием деформации, а также при неодинаковом изменении объема с течением времени в результате нагрева, термообработки.

Напряженное состояние характеризуется схемой главных напряжений. Понятие «схемы главных напряжений» ввел в теорию обработки металлов давлением академик С.И. Губкин. Схемы напряженного состояния графически отображают наличие и направление главных напряжений в рассматриваемой точке тела. Напряжения в точке изображаются как напряжения на трех бесконечно малых гранях куба, соответственно перпендикулярных главным осям.

В механике сложных тел существует положение, по которому напряженное состояние точки можно охарактеризовать тремя нормальными напряжениями. Максимальное главное напряжение обо-

значается σ_1 , минимальное – σ_3 , среднее – σ_2 . На схемах главные площадки изображаются в виде трех взаимно перпендикулярных граней куба, а напряжения – стрелками, приложенными к центру граней. Предполагается, что размеры куба весьма малы, а в центре его объема располагается точка, для которой построена схема.

Известно 9 схем главных напряжений. Возможны две линейные схемы напряженного состояния, характеризующие сжатие и растяжение металла по одной оси (рис. 2.6).

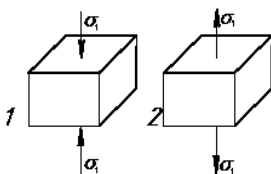


Рис. 2.6. Линейные схемы напряженного состояния

Это теоретически возможные схемы, но первую практически получить невозможно (из-за действия сил трения), а вторая может быть получена при растяжении образцов до момента образования шейки.

Возможны три схемы плоского напряженного состояния (рис. 2.7).

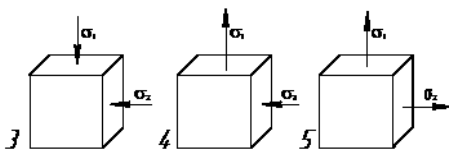


Рис. 2.7 Схемы плоского напряженного состояния

Практически осуществить эти схемы сложно. В реальных процессах обработки давлением в большинстве случаев происходит объемное напряженное состояние.

Возможны четыре схемы объемного напряженного состояния (рис. 2.8).

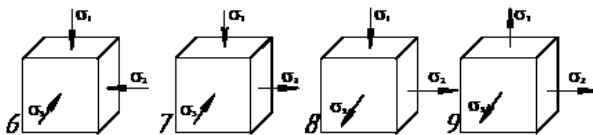


Рис. 2.8. Схемы объемного напряженного состояния

Из них 6-я схема присуща подавляющей части объема при пресовании, 7-я схема встречается при волочении, 8-я схема имеет место при прокатке со свободным уширением, при свободной ковке, 9-я схема при поперечно-винтовой прокатке (при прошивке) в осевой части слитка.

С точки зрения пластичности металлов, т.е. его способности изменять форму без разрушения, наиболее благоприятна схема объемного сжатия (6). При условии $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ деформации не будет. Чтобы осуществить плавную деформацию, нужно иметь разность главных напряжений $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Пластичность будет наибольшей. Влияние этих схем на пластичность будет уменьшаться от 6-й к 9-й схеме. Чем больше отношение растягивающих напряжений к сжимающим, тем меньше пластичность. Таким образом, изменяя напряженное состояние деформируемого тела при деформации, можно изменять и пластичность его в широких пределах и деформировать даже хрупкие металлы.

Соответственно схемам главных напряжений существуют схемы главных деформаций $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ в какой-либо точке тела. Графически отображают наличие и направление деформации ϵ по трем взаимноперпендикулярным осям, т.е. изменение размеров тела в направлении трех главных осей.

Если напряженное состояние характеризуется одной из девяти схем, то деформированное – только одной из трех (рис. 2.9).

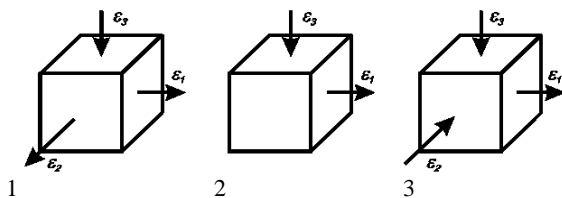


Рис. 2.9. Схемы деформации

Первая (рис. 2.9, 1) – объемная схема деформации, когда уменьшаются размеры в направлении одной оси и увеличиваются в двух других. Такая схема действует при (осадке) ковке, штамповке и при прокатке.

Вторая (рис. 2.9, 2) – плоская схема деформации, при которой размеры тела увеличиваются по одной, уменьшаются по второй и остаются без изменений по третьей оси. Эта схема осуществляется

при прокатке широкого листа, когда его ширина в процессе прокатки практически не изменяется.

Наиболее рациональной с точки зрения производительности процесса обработки давлением является 3-я схема. При этой схеме размеры тела уменьшаются по двум направлениям и увеличивается третий размер, т.е. длина увеличивается максимально. По этой схеме происходят процессы прессования, волочения и некоторые виды прокатки труб.

Совокупность схемы напряженного состояния и схемы деформации С. И. Губкин назвал механической схемой деформации. Пластичность зависит не только от свойств металла, температурно-скоростных условий, но и от механической схемы деформации. На рис 2.10 представлены механические схемы деформации некоторых процессов обработки металлов давлением и приведена качественная оценка пластичности и потребного усилия.

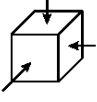
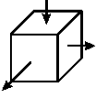


Процесс	Схема напряженного состояния	Схема деформации	Пластичность	Потребное усилие
Прессование			отличная	высокое
Прокатка листа			хорошая	высокое
Осадка			удовлетворительная	среднее
Волочение			пониженная	низкое

Рис. 2.10. Механические схемы деформации некоторых технологических процессов обработки металлов давлением

Установлено, что при обработке давлением не существует металлов и сплавов, обладающих неизменными пластическими свойствами, а есть хрупкое и пластичное состояния, определяемые условиями нагружения при деформировании. При этом чем в большей

степени выражены в схеме напряженного состояния сжимающие напряжения, тем выше пластичность обрабатываемого металла.

Наиболее благоприятной для проявления металлом пластических свойств является схема всестороннего неравномерного сжатия. Появление в схеме растягивающих напряжений снижает пластичность, и самой низкой пластичностью характеризуется схема всестороннего растяжения, которая в реальных процессах обработки давлением практически не встречается.

Наилучшей схемой по пластичности является схема всестороннего сжатия с одной деформацией удлинения и двумя деформациями сжатия. Как видно из таблицы, такая схема соответствует процессу прессования.

При разработке технологии обработки металлов давлением нужно стремиться к созданию условий, обеспечивающих достаточную пластичность металла при наименьших усилиях.

Неравномерность деформации

Основными причинами, вызывающими неравномерное распределение напряжений и деформации в обрабатываемом теле, можно считать несоответствие конфигурации инструмента форме исходной заготовки, контактное трение, неоднородность физических свойств деформируемого тела.

В большинстве процессов обработки давлением форма заготовки (слитка) отличается от формы изделия, определяемой формой инструмента. Обычно форма заготовки проще формы изделия, что и приводит к неодинаковому обжатию отдельных частей заготовки, т.е. к неравномерной деформации.

Контактное трение затрудняет скольжение деформируемого тела по инструменту. Действие его распространяется неодинаково по объему тела, наиболее сильно проявляется вблизи контакта с инструментом и уменьшается по мере удаления от контакта, что приводит к неравномерности деформации. Примером может служить осадка цилиндрической заготовки в условиях максимального трения на контакте.

Неоднородность свойств может быть зональной (макроскопической), когда свойства одной части тела отличаются от другой, например, когда слиток (заготовка) нагрет неравномерно по сечению или деформируемое тело составлено из разных по свойствам метал-

лов (биметалл), и может быть микроскопической, обусловленной неоднородностью или анизотропией свойств. В результате неоднородного распределения деформации в теле возникают взаимно уравновешенные дополнительные напряжения, которые не учитываются схемой напряженного состояния, вызываемого непосредственно воздействием внешних сил. Дополнительные напряжения могут при определенных условиях обработки изменять схему напряженного состояния, тем самым влияя на пластичность. Поэтому, например, при общей схеме всестороннего сжатия возможно появление в некоторых участках тела растягивающих напряжений, что приведет к более раннему его разрушению, чем прогнозируется.

Влияние горячей деформации на структуру и свойства металла

Часто обработке давлением подвергают заготовки, имеющие литую структуру (слитки, литые заготовки). Обычно такие заготовки подвергаются горячей деформации. Литая структура характеризуется наличием в ней крупных кристаллитов первичной кристаллизации, по границам которых располагаются примеси и неметаллические включения.

Деформирование литой структуры приводит к дроблению кристаллитов и вытягиванию их в направлении наиболее интенсивного течения металла. Одновременно с этим происходит вытягивание в том же направлении неметаллических включений и других примесей. Образуется так называемая полосчатая макроструктура, которая выявляется при травлении макрошлифов и наблюдается невооруженным глазом. Возникновение полосчатой макроструктуры приводит к явлению анизотропии. Показатели пластичности вдоль и поперек волокон значительно отличаются, причем разница в показателях растет с увеличением степени деформации. Прочностные характеристики металла вдоль и поперек волокон отличаются незначительно: увеличение степени деформации почти не сказывается на их величине.

3. НАГРЕВ МЕТАЛЛОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Для получения изделий обработкой давлением требуется определенная степень деформации. Чаще всего достижение такой степени деформации за одну операцию (один проход при прокатке, одна операция вытяжки при листовой штамповке и т.д.) трудноосуществимо или невозможно. Поэтому технологический процесс обычно включает несколько операций. Для частичного или полного восстановления пластичности после одного из этапов обработки давлением проводят промежуточную термообработку.

Нагрев металла перед обработкой давлением производится с целью повышения его пластичности и уменьшения сопротивления деформированию. Операция нагрева во многом определяет точность изделий и их качество, а также правильное использование оборудования и инструмента. Нагрев должен обеспечить равномерное распределение температуры по сечению заготовки, не допускать окисления ее и обезуглероживания. В этом плане приобретает важное значение интенсификация процесса нагрева, внедрение в промышленность таких прогрессивных способов нагрева, как индукционный и электроконтактный, а также нагрев в защитных атмосферах.

Различают две разновидности нагрева:

– косвенный нагрев, если тепло передается металлу за счет соприкосновения его с какой-либо средой (газовой, твердой или жидкой). Передача тепла телу происходит здесь за счет конвекции и излучения;

– прямой нагрев имеет место в том случае, когда тепло аккумулируется в самом металле. Например, нагрев изделия за счет пропускания через него электрического тока.

При разработке технологии нагрева заготовок перед обработкой давлением решаются следующие задачи:

- определение температурного интервала обработки;
- выбор скорости нагрева;
- определение времени нагрева;
- выбор нагревательного устройства.

3.1. Температурный интервал обработки металлов давлением. Скорость и время нагрева

Обработка металла давлением с использованием нагрева проводится в интервале температур (нагрев до определенной температуры и обработка до нижнего температурного предела).

Верхний температурный предел выбирается так, чтобы нагрев металла не сопровождался отрицательными явлениями (перегрев, пережог, обезуглероживание, окисление). Температура нижнего предела должна быть такой, чтобы металл при обработке не получил наклепа. Выбор температур зависит от рода сплава и его химического состава.

На рис. 3.1 показана температурная область обработки давлением углеродистых сталей. Верхний температурный предел располагается на 100...200°C ниже линии солидус АЕ.

Нижний температурный предел для доэвтектоидных сталей определяется как $(GS + 50^\circ\text{C})$.

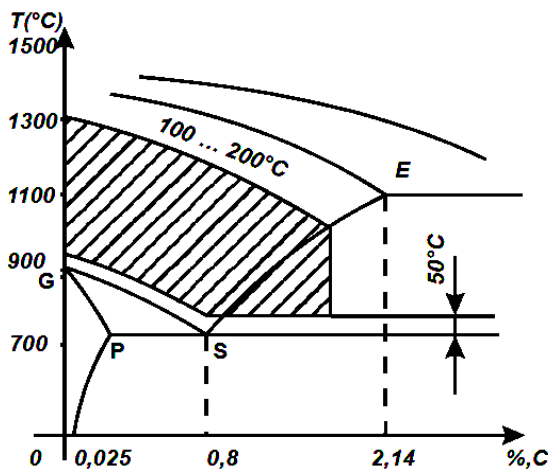


Рис. 3.1. Температурная область нагрева под ковку углеродистых сталей

Для заэвтектоидных углеродистых сталей температурная область обработки давлением располагается между линиями диаграммы ES и PS.

Нагрев сталей до температуры выше верхнего предела сопровождается интенсивным ростом зерна. Это явление называется пере-

гревом. Перегрев может также явиться результатом длительной выдержки металла при более низкой температуре. Он снижает механические свойства сталей, особенно ударную вязкость. Исправить перегрев можно последующим отжигом или нормализацией.

При нагреве до температур, значительно превышающих верхний предел, происходит интенсивное внутреннее окисление металла с образованием эвтектики (Fe+FeO) с температурой плавления 940°C (1213K). Такой металл при последующей деформации может разрушиться. Это отрицательное явление называется пережогом. Пережог – неисправимый вид брака.

Скорость и время нагрева

Скорость нагрева металла определяет производительность нагревательного устройства: чем выше скорость нагрева, тем выше производительность нагревательного агрегата. Скорость нагрева металла влияет на качество изделия. Замедленный нагрев способствует окислению и обезуглероживанию металла. При быстром нагреве вследствие большой разницы температур на поверхности и в сердцевине заготовки могут возникать внутренние напряжения и даже трещины. Существует оптимальная скорость нагрева, при которой обеспечивается высокое качество изделия при наименьших затратах. Такая скорость называется допустимой.

Скорость нагрева выражается величиной, показывающей повышение температуры металла в единицу времени (°C/с, °C/мин, °C/ч, К/с, К/мин, К/ч).

Скорость нагрева зависит от следующих факторов:

- перепада температур по сечению заготовки;
- напора печи (температуры рабочего пространства печи);
- формы и размеров поперечного сечения заготовки;
- теплофизических свойств металла;
- способа нагрева.

Перепад температур по сечению заготовки при нагреве меняется во времени (рис. 3.2). В начальный период нагрева он достигает максимального значения. С течением времени перепад температур уменьшается, и в определенный период температура выравнивается по всему сечению заготовки.

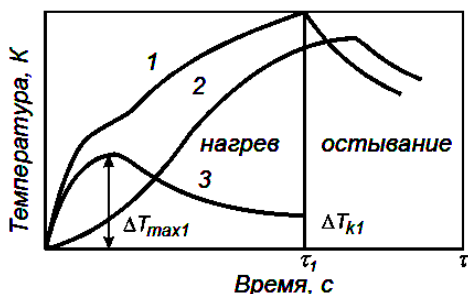


Рис. 3.2. График нагрева заготовки: 1 – температура поверхности; 2 – температура сердцевины; 3 – разность температур между поверхностью и сердцевиной

Скорость нагрева будет тем больше, чем больше начальный перепад температур по сечению. В каждом отдельном случае необходимо опытное определение допустимого перепада температур по сечению заготовки.

Скорость нагрева металла зависит от его теплофизических свойств: теплопроводности, теплоемкости, плотности, электросопротивления, магнитной проницаемости.

При прогреве поверхностных слоев заготовки в них возникают напряжения сжатия, а в сердцевине – соответственно напряжения растяжения. Термические напряжения могут суммироваться с другими видами напряжений, например структурными. Структурные, или фазовые, напряжения возникают в металле вследствие процессов фазовой перекристаллизации из-за различия удельных объемов металлических фаз. При нагреве стальных заготовок структурные превращения происходят при температурах выше 700°C , т.е. когда сталь уже находится в пластическом состоянии и возникающие напряжения гасятся за счет пластической деформации. При охлаждении заготовки структурные напряжения, суммируясь с термическими, могут превысить временное сопротивление σ_v металла, что приведет к образованию трещины.

Установлено, что при обработке давлением мало- и среднеуглеродистых сталей перепад температур ΔT в 100°C не приводит к образованию больших внутренних напряжений в металле.

Особо опасна высокая скорость нагрева стали в диапазоне температур от 20° до 500...700°С. Температурный градиент обуславливает в нагреваемом металле появление термических напряжений, которые при наличии остаточных напряжений в холодной заготовке в первый период нагрева, т.е. до перехода через интервал структурных превращений ($AC_1 - AC_2$), могут вызвать нарушение целостности металла – появление внутренних микро- и макротрещин. Это обстоятельство следует особо учитывать при нагреве заготовок больших сечений (слитков) из высокоуглеродистых и высоколегированных сталей, обладающих низкой теплопроводностью. Пока не пройден температурный интервал структурных превращений, нагрев осуществляется посредством постепенного повышения температуры печи или путем продвижения заготовки в зоны более высоких температур печи. Этот период нагрева составляет примерно 60-70% всей продолжительности нагрева слитка.

Второй период нагрева, т.е. от критических температур до конечной, следует вести с максимальной технически возможной для данной печи скоростью. Сталь, пройдя структурные превращения, становится настолько пластичной, что опасность появления трещин отпадает, а медленный нагрев ей теперь будет вреден из-за усиления роста зерна, обезуглероживания и образования окалины.

Заготовки небольших сечений (до 100...150 мм в диаметре) из любой стали можно нагревать с любой технически возможной скоростью. С увеличением поперечного сечения заготовки скорость нагрева должна уменьшаться.

При электрических способах нагрева количество тепла, выделяющегося в заготовке, зависит от электросопротивления и магнитной проницаемости материала. Чем большим электросопротивлением обладает металл, тем больше в нем выделяется тепла при нагреве проходящим током.

Время нагрева металла зависит от тех же факторов, что и скорость. Для одной и той же заготовки время нагрева тем меньше, чем больше перепад температур по сечению. На практике для определения времени нагрева пользуются данными опытов, представленными в виде различного рода таблиц и графиков. В качестве примера на рис. 3.3 представлены графики для определения времени нагрева заготовок до температуры 1200°С (1473 К) из углеродистой стали при различных способах нагрева.

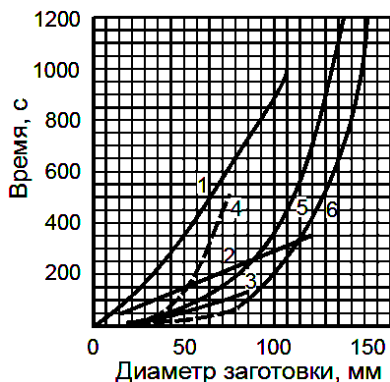


Рис. 3.3. График времени нагрева заготовок из углеродистых сталей до температуры 1200°C при различных способах нагрева: 1 – в печи с температурой 1300 °С; 2 – в печи с температурой 1500 °С; 3 – при электроконтактном способе; 4,5,6 – при индуктивном способе (частота тока 8000, 2500, 500 Гц)

Продолжительность нагрева в печах заготовок и слитков из углеродистой стали более крупного сечения обычно определяют по эмпирическим формулам (формула Доброхотова):

$$\tau = k\alpha D\sqrt{D} \text{ ч,}$$

где k – коэффициент, учитывающий теплофизические свойства металла; D – диаметр или сторона квадрата, м; α – коэффициент, учитывающий расположение заготовок на поду печи.

Значение коэффициента α приведено на рис. 3.4.

Расположение заготовок	α	Расположение заготовок	α
	1		1
	1		1,4
	2		4
	1,4		2,2
	1,3		2
			1,8

Рис. 3.4. Значение коэффициента α

Время, определяемое по этой формуле, включает выдержку, необходимую в конце нагрева для выравнивания температуры по сечению слитка заготовки. Это время продолжительности нагрева относится к пламенным печам.

Для заготовок из низкоуглеродистой и низколегированной стали $k=12,5$, для заготовок из высокоуглеродистой инструментальной стали $k=20$, для заготовок из среднелегированной стали $k=25$ и для заготовок из высоколегированной стали $k=30$.

3.2. Нагревательные устройства

Нагревательные устройства могут быть классифицированы:

– по источнику энергии (пламенные печи и электрические установки);

– по назначению (кузнечные, прокатные, термические);

– по принципу действия (камерные и методические).

В свою очередь, пламенные печи подразделяются:

– на печи, отапливаемые твердым, жидким или газообразным топливом;

– рекуперативные и регенеративные.

На рис. 3.5 приведены схемы основных видов нагревательных устройств.

По конструктивным признакам нагревательные устройства можно разделить на печи периодического действия (камерные) и непрерывного действия (методические, полуметодические и т.д.).

В камерных печах металл в процессе нагрева остается неподвижным, температура в любой точке печи примерно одинакова; загрузка и выдача металла производится периодически.

В печах непрерывного действия металл передвигается на поду печи или вместе с подом (конвейерные печи) от места загрузки в печь до места выгрузки из печей с помощью специальных механизмов – толкателей. Температурный режим по длине печи методически (постепенно) изменяется от минимальной температуры до заданной. Загрузка и выдача металла осуществляется без нарушения теплового режима печи. Методические печи трехзонные: 1-я зона – подогрева до 800... 900°C; 2-я зона – сварочная зона до температуры протяжки 1100...1250°C; 3-я зона – выдержки (томильная) для выравнивания по всему сечению, температура в которой на 50...100°C ниже, чем во 2-й зоне.

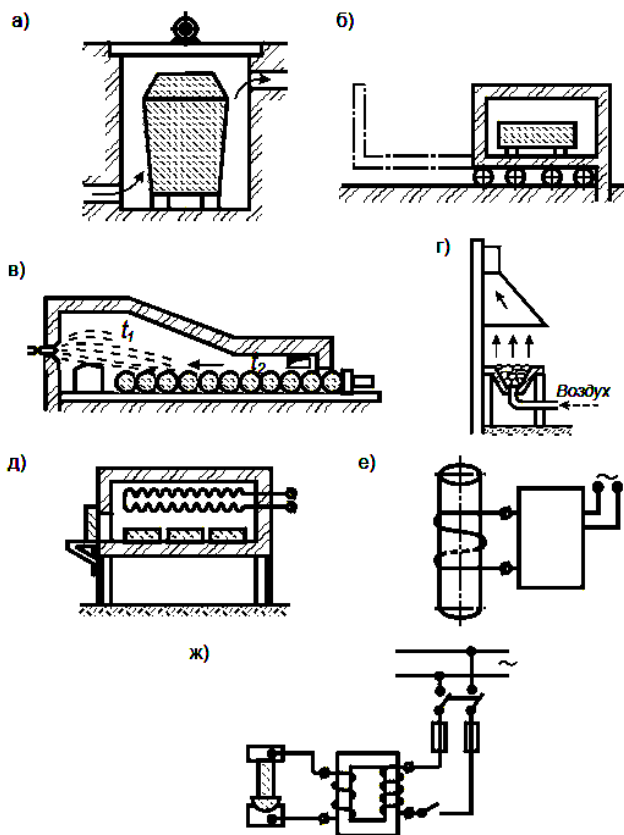


Рис. 3.5. Принципиальные схемы основных видов нагревательных устройств:
 а – шахтная нагревательная печь; б – камерная печь с выдвигаемым подом;
 в – методическая печь; г – кузнечный горн; д – камерная электрическая печь;
 е – установка индукционного нагрева; ж – установка электроконтактного нагрева

В связи с задачей интенсификации процессов нагрева, а также сокращения угара металла большое внимание уделяется внедрению в производство высокоскоростных способов нагрева. Одним из прогрессивных способов является индукционный нагрев.

В основе индукционного нагрева лежит явление электромагнитной индукции. Для создания мощного переменного магнитного поля применяются многovitковые индукторы, выполненные из медной трубки, охлаждаемые водой. Источником переменного тока может быть либо промышленная сеть (50 Гц), либо генератор токов высо-

кой частоты (машинный или ламповый). Стандартные частоты переменного тока в нашей стране – 50, 500, 1000, 2600, 8000 Гц.

Принципиальная электрическая схема установки индукционного нагрева представлена на рис. 3.6. Переменный ток от генератора 1 подается к индуктору 2, внутри которого располагается заготовка 3. Параллельно катушке индуктора подключается батарея конденсаторов 4, которая, являясь накопителем энергии, повышает низкий коэффициент мощности индуктора. При протекании тока по индуктору в заготовке индуцируются вихревые токи. Приблизительно можно считать, что глубина проникновения электрического тока в заготовку (толщина скин-слоя) равна:

$$\Delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \text{ см,}$$

где ρ – удельное электросопротивление металла, Ом·см; μ – магнитная проницаемость, Г/см; f – частота, Гц.

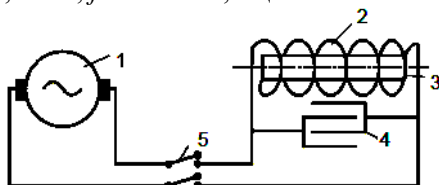


Рис. 3.6. Принципиальная электрическая схема индукционного нагрева

Из формулы следует, что с увеличением удельного электросопротивления и уменьшением частоты тока глубина проникновения тока, а следовательно зона нагрева, возрастает.

При выборе частоты тока f используют формулу

$$f_{\text{опт}} = \frac{3400}{d^2},$$

где $f_{\text{опт}}$ – оптимальная частота, Гц; d – диаметр заготовки, см.

Индукционные нагреватели, применяющиеся в промышленности, подразделяются на нагреватели периодического и непрерывного действия. Основной частью нагревателя является индуктор. Внутренний диаметр спирали индуктора выбирается так, чтобы обеспечить максимальный КПД системы «заготовка–индуктор»:

$$D = (1,5 \dots 6) d,$$

где D – внутренний диаметр индуктора; d – диаметр заготовки.

Длина спирали индуктора должна быть больше суммарной длины нагреваемых в ней заготовок на один–два диаметра заготовки.

Средние энергетические показатели при индукционном нагреве углеродистых сталей следующие:

КПД нагревателя – 60...65 %;

удельный расход электроэнергии – 0,45...0,5 (кВт·ч)/кг;

производительность нагревателя – 2000-3000 кг/ч.

Основные преимущества индукционного нагрева: большая скорость нагрева, высокий КПД, малый угар металла (0,4...0,6 %). К недостаткам данного вида нагрева можно отнести сравнительно высокую стоимость силовой электрической установки, трудность подогрева заготовок и нагрева заготовок сложной формы.

3.3. Борьба с окислением и обезуглероживанием металла при нагреве

В процессе нагрева происходит активное химическое взаимодействие сталей с окружающей средой, в результате чего поверхностные слои заготовки окисляются и обезуглероживаются. На поверхности заготовки образуется окалина. При окислении сталей окалина состоит из окислов железа. Наружный, самый тонкий слой окалины состоит из Fe_2O_3 (~2 %), средний из Fe_3O_4 (~18 %) и внутренний, самый толстый слой, из FeO (~80 %).

Окислителями стали при нагреве являются кислород, углекислый газ, сернистый газ, водяной пар. Интенсивное окалинообразование при нагреве стали начинается с 700°C (973 К) и особенно активно возрастает при температурах выше 900°C (1173 К).

Потеря металла в результате его окисления называется угаром. На величину угара оказывают влияние:

- температура нагрева;
- атмосфера рабочего пространства нагревательного устройства;
- продолжительность нагрева;
- химический состав металла;
- форма и размеры заготовки.

Угар причиняет производству огромный ущерб, который заключается в безвозвратной потере металла. Возникает необходимость увеличения припусков на механическую обработку. Окалина в 1,5...2 раза ускоряет износ инструментов (штампов, бойков, прокатных валков и др.). При взаимодействии окалины с подом и футеров-

кой печей происходит разрушение последних. Можно считать, что примерно 5 % всей выплавляемой в стране стали теряется на окалину при нагреве в прокатных, кузнечных и термических цехах.

Обезуглероживание стали заключается в выгорании углерода из ее поверхностных слоев за счет взаимодействия его с кислородом и водородом атмосферы. Обезуглероживание приводит к резкому снижению прочности поверхностных слоев металла. Глубина обезуглероженного слоя может достигать 1,5...2,0 мм.

Применяемые методы защиты стали от окисления и обезуглероживания при нагреве можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, способные уменьшить окисление и обезуглероживание в 1,5...2 раза, но не ликвидировать их полностью. Например:

- улучшение условий сжигания топлива и эксплуатации печей;
- автоматизация и оптимизация режимов нагрева;
- ускоренные способы нагрева и др.

Ко второй группе относятся специальные методы, позволяющие полностью обеспечить защиту поверхности металла от окисления. Такой метод называют безокислительным нагревом. Из применяющихся методов безокислительного нагрева наибольший практический интерес представляют следующие:

- нагрев в продуктах неполного сгорания;
- нагрев в расплавленных солях;
- нагрев в печах с защитной атмосферой;
- нагрев с нанесением защитных покрытий на поверхность заготовки.

Нагрев металла в продуктах неполного сгорания топлива является одним из перспективных методов безокислительного нагрева. При данном способе нагрева толщина окисленного слоя на поверхности заготовок снижается в 5...10 раз. Нагрев заготовок под ковку или штамповку производится в двухкамерных печах. Сгорание газообразного топлива производится в две стадии. В камере нагрева металла газ сжигается с коэффициентом избытка воздуха 0,4...0,55. Благодаря этому в камере достигается такое соотношение между окислительными и восстановительными составляющими продуктов горения, которое практически исключает возможность окисления металла. Продукты неполного сгорания дожигаются в другой камере. Выделяющееся при этом тепло расходуется на подогрев воздуха

в рекуператоре до 800...1000 °С (1073...1273 К). При этом способе нагрева величина угара составляет примерно 0,25...0,3%.

Метод нагрева в расплавленных солях применим для нагрева мелких заготовок под ковку и штамповку. Расплав включает в себя 70 % хлористого бария $BaCl_2$ и 30 % хлористого натрия $NaCl$. Длительность нагрева в расплавленных солях в два-три раза меньше, чем в камерной печи.

Нагрев в защитных газах проводят в муфельных печах, которые заполняют эндогазом (20% – CO , 40% – N_2 , 40% – H_2). Муфельные печи с защитной атмосферой применяются для нагрева мелких заготовок под точную штамповку.

Перспективным направлением в борьбе с угаром металла является нанесение защитных покрытий на поверхность заготовок перед нагревом.

Защитные покрытия должны отвечать целому ряду требований:

- быть доступными и технологичными в приготовлении;
- стойкими к механическим воздействиям;
- сохранять стабильность свойств при высоких температурах;
- равномерно распределяться по поверхности заготовок;
- не оказывать вредного воздействия на металл, инструмент, а также окружающую среду.

Примером защитных покрытий могут служить окись лития или расплавленное стекло. Помимо защиты металла от окисления и обезуглероживания покрытия, обладая высокими теплоизоляционными свойствами, обеспечивают улучшение тепловых условий работы деформирующего инструмента и работают как смазка. Отмечено уменьшение износа ковочных бойков на 30...40 %. Угар металла при использовании покрытий уменьшается в три-шесть раз.

Эффективная мера борьбы со снижением прочности металла вследствие обезуглероживания – дробеструйная обработка поковок. В результате такой обработки на поверхности изделия образуется наклепанный слой и создается определенный запас прочности.

4. ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

4.1. Роль трения при обработке металлов давлением

При обработке металлов давлением смещаемый объем деформируемого тела стремится к некоторому перемещению по поверхности инструмента. При этом возникают силы трения, затрудняющие это скольжение.

Процесс возникновения и преодоления сопротивления при сдвиге одного тела по поверхности другого называют контактным или внешним трением.

В механике, как известно, различают два вида трения: качения и скольжения. Для обработки металлов давлением в целом характерно трение скольжения. Основные отличия трения при ОМД и трения в деталях машин следующие:

1. При ОМД на поверхности трения действуют высокие давления, достигающие величин 250 МПа и более. В подшипниках скольжения общего назначения и узлах машин давление на поверхности трения не превышает значений 10...20 МПа.

2. При ОМД происходит значительное обновление поверхности контакта инструмента с деформируемым металлом в связи с общим увеличением поверхности последнего. В подшипниках же обновление поверхности контакта носит незначительный характер и происходит только в результате износа.

3. Смещение частиц металла по контактной поверхности трущихся деталей в машинах, как правило, одинаково во всех точках контакта, а при ОМД величина и скорость смещения различны для различных точек контакта.

Условия трения об инструмент во многом определяют эффективность процессов ОМД. За исключением отдельных операций (таких, как прокатка, вальцовка, некоторые операции листовой штамповки), трение при ОМД является вредным фактором, и предпринимаются все возможные меры для его снижения.

Отрицательная роль трения заключается в следующем.

1. Контактное трение ведет к возникновению неоднородности деформации или усиливает эту неоднородность, если последняя определяется самим характером осуществляемой операции. В результате может измениться схема напряженного состояния, задающаяся условиями нагружения. Например, наличие сил трения при осадке создает объемную схему напряжений, в то время как при отсутствии трения напряженное состояние было бы линейным.

Влияние действующих сил трения от контактных поверхностей распространяется в глубину деформируемого тела, таким образом создавая в нем зоны затрудненной деформации. В результате цилиндрическая заготовка приобретает бочкообразную форму.

2. Контактное трение в конечном итоге преодолевается дополнительной активной нагрузкой. Следовательно, чем значительнее контактное трение, тем большее необходимое деформирующее усилие и работа деформации требуются для осуществления самого процесса.

Увеличение усилия бывает весьма заметным – в несколько раз. Например, при прямом прессовании прутков (рис. 4.1) полное усилие прессования складывается из нескольких составляющих:

$$P = P_{\text{д}} + P_{\text{трк}} + P_{\text{трм}} + P_{\text{трп}},$$

где $P_{\text{д}}$ – усилие, затрачиваемое непосредственно на осуществление деформации без учета трения; $P_{\text{трк}}$, $P_{\text{трм}}$, $P_{\text{трп}}$ – усилия, затрачиваемые на преодоление сил трения, соответственно, на стенке контейнера, обжимающей части матрицы и калибрующем пояске матрицы.

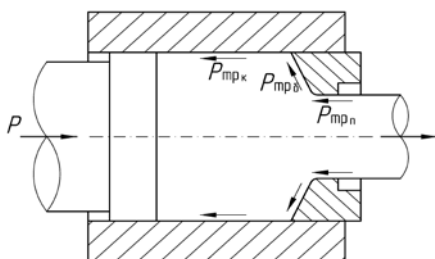


Рис. 4.1. Схема процесса прямого прессования прутка и направление действия сил трения

Увеличение любой из составляющих сил трения $P_{\text{тр}}$ приводит к повышению общего усилия прессования.

3. Контактное трение снижает стойкость инструмента как в результате непосредственного износа контактной поверхности, так и вследствие дополнительного разогрева поверхности и увеличения

напряжений в связи с ростом деформирующего усилия. Этот фактор имеет первостепенное значение, например, при волочении проволоки (рис. 4.2).

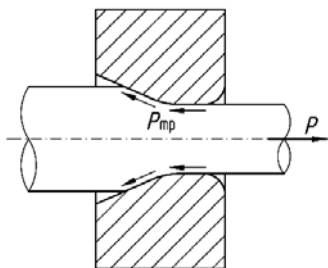


Рис. 4.2. Схема процесса волочения проволоки и направление действия сил трения

В отдельных случаях развитые силы трения являются необходимым условием осуществления процесса и для их повышения применяют специальные меры. Так, в момент захвата полосы валками при прокатке (рис.4.3), в месте контакта действуют силы трения, втягивающие полосу в зазор между валками. Для их усиления применяют даже специальные меры, например, наносят на поверхность валков насечки, увеличивая тем самым их шероховатость.

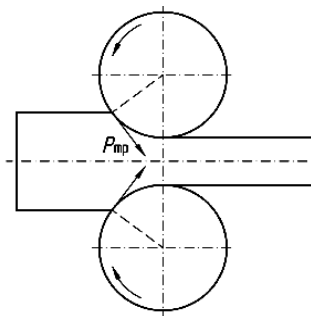


Рис. 4.3. Схема процесса прокатки полосы и направления действия сил трения

4.2. Виды трения. Законы трения

Трение обрабатываемого металла об инструмент происходит в присутствии и с участием третьих веществ. К ним относятся окислы обрабатываемого материала и инструмента, продукты истирания трущихся поверхностей, смазка и т.п.

Виды трения (режимы трения) предопределяются количеством и свойствами этих веществ, присутствующих на контактной поверхности, а также действующими на поверхности контакта нормальными напряжениями. Различают три вида трения: сухое, граничное и жидкостное (рис. 4.4).

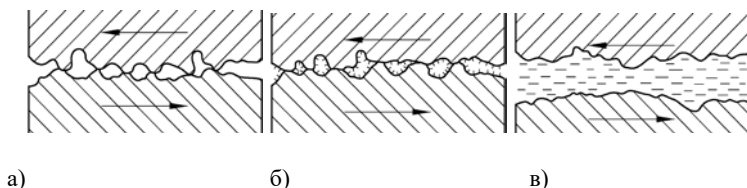


Рис. 4.4. Виды трения: а – сухое, б – граничное, в – жидкостное

Трение называют сухим, если поверхности обрабатываемого материала и инструмента находятся во взаимном контакте, свободны от третьих веществ и происходит относительное перемещение этих поверхностей в касательной к ним плоскости. В чистом виде такой вид трения при ОМД не встречается, поэтому на практике сухим трением называют трение несмазанных тел. Так, горячую прокатку проводят без смазки, поэтому трение при горячей прокатке условно называют сухим.

Трение называют граничным, если на поверхности трущихся тел адсорбированы вещества, существенно отличающиеся свойствами от материала инструмента и обрабатываемого тела и при этом имеет место механическое зацепление шероховатостей поверхностей контакта. Это наиболее часто встречающийся на практике вид трения. Он имеет место в случае применения смазки, содержащей поверхностно-активные вещества, которые адсорбируются на трущихся поверхностях и образуют прочные пленки. Такие пленки способны выдерживать высокие нагрузки и оказывают малое сопротивление сдвигу этих поверхностей. Однако толщина смазки так мала, что шероховатости изделия и инструмента находятся во взаимном зацеплении.

Трение называют жидкостным, если между трущимися поверхностями имеется слой смазки, выводящий из механического зацепления шероховатости этих поверхностей. Жидкостное трение – это внутреннее трение в объеме смазки. Оно нашло применение, например, при волочении проволоки. Ведутся работы по реализации этого вида трения в других процессах ОМД. Термин «жидкостное» трение условен, так как смазка может быть консистентной и даже твердой,

например парафин. Главное, чтобы не происходило соприкосновение трущихся поверхностей, а сопротивление деформации самой смазки было во много раз меньше сопротивления деформации обрабатываемого металла.

В практических условиях ОМД как сухое, так и жидкостное трение в чистом виде встречается редко. Это объясняется тем, что, с одной стороны, на металлическую поверхность всегда попадают вещества, препятствующие возникновению сухого трения. С другой стороны, при наличии даже обильной смазки в процессе деформирования металла происходит выдавливание смазывающей пленки, а также разрушение и потеря ее физических свойств, что приводит к появлению контактирующих участков, свободных от смазывающего слоя. Поэтому на практике наблюдается преимущественно граничное трение.

Законы трения

Напряжение трения, являющееся одним из показателей, характеризующих условия трения на контакте, в общем случае оказывают влияние такие факторы, как состояние поверхностей инструмента и деформируемого тела, величина давления, скорость и температура деформации, наличие и способ подачи смазки и др.

Математически эту зависимость можно записать как:

$$\tau = [\sigma_n, V_s, \sigma_s(\varepsilon, w, T), \alpha],$$

где τ – напряжение трения; σ_n – нормальное напряжение на контакте; V_s – скорость скольжения металла по инструменту; $\sigma_s(\varepsilon, w, T)$ – сопротивление металла деформации, зависящее от степени деформации ε , скорости деформации w и температуры деформации T ; α – характеристика физико-химического и механического состояния контактных поверхностей.

Из-за сложности описания одновременного влияния на напряжение трения всех перечисленных факторов на практике используют упрощенные законы трения.

Согласно закону трения Амонтона-Кулона напряжение трения τ пропорционально нормальному напряжению на поверхности контактирующих тел σ_n и не зависит от сопротивления деформации металла σ_s , т.е.

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n, \quad (4.1)$$

где μ – коэффициент трения, изменяющийся в пределах от 0,1 до 0,5.

В отношении выражения (4.1) необходимо сделать существенное ограничение. По условию пластичности максимальная величина касательного напряжения τ_{\max} не может быть больше сопротивления деформации сдвига металла τ_s , т.е. $\tau \leq \tau_s$. Величина τ_s связана с величиной сопротивления деформации σ_s соотношением

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}.$$

Поэтому более целесообразно, особенно при горячей деформации, принимать трение не зависящим от нормальной нагрузки и выражать его в долях от величины τ_s . Этот закон получил название закона трения по Зибелю и формулируется так: напряжение трения τ пропорционально среднему по области пластической деформации сопротивлению деформации сдвига τ_s и не зависит от приложенного нормального напряжения σ_n , т.е.

$$\tau = \psi \cdot \tau_s, \quad (4.2)$$

где ψ , в отличие от кулоновского коэффициента трения, называют показателем трения, изменяющимся в пределах от 0,2 до 1.

Области применения того или иного закона трения наглядно иллюстрируются графической зависимостью, приведенной на рис. 4.4, а также данными, приведенными в табл. 4.1.

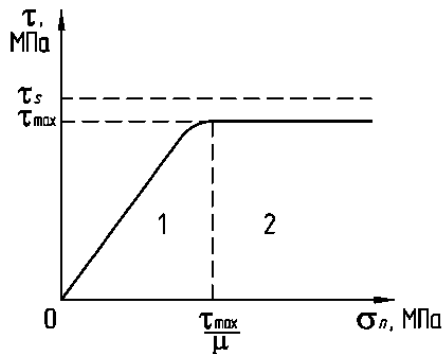


Рис. 4.4. Диаграмма, характеризующая области применения того или иного закона трения

Таблица 4.1. Факторы, отражающие области предпочтительного применения того или иного закона трения

Закон трения	Вид деформации (обработки)	Схема напряженного состояния	Величина степени деформации	Значение нормальных напряжений	Пример процесса ОМД
Амонтона-Кулона $\tau = \mu \cdot \sigma_n$	холодная	Сочетание сжимающих и растягивающих напряжений	При малых степенях деформаций	При умеренных значениях	Листовая прокатка, листовая штамповка, волочение
Зибеля $\tau = \psi \cdot \tau_s$	горячая	С достаточно ярко выраженным всесторонним сжатием	При больших степенях деформаций	При высоких значениях	Прессование, объемная штамповка, ковка

4.3. Влияние различных факторов на коэффициент (показатель) трения

На величину показателя действующих на поверхности контакта элементарных сил трения оказывает влияние ряд факторов: состояние поверхности деформирующего инструмента, состояние поверхности и химический состав обрабатываемого металла, температура деформации, скорость относительного скольжения металла по инструменту, наличие смазки на контактной поверхности и др.

Состояние рабочей поверхности инструмента определяется качеством обработки ее при изготовлении инструмента, а также степенью износа в процессе эксплуатации.

Чем выше качество обработки поверхности инструмента, тем меньше при прочих равных условиях коэффициент трения. Влияние обработки настолько значительно, что величина коэффициента трения различна в зависимости от направления скольжения металла по отношению к направлению обработки.

Вид обработки контактной поверхности деформируемого тела имеет значение лишь в начальный момент деформации. При ее дальнейшем развитии контактная поверхность деформируемого металла сглаживается и становится как бы отпечатком поверхности инструмента.

Чем больше твердость инструмента, тем ниже коэффициент трения. Так, например, при волочении проволоки наибольший коэффициент трения наблюдается при использовании стальных волок, меньший – твердосплавных и еще меньший – алмазных.

Влияние температуры обрабатываемого металла на коэффициент трения проявляется через изменение сопротивления деформации и физико-химических свойств окалины, образующей при нагреве промежуточный слой между металлом и инструментом. Установлено, что при повышении температуры коэффициент трения сначала растет, достигает максимального значения, а затем уменьшается. Такой характер зависимости можно объяснить тем, что сначала коэффициент трения растет в связи с окислением поверхности и образованием в этом интервале температур твердой окалины. При дальнейшем повышении температуры происходит размягчение окалины и она начинает играть роль смазки, снижая коэффициент трения.

Коэффициент трения несколько снижается с увеличением относительной скорости скольжения металла по поверхности инструмента, т.е. с увеличением скорости деформирования. Чем больше скорость, тем меньше длительность контакта на площадках соприкосновения инструмента и деформируемого тела, а следовательно меньше роль молекулярного взаимодействия. В частности, коэффициент трения при обработке на молоте будет меньше, чем при обработке в сопоставимых условиях того же металла на прессе.

При обработке давлением широко применяют смазки, основное назначение которых – снижение коэффициента трения. Смазка образует промежуточный слой между деформируемым телом и инструментом, полностью или частично изолирующий их друг от друга. Для этого она должна иметь достаточную активность и вязкость.

5. СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Сопротивление металлов пластической деформации является важной характеристикой свойств обрабатываемого металла, позволяющей судить о его прочности, а следовательно и о тех нагрузках, которые необходимо развить, чтобы осуществить пластическую деформацию металлов. Кроме того, величина сопротивления деформации входит в расчетные аналитические формулы в виде множителя (например, в физические уравнения связи напряженного и деформированного состояний), поэтому точность при ее нахождении в значительной степени определяет точность того или иного расчетного метода.

Сопротивлением металла пластической деформации называют напряжение одноосного растяжения или сжатия σ_s (МПа) в условиях развитой пластической деформации.

Методов определения сопротивления деформации металлов существует много, но основными (стандартизованными) являются растяжение и сжатие образцов с цилиндрической рабочей частью.

Испытание на растяжение является одним из распространенных и простых методов определения σ_s , поскольку именно этим способом проще всего достигается одноосное напряженное состояние, которое сохраняется в образце до образования шейки.

В справочниках указывается величина предела текучести σ_T или условный предел текучести $\sigma_{0,2}$. Их определяют как частное от деления нагрузки в момент начала пластической деформации образца на его исходную площадь поперечного сечения. При больших деформациях образца, которые наступают за пределом текучести, необходимо определять истинное напряжение, равное частному от деления силы в определенный момент времени на площадь поперечного сечения образца в тот же момент.

Сопротивление металла пластической деформации определяют по формуле:

$$\sigma_s = \frac{P}{F},$$

где P – сила, F – текущая площадь поперечного сечения образца.

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = F_0 \frac{l_0}{l} = F_0 \frac{l_0}{l_0 + \Delta l},$$

где $l = l_0 + \Delta l$ текущая длина образца.

Степень деформации сдвига при развитом пластическом растяжении:

$$\lambda = \sqrt{3} \cdot \ln \frac{l}{l_0}.$$

В зависимости от вида характеристики относительной деформации при растяжении в качестве ее показателя наряду с λ могут выступать:

- а) истинная деформация $\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0}$;
- б) относительное удлинение $\delta = \frac{l - l_0}{l_0}$;
- в) относительное сужение $\psi = \frac{F + F_0}{F_0}$.

В пределах равномерного удлинения образца, т.е. до момента образования шейки, между ними легко установить определенные соотношения, воспользовавшись условием постоянства объема. Так, например:

$$\lambda = \sqrt{3} \cdot \ln \frac{l}{l_0} = \sqrt{3} \cdot \ln(\delta + 1).$$

Интенсивность касательных напряжений, соответствующая сопротивлению металлов пластической деформации:

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{6} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения.

При одноосном растяжении $\sigma_1 = \sigma_s, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$.

С учетом этого величина сопротивления деформации сдвига τ_s :

$$\tau_s = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}.$$

5.1. Связь между напряжениями и деформациями

При упругой деформации связь между главными напряжениями и главными относительными деформациями выражается обобщенным законом Гука:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)], \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3)],$$
$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)],$$

где ν – коэффициент Пуассона, величина которого зависит от материала, при пластической деформации становится константной.

Если вычислить приращение ΔV объема куба, длина ребра которого в исходном состоянии равна единице, то получим $\Delta V = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$. Если подставить в полученное выражение значения величин $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ из общего закона Гука, то получим $\nu = 1/2$.

В теории пластичности доказано, что соотношения между главными напряжениями и главными относительными пластическими деформациями можно выразить уравнениями, аналогичными по конструкции обобщенному закону Гука, с использованием модуля пластичности E_1 :

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1} \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right), \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E_1} \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right),$$
$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E_1} \left(\sigma_3 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right).$$

Модуль пластичности E_1 зависит не только от материала, но и от температуры, скорости деформации и упрочнения, что затрудняет определение величины пластической деформации по известным напряжениям. С.И. Губкин для иллюстрации связи между напряжениями и деформациями предложил понятие механических схем деформации.

Механическая схема деформации – это совокупность схемы главных напряжений и схемы главных деформаций. Она показывает в каких сочетаниях могут встречаться в процессах ОМД схемы главных напряжений и главных деформаций. Реальны 23 механические схемы деформации.

При известных главных напряжениях $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ всегда можно определить схему деформации. Однако при известных главных деформациях для определения схемы напряженного состояния необходимо знать ещё модуль пластичности E_1 .

5.2. Условия пластичности

Пластическая деформация в теле начинается только при определенном, критическом напряженном состоянии. Экспериментально доказано, что при линейном растяжении, например, пластическая деформация начинается тогда, когда нормальное напряжение σ_n достигает предела текучести σ_T .

В ОМД пределом текучести называют истинное нормальное напряжение, т.е. усилие на единицу площади сечения образца в данный момент времени деформации при линейном растяжении с учетом температуры, скорости и степени деформации.

При линейном растяжении условие перехода от упругого состояния к пластическому выражается равенством $\sigma_n = \sigma_T$.

$$\sigma_T = \frac{\tau_T}{2} = \frac{\tau_{\max}}{2},$$

где τ_T – предел текучести при сдвиге.

В самом общем случае (объемное напряжение состояния), очевидно, условие перехода от упругого состояния к пластическому, которое называют условием пластичности, должно отражать связь трех главных напряжений с пределом текучести. Одна из формулировок Губера-Мизеса следующая: пластическая деформация в любой точке тела возникает и поддерживается, когда интенсивность напряжений достигает предела текучести $\sigma_i = \sigma_T$.

В общем случае пластическая деформация в теле начнется в тот момент, когда удельная потенциальная энергия изменения формы тела достигнет определенной критической для данного вещества величины. Потенциальная энергия изменения формы тела не зависит от схемы напряженного состояния. Исходя из этого, получено основное уравнение пластичности в следующем виде:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_T^2, \quad (5.1)$$

где σ_T – предел текучести.

Пусть $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Для упрощения (5.1) рассмотрим три случая:

$$\sigma_1 = \sigma_2, \text{ тогда } \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T;$$

$$\sigma_2 = \sigma_3, \text{ тогда } \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T;$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}, \text{ тогда } \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T.$$

Следовательно, при любом значении среднего главного напряжения уравнение пластичности можно записать в виде $\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_T$, где коэффициент β изменяется в пределах $1 \leq \beta \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \leq 1,155$.

Наибольшее влияние среднее напряжение оказывает при плоской деформации тонкого листа:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}.$$

Аналогично характеристике интенсивности напряжений σ_i существует и характеристика деформации ε_i , определяемая из зависимости:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}.$$

Эта зависимость называется интенсивностью деформацией или обобщенной деформацией.

5.3. Сопротивление деформации при холодной и горячей обработке

Основным показателем, влияющим на сопротивление деформации при холодной обработке, является степень деформации. Зависимость между сопротивлением деформации σ_s и степенью деформации ε изображают кривыми упрочнения. При холодной обработке металлов давлением с увеличением степени деформации повышаются все показатели прочности, в том числе и сопротивление деформации. Увеличение σ_s особенно интенсивно происходит на начальных стадиях деформации (до $\varepsilon \approx 0,5$ %), при дальнейшем повышении степени деформации интенсивность упрочнения снижается (рис. 5.1).

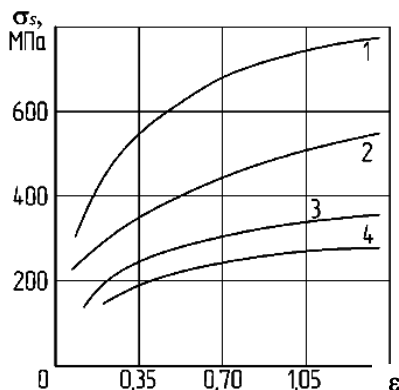


Рис. 5.1. Кривые упрочнения для некоторых металлов и сплавов: 1 – никель НП2; 2 – латунь Л63; 3 – медь М1; 4 – дюралюминий Д1

Кривыми упрочнения можно пользоваться для анализа характера и степени влияния упрочнения на величину необходимых при обработке давлением усилий деформирования. С этой целью широкое распространение получила свойственная холодной обработке так называемая гипотеза единой кривой, сущность которой заключается в следующем. Функции, связывающие инвариантные характеристики напряженного и деформированного состояний, не зависят от вида деформации (растяжение, сжатие, кручение и т.п.), какими они получены и определяются в простейших опытах. Эти результаты используются затем при анализе сложных процессов обработки давлением. Необходимо правильно рассчитать степень деформации и интенсивность напряжений.

Для облегчения аналитического решения задачи по установлению влияния упрочнения на величину усилия деформирования и на распределение напряжений в деформируемом теле кривая упрочнения представляется в виде уравнения, связывающего сопротивление деформации со степенью деформации.

Математическая модель, удовлетворительно описывающая кривую упрочнения для развитых деформаций, существенно превышающих упругие, имеет вид:

$$\sigma_s = B \cdot \varepsilon^n,$$

где B и n – эмпирические коэффициенты деформационного упрочнения, которые выбирают из условия аппроксимации опытных данных.

При построении кривых упрочнения и при анализе процессов деформации необходимо учитывать, что при холодной деформации около 90 % работы переходит в тепло и что происходящий разогрев существенно влияет на ход кривых упрочнения, особенно при высоких скоростях деформации.

Сопротивление деформации σ_s при горячей обработке, в общем случае, зависит от степени деформации ε , температуры T , скорости деформации W и истории деформирования $\varepsilon(t)$. При изучении процессов, происходящих в металле при повышенных температурах, вводят понятие гомологической или сходственной температуры T , под которой понимают отношение текущей изучаемой температуры к температуре плавления $T_{пл}$ данного металла (выражается в кельвинах).

В отличие от холодной обработки давлением, сопротивление деформации при горячей обработке давлением в значительной степени зависит от скорости деформации.

В теории ОМД принято сопротивление деформации при горячей обработке представлять в зависимости от степени деформации при постоянной скорости деформирования и температуре испытания.

6. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Пластическое деформирование в обработке металлов давлением осуществляется при различных схемах напряженного и деформированного состояний, при этом исходная заготовка может быть объемным телом, прутком, листом.

Основными схемами деформирования объемной заготовки являются:

- сжатие между плоскостями инструмента – ковка;
- ротационное обжатие вращающимися валками – прокатка;
- затекание металла в полость инструмента – штамповка;
- выдавливание металла из полости инструмента – прессование;
- вытягивание металла из полости инструмента – волочение

По назначению процессы обработки металлов давлением группируют следующим образом:

1) для получения изделий постоянного поперечного сечения по длине (прутков, проволоки, лент, листов), применяемых в строительных конструкциях или в качестве заготовок для последующего изготовления деталей – прокатка, волочение, прессование;

2) для получения деталей или заготовок, имеющих формы и размеры, приближенные к размерам и формам готовых деталей, требующих механической обработки для придания им окончательных размеров и заданного качества поверхности – ковка, штамповка.

Первую группу можно объединить под общим наименованием прокатно-волочильного производства, а вторую – под общим наименованием кузнечно-штамповочного производства.

Рассмотрим принципиальные схемы основных способов ОМД.

6.1. Научные основы технологических процессов прокатки

Прокатка – это способ обработки пластического деформирования, при котором заготовка обжимается (сдавливается), проходя в зазор между вращающимися валками. При этом заготовка уменьшается в своём поперечном сечении и увеличивается в длину. Форма поперечного сечения называется профилем.

Процесс прокатки обеспечивается силами трения между вращающимся инструментом и заготовкой, благодаря которым заготовка перемещается в зазоре между валками. В момент захвата металла со стороны каждого валка действуют на металл две силы: нормальная сила N и касательная сила трения T (рис. 6.1).

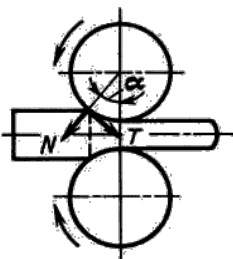


Рис. 6.1. Схема сил, действующих при прокатке

При пластической деформации изменяется не только форма и размеры деформированного тела, но и структура материала. В процессе прокатки литые заготовки подвергают многократному обжатию в валках прокатных станов, в результате чего повышается плотность материала за счёт залечивания литейных дефектов, пористости, микротрещин. Это придаёт заготовкам из проката высокую прочность и герметичность при небольшой их толщине.

Напряженное состояние полосы при прокатке характеризуется трехосным сжатием (рис. 6.2), причем в обычных условиях прокатки продольное главное напряжение σ_3 является минимальным, поперечное σ_2 – средним, а вертикальное σ_1 – максимальным. Т.к. деформация металла происходит главным образом в направлении наименьшего главного напряжения, то обжимаемый металл при прокатке устремляется преимущественно в продольном направлении.

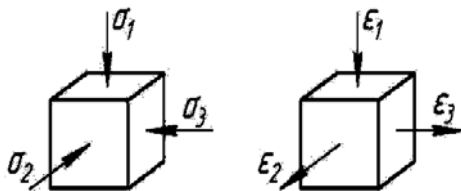


Рис. 6.2. Напряженно-деформированное состояние металла при прокатке

6.1.1. Геометрия очага деформации при прокатке

При продольной прокатке пластической деформации одновременно подвергается не весь объем обрабатываемого металла, а только его небольшая часть, находящаяся вблизи валков (рис. 6.3). Эту часть металла называют очагом деформации. Различают геометрический очаг деформации и фактический очаг деформации. Геометрический очаг деформации l – это объем прокатываемого металла AA_1B_1B , заключенный между валками прокатного стана, а также плоскостями входа AA_1 металла в валки и выхода BB_1 металла из валков. Экспериментально установлено, что пластическая деформация распространяется и на зоны прилегающего к плоскостям входа и выхода – это зоны вне контактной деформации. На рис. 6.3 видно две зоны вне контактной деформации $3 MA-A_1M_1$ и $2 VD_1V_1$. С учетом этого объем металла, включающий геометрический очаг деформации и вне контактной зоны – это фактический очаг деформации.

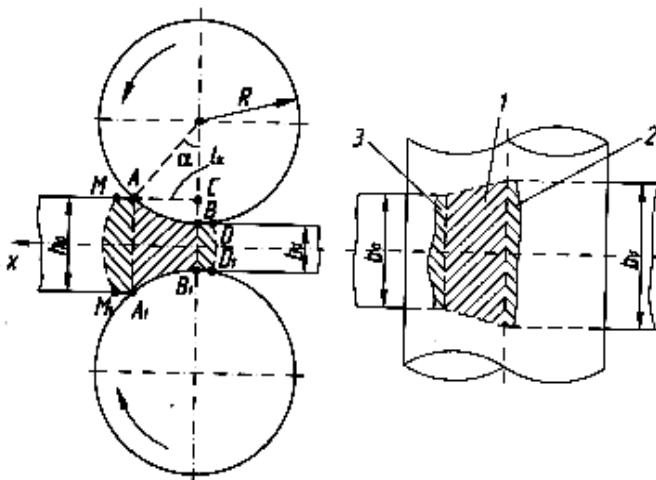


Рис. 6.3. Геометрия очага деформации при прокатке

Дуга AB , по которой деформируемый металл контактирует с валками – дуга захвата. Центральный угол α , соответствующий дуге захвата AB – угол захвата. Проекция очага деформации на горизонтальную ось – длина очага деформации – l .

Фактическая длина очага деформации зависит от многих факторов и обычно меняется от 1,2 до 1,7 от длины геометрического очага деформации.

Таким образом, форма геометрического очага деформации при прокатке характеризуется:

- 1 – углом захвата α ;
- 2 – высотами сечения h_0 и h_1 ;
- 3 – длиной очага деформации l_d ;
- 4 – начальной и конечной шириной полосы b_0 и b_1 .

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta h}{D}.$$

При малых углах

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \quad AB \approx l_k \approx \sqrt{R \cdot \Delta h}.$$

При прокатке различают три периода: неустановившийся, установившийся и выброс (рис. 6.4).

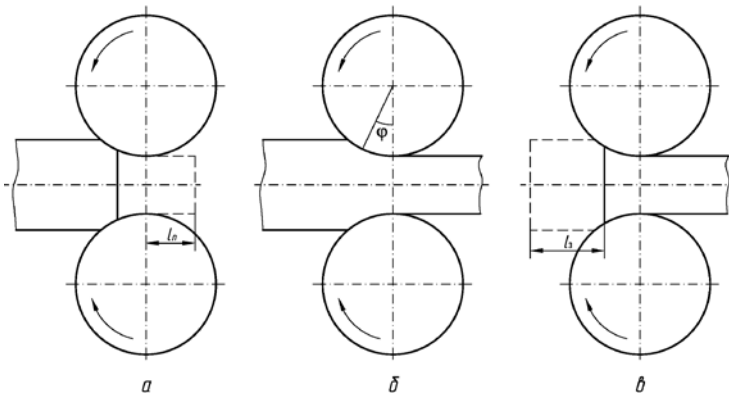


Рис. 6.4. Периоды прокатки: а – захват; б – установившийся процесс; в – выброс

В период захвата происходит заполнение зазора между валками металлом (рис. 6.4, а). По мере продвижения переднего торца полосы через валковую щель изменяются коэффициенты деформации, площадь контактной поверхности, давление на валки и другие параметры. Процесс прокатки неустойчив. Только после того, как передний конец полосы выйдет из валков на некоторое расстояние, процесс прокатки стабилизируется (рис. 6.4, б). Также неустановившийся характер имеет процесс выброса полосы из валков (рис. 6.4, в). Как только длина заднего конца полосы сократится до некоторого размера l_s , начинают изменяться основные параметры прокатки.

Поэтому основной период прокатки установившийся (рис. 6.4, б). В этот период все параметры прокатки во времени не изменяются.

При установившемся процессе прокатки через любое поперечное сечение очага деформации в единицу времени проходит одинаковое количество металла. Это условие в теории прокатки называется условием постоянства секундных объемов и математически записывается так:

$$F_j v_j = \text{const},$$

где F_j – площадь поперечного сечения полосы под произвольным углом φ (рис. 6.4, б).

При установившейся стадии прокатки скорость выхода полосы металла из валков превышает скорость самих валков в направлении прокатки. Скорость металла при выходе из валков v_1 несколько больше окружной скорости вращения валков v , а скорость при входе v_0 – меньше, т.е. $v_1 > v > v_0$.

В зоне деформации есть такое сечение, в котором горизонтальная составляющая окружной скорости вращения валков равна скорости движения металла (рис. 6.5).

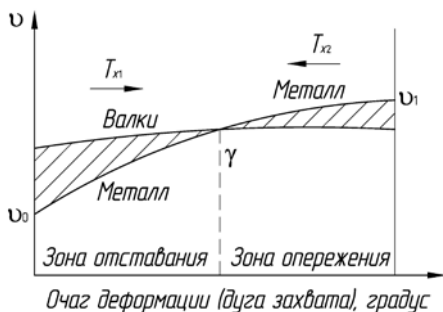


Рис. 6.5. Очаг деформации при прокатке узких полос

Это сечение называется нейтральным или критическим. Влево от нейтрального сечения скорость движения металла меньше скорости движения валков. Эта зона называется зоной отставания. Вправо от нейтрального сечения скорость движения металла больше скорости вращения валков. Эту часть зоны деформации называют зоной опережения.

Опережение металла определяется отношением разности скоростей движения металла и вращения валков и выражается в процентах:

$$S = \frac{v_1 - v}{v} \cdot 100\% ,$$

где v_1 – скорость при выходе из валка; v – окружная скорость вращения валков.

Опережение при прокатке тем больше, чем больше радиус валков и меньше толщина полосы, оно увеличивается также с ростом коэффициента трения и может составлять 3...10 %. Учет опережения и отставания необходим при определении частоты вращения валков в связи с режимом обжатия в непрерывно расположенных клетях для предотвращения петлеобразования.

При прокатке, наряду с удлинением металла в направлении прокатки, имеет место значительная деформация в поперечном направлении (уширение), оказывающая существенное влияние на характер протекания процесса прокатки. Уширение является нежелательным фактором при прокатке, т.к. вызывает появление растягивающих напряжений в боковых кромках полосы и образование трещин. В связи с этим при прокатке следует стремиться к исключению действия факторов, вызывающих интенсивную деформацию в поперечном направлении. Уширение пропорционально обжатию, оно зависит от толщины и ширины прокатываемой заготовки.

Уширение металла увеличивается в следующих случаях:

1) При возрастании диаметра валков. Чем он больше, тем протяженнее зона деформации, больше силы трения. Следовательно больше сопротивление деформации в продольном направлении и больше уширение.

2) При увеличении коэффициента трения. С увеличением коэффициента трения появляется избыток сил трения в продольном направлении, уменьшается продольная деформация и увеличивается уширение.

3) При снижении температуры металла в процессе горячей обработки.

Уширение уменьшается:

1) При увеличении числа проходов. Это связано с тем, что длина очага деформации уменьшается при сохранении его поперечных размеров, поэтому уменьшаются продольные напряжения по отношению к поперечным напряжениям, что снижает уширение.

2) С ростом ширины проката. Чем шире полоса, тем больше влияние трения в поперечном направлении и тем меньше уширение.

3) Уширение снижается с ростом скорости прокатки.

При промышленной прокатке из всех перечисленных выше факторов, влияющих на уширение, большинство жестко задано маркой сплава, конструкцией стана, технологическими ограничениями. Единственным параметром, которым можно реально управлять, является обжатие и число проходов.

6.1.2. Способы прокатки

Процессы прокатки принято классифицировать по разным признакам:

1. В зависимости от направления обработки различают продольную, поперечную и винтовую прокатки.

2. По режиму работы станов прокатка бывает непрерывной и реверсивной.

3. По состоянию металла различают горячую и холодную прокатку.

4. По виду изделия прокатка может быть листовая и сортовая.

5. Рабочие валки могут быть с гладкой бочкой или с нарезными калибрами. Наиболее распространенным является процесс прокатки в двух валках.

Существуют три основных способа прокатки, имеющих определенное отличие по характеру выполнения деформации: продольная, поперечная, поперечно-винтовая (рис. 6.6).

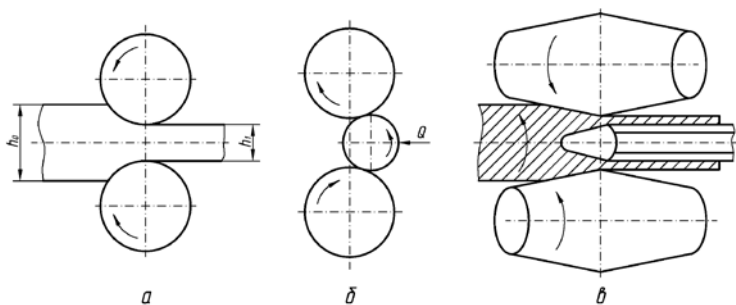


Рис. 6.6. Схемы основных видов прокатки:
а – продольная; б – поперечная; в – поперечно-винтовая

При продольной прокатке деформация осуществляется между вращающимися в разные стороны валками (рис. 6.6, а). Заготовка втягивается в зазор между валками за счёт сил трения. При продольной прокатке металл деформируется (обжимается) и перемещается перпендикулярно осям валков; при этом уменьшается площадь поперечного сечения заготовки и увеличивается (главным образом) ее длина. Этим способом изготавливается около 90% проката: весь листовой и профильный прокат.

Поперечная прокатка (рис. 6.6, 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.

Поперечно-винтовая прокатка (рис. 6.6, в). Валки, вращающиеся в одну сторону, установлены под углом друг другу. Прокатываемый металл получает ещё и поступательное движение. В результате сложения этих движений каждая точка заготовки движется по винтовой линии. Применяется для получения пустотелых трубных заготовок и периодического проката.

6.1.3. Технологический процесс прокатки

Исходным продуктом для прокатки могут служить квадратные, прямоугольные или многогранные слитки, прессованные плиты или кованные заготовки. Когда требуется высокая прочность и пластичность, применяют заготовки из сортового или специального проката.

Основными технологическими операциями прокатного производства являются подготовка исходного металла, нагрев, прокатка и отделка проката.

Подготовка исходных металлов включает удаление различных поверхностных дефектов (трещин, царапин, закатов), что увеличивает выход готового проката.

Нагрев слитков и заготовок обеспечивает высокую пластичность, высокое качество готового проката и получение требуемой структуры. Необходимо строгое соблюдение режимов нагрева. Соблюдение установленных режимов нагрева, правильный выбор температуры начала и конца прокатки, а также режимы обжатия влияют не только на качество готовой продукции, но и на производительность стана.

Основное требование при нагреве: равномерный прогрев слитка или заготовки по сечению и длине до соответствующей температуры за минимальное время с наименьшей потерей металла в окалину и экономным расходом топлива.

Во время прокатки проверяют настройку валков, состояние калибров, заданный режим обжатия. Для контроля за состоянием поверхности проката регулярно отбирают пробы.

После прокатки контроль продолжают во время отделочных операций (резка полос на мерные длины, правки, удаление поверхностных дефектов и т.д.). Готовый прокат подвергают конечному механическому контролю.

Прокатный стан – комплекс машин для деформирования металла во вращающихся валках и выполнения вспомогательных операций (транспортирование, нагрев, термическая обработка, контроль и т.д.).

Оборудование для деформирования металла 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 рис. 6.7.

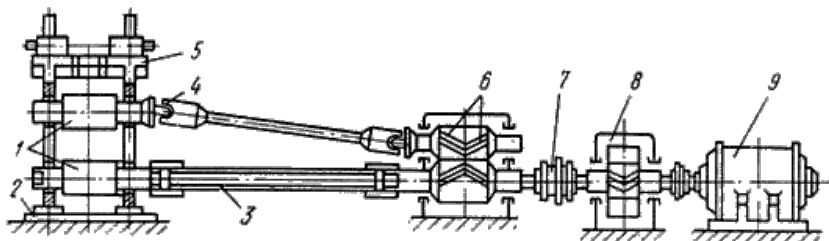


Рис. 6.7. Схема главной линии прокатного стана:

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

Прокатные валки 1 установлены в рабочей клетке 5, которая воспринимает давление прокатки. Определяющей характеристикой рабочей клетки являются размеры прокатных валков: диаметр (для сортового проката) или длина (для листового проката) бочки.

В зависимости от числа и расположения валков в клетке станы разделяют на двухвалковые станы (дуо), трехвалковые (трио-станы), четырехвалковые (кватро), многовалковые, универсальные с горизонтальным расположением валков, с вертикальными валками, с горизонтальными и вертикальными и косорасположенными валками.

Двухвалковые станы (дуо) (рис. 6.8, а) имеют в каждой клетке по два валка. Могут быть с вращением валков в одну сторону – нереверсивные и с переменным направлением вращения для осуществления прокатки в обе стороны – реверсивные. Нереверсивные станы применяются для прокатки заготовок и сортового металла, тонких листов и труб. Реверсивные станы применяются для прокатки крупных профилей и толстых листов на блюмингах, слябингах, рельсобалочных и других станах.

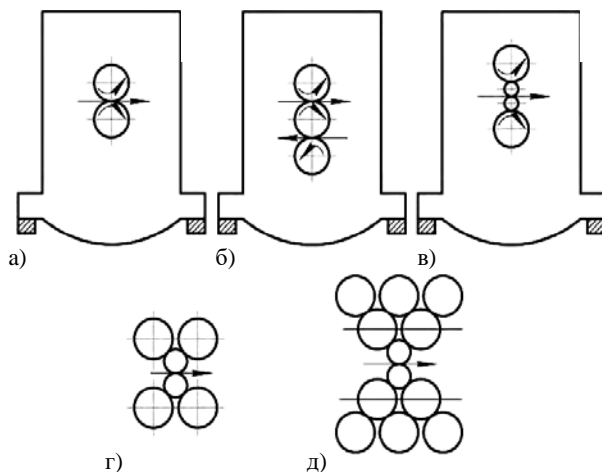


Рис. 6.8. Виды прокатных станов

Трехвалковые (трио-станы) (рис. 6.8, б) имеют три прокатных валка с постоянным направлением вращения, расположенных в одной вертикальной плоскости. Металл в трехвалковых клетях дви-

жется в одну сторону между нижним и верхним, а в обратную – между средним и верхним валками. Подъем прокатываемой полосы для подачи ее между верхним и средним валками осуществляется подъемно-качающимися столами, установленными с одной или обеих сторон клетки. К этому типу станом относят сортовые линейные станы.

Многовалковые станы (рис. 6.8, в, г, д), к которым относятся четырехвалковые (кватро-станы), шестивалковые (сексто-станы), двенадцативалковые и двадцативалковые, имеют два рабочих валка, а остальные являются поддерживающими – опорными, вращающимися от трения. В четырех- и шестивалковых станах приводными являются опорные валки. Такие конструкции позволяют применять рабочие валки малого диаметра, благодаря чему увеличивается вытяжка, уменьшается уширение и снижается давление металла на валки. Четырехвалковые станы используются для горячей и холодной прокатки листов, лент, все же остальные – исключительно для холодной прокатки тонких листов и лент.

Универсальные станы кроме горизонтальных валков имеют также вертикальные валки. Изменяя расстояние между валками, можно получить на стане любой прямоугольный профиль, вследствие чего указанные станы и получили название универсальных. Эти станы применяются для прокатки листовой заготовки – слябов и широких длинных полос (шириной более 200 мм), а также для прокатки широкополосных двутавровых балок высотой от 300 до 1200 мм.

При расчете на прочность валков и других деталей рабочей клетки прокатного стана и при определении мощности двигателя необходимо знать общее (полное) давление металла на валки в процессе прокатки. Полное давление определяют по формуле

$$P = P_{\text{cp}} \cdot F,$$

где P_{cp} – среднее удельное давление; F – горизонтальная проекция контактной площади металла с валком.

Контактная площадь определяется произведением средней ширины полосы в очаге деформации на длину очага деформации. Для сложных профилей контактная площадь определяется графически или по приближенным формулам. Среднее удельное давление металла на валки определяют по формулам или находят опытным путем. При определении мощности двигателя сначала находят крутящий момент, необходимый для прокатки.

Правка проката

Изделия, полученные прокаткой, часто требуют правки. 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 (рис. 6.9)

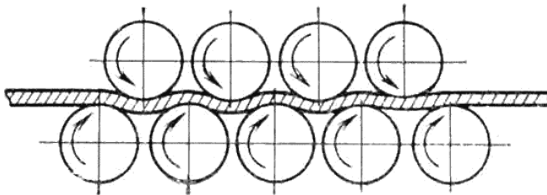


Рис. 6.9. Схема правки проката на роликоправильных машинах с параллельно расположенными роликами

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. Диаметр роликов – 25...370 мм, шаг – 30...400 мм. Количество роликов: для тонких листов – 19...29, для толстых – 7...9.

Продукция прокатного производства

Форма поперечного сечения называется профилем проката. Совокупность профилей различной формы и размеров – сортament.

В зависимости от профиля прокат делится на четыре основные группы: листовой, сортовой, трубный и специальный. В зависимости от того нагретая или холодная заготовка поступает в прокатные валки – горячий и холодный.

Листовой прокат из стали и цветных металлов подразделяется на толстолистовой (4...60 мм), тонколистовой (0,2...4 мм) и жель (фольгу) (менее 0,2 мм). Толстолистовой прокат получают в горячем состоянии, другие виды листового проката – в холодном состоянии.

Прокатку листов и полос проводят в гладких валках.

Среди сортового проката различают:

- заготовки круглого, квадратного и прямоугольного сечения дляковки и прокатки;
- простые сортовые профили (круг, квадрат, шестигранник, полосо, лента);
- фасонные сортовые профили;
- профили общего назначения (уголок, швеллер, тавр, двутавр);
- профили отраслевого назначения (железнодорожные рельсы, автомобильный обод);
- профили специального назначения (профиль для рессор, напильников).

Трубный прокат получают на специальных трубопрокатных станах. Различают бесшовные горячекатаные трубы диаметром 25...550 мм и сварные диаметром 5...2500 мм. Трубы являются продуктом вторичного передела круглой и плоской заготовки.

Изготовление бесшовных труб в основном состоит из двух операций:

1. Прошивки цилиндрической заготовки на стане косо́й прокатки, в результате которой получается трубная заготовка с диаметром и толщиной стенок большими, чем у готовой трубы.

2 Раскатка гильзы на готовую трубу на станах периодических или автоматических.

Прошивной стан с бочкообразными валками имеет два рабочих валька с двойной конусностью диаметром от 450 до 1000 мм, расположенных в горизонтальной плоскости. Оси валков в вертикальной плоскости наклонены друг к другу под углом 4...14°. Оба валька вращаются в одном направлении (рис.6.10).

Силы трения направлены по касательной между вальками и заготовкой. Заготовка будет вращаться в направлении обратном валькам, при этом она получает поступательное винтовое движение. В заготовке возникают внутренние напряжения, вызывающие течение металла от центра в радиальном направлении, что приводит к образованию внутренней полости.

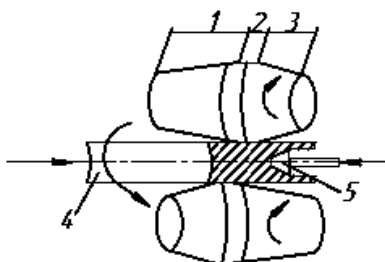


Рис. 6.10. Схема прошивки цилиндрической заготовки: 1 – подготовительный участок; 2 – участок поперечной прокатки; 3 – отделочный участок; 4 – заготовка; 5 – оправка (дорн)

Для получения отверстия нужного диаметра и с гладкой поверхностью прокатку ведут с применением оправки-пробки (дорн), удерживаемой на стержне. На этих станах прокатывают трубные заготовки диаметром от 60 до 650 мм с толщиной стенки гильзы от 10 до 100 мм. Полученные заготовки раскатывают в горячем состоянии на периодических станах. Валки их имеют круглый калибр переменного сечения. Металл подается в валки навстречу их вращению. На этом стане производится прерывно-периодическая (пилигримовая) раскатка горячей гильзы в трубу на цилиндрической оправке. На периодических станах получают трубы диаметром от 50 до 615 мм при длине от 10 до 30 м. Толщина стенки трубы от 2,5 до 8 мм.

При изготовлении труб сваркой требуются следующие основные операции: получение плоской заготовки (полосы, штрипса), свертывание заготовки, сварка трубы, калибровка, отделка и правка.

Сварные трубы получают несколькими способами: печной сваркой, электрической и газовой сваркой.

Наиболее распространен способ прокатки труб печной сварки на непрерывном стане. Заготовку-полосу нагревают в газовой печи длиной 40 м до сварочной температуры 1300...1350°C и она поступает в стан. В шестивалковом стане заготовка свертывается в трубу и прижатые одна к другой кромки свариваются. Диаметр таких труб от 10 до 114 мм при толщине стенки 2–5 мм.

Наибольшее распространение получил способ контактной сварки сопротивлением. Получают трубы диаметром от 6 до 630 мм толщиной стенки от 0,15 до 20 мм. Способом электродуговой сварки под слоем флюса изготавливают трубы большого диаметра, которые используются для транспортировки газа, нефти и нефтепродуктов.

Трубы с прямым швом изготавливают диаметром 426–1420 мм при толщине стенки 6–13 мм, а трубы со спиральным швом – диаметром 150–720 мм при толщине стенки 5–10 мм.

6.2. Научные основы технологических процессов прессования

Прессование – вид обработки давлением, при котором металл выдавливается из замкнутой полости через отверстие в матрице, соответствующее сечению прессуемого профиля.

Существуют два основных метода получения изделий прессованием металла: прямой и обратный (рис. 6.11).

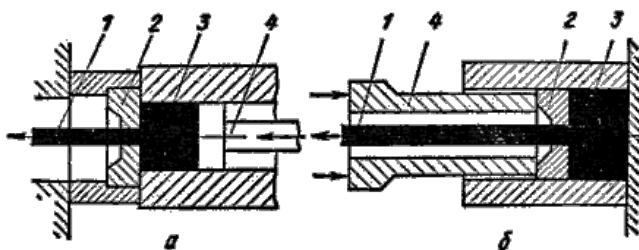


Рис. 6.11. Схема прессования прутка прямым (а) и обратным (б) методом:
1 – готовый пруток; 2 – матрица; 3 – заготовка; 4 – пуансон (пресс-штемпель)

Прессование протекает в условиях схемы всестороннего неравномерного сжатия: $\sigma_2 = \sigma_3$, $\sigma_1 < \sigma_2$ (рис. 6.12).

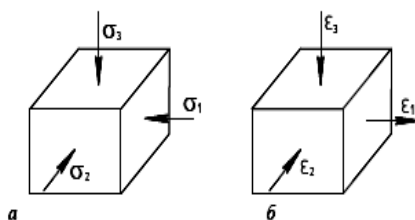


Рис. 6.12. Схемы напряжения и деформации при прессовании

При прессовании деформированное состояние металла в пластической зоне определяется двумя укорочениями и одним удлинением. Удлинение в большей части пластической зоны, где имеет место всестороннее сжатие, пассивно, так как происходит без приложения растягивающих сил в направлении удлинения.

В результате деформируемый металл приобретает высокую пластичность. Это позволяет обрабатывать многие специальные стали, титановые сплавы и другие малопластичные металлы.

Основными величинами, характеризующими деформацию при прессовании, являются коэффициент вытяжки и степень обжатия (степень деформации). Коэффициент вытяжки равен отношению площади сечения контейнера к площади сечения отверстия матрицы, т.е. $\mu = F_k/F_o$. Обычно коэффициент вытяжки находится в пределах 8...50, а иногда может иметь и большие значения. Степень обжатия при прессовании измеряется отношением разности площадей поперечного сечения контейнера и отверстия матрицы к площади поперечного сечения контейнера, т.е.

$$U = \frac{F_k - F_o}{F_k}.$$

Прессование по сравнению с другими способами обработки металлов давлением производят с наибольшей степенью обжатия. Как правило, степень обжатия (деформации) при прессовании составляет 90%, а в некоторых случаях – 98%.

6.2.1. Течение металла при прессовании

В основу представления о характере напряженно-деформированного состояния положена схема горячего прессования через одноканальную матрицу, прутка без смазки. На рис. 6.13 приведена схема внешних сил и вызываемых ими внешних напряжений, действующих на прессуемый металл при прямом способе прессования.

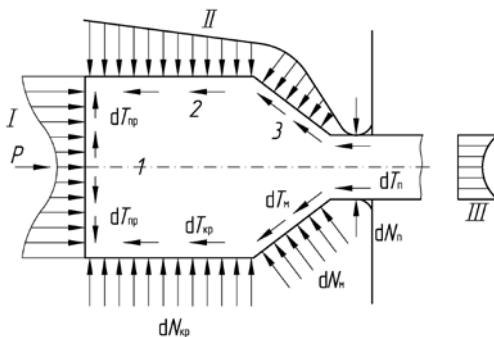


Рис. 6.13. Схема действия сил и напряжений при прямом прессовании

Для прямого прессования первичными активными являются силы и напряжения, действующие на прессуемый металл от пресс-шайбы, вторичными являются нормальные и касательные (от трения) силы и напряжения, действующие на металл от контейнера и матрицы, а также силы и напряжения трения, возникающие на контактной поверхности пресс-шайбы.

Реактивные силы действуют от металла на инструмент и направлены в противоположное направление. По характеру силовых и деформационных условий процесс прессования можно разделить на четыре последовательных стадии.

Первая стадия – распрессовка слитка в контейнере и заполнение металлом всего объема контейнера.

Вторая стадия – начало истечения, соответствующее выходу металла через канал матрицы с одновременным зонообразованием и потерей устойчивости металла.

Третья стадия – условно установившееся течение, при котором происходит истечение основной массы металла.

Четвертая стадия – завершающее истечение, соответствующее началу прессования зон затрудненной деформации.

Каждой стадии любого процесса прессования соответствует свой характер течения металла, который имеет решающее значение для прогнозирования закономерностей формирования структуры и свойств пресс-изделий.

К основным факторам, влияющим на течение металла, относятся: природа материала, способ деформирования, величина и направленность внешнего контактного трения на поверхности заготовки и инструмента, степень и скорость деформации и т.п.

К факторам, наиболее значащим в улучшении кинематики течения, следует отнести роль внешнего контактного трения и температурный режим обработки.

Варьированием перечисленных факторов можно добиться повышения скорости истечения периферийных слоев и выравнивания их по отношению к скорости осевого потока. С изменением характера трения (с вредного на полезное) и направления возникающих сил коренным образом изменяется реологическое состояние периферийных слоев заготовки.

Таким образом, чтобы повлиять на течение металла в контейнере, необходимо изменить традиционное положение инструментальной оснастки в течение всего цикла прессования. Это обеспечивает-

ся, в частности, опережающим перемещением контейнера по отношению к пресс-штемпелю в направлении истечения металла. Это позволяет существенно изменить характер распределения скоростей перемещения матричных частиц. Причем при различных кинематических условиях существенно изменяется характер распределения компонент скоростей в продольном и поперечном направлениях.

Варьируя кинематическими и температурными условиями, можно интенсифицировать периферийное течение материала и затормозить осевой поток, что отражается на характере распределения деформации.

Для осуществления расчета основных параметров процесса принимают, что поле скоростей является сферическим и микрообъемы прессуемого металла, проходя через пластическую зону, дважды меняют свое направление на сферических поверхностях Π_1 и Π_2 , называемых поверхностями разрыва скоростей (рис. 6.14). В прессуемой заготовке условно различают три зоны. В зоне *I*, где металл считают жесткопластичным, все объемы заготовки движутся равномерно и параллельно оси прессования до поверхности Π_1 , в которой происходит первое изменение направления движения. В зоне *II*, в которой металл становится пластичным, все его микрообъемы перемещаются к вершине конуса «O» и, достигнув поверхности разрыва скоростей Π_2 , снова меняют свое направление. После выхода из зоны *II* металл в зоне *III*, перейдя в пресс-изделие, снова становится жестким и его микрообъемы движутся равномерно и параллельно оси прессования.

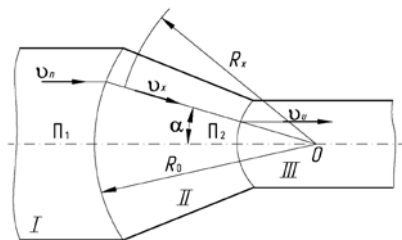


Рис. 6.14. Поле скоростей при прямом прессовании круглого сплошного профиля через одноканальную матрицу

Скорость движения металла в зоне *I* постоянна и равна v_0 , в зоне *III* – v_0 , а в зоне *II* скорость движения микрообъема v_x переменна и зависит от угла α и величины R_x , т.е.

$$v_x = v_0 \cdot \cos \alpha \cdot \left(R_0^2 / R_x^2 \right).$$

В связи с тем, что скорость движения металла по объему пластической зоны не одинакова, прямые линии координат сетки, нанесенные на меридиональную плоскость заготовки перпендикулярно к оси прессования, при переходе в пресс-изделие значительно искривляются. Наличие угла α влечет за собой увеличение искажения поперечных первоначально прямолинейных линий сетки. Для изучения деформаций применяют различные экспериментальные методы исследования: координатной сетки, визиопластичности, составных образцов, вставок, структурный, поляризационно-оптический (фотопластичности), «муар», измерение твердости.

Скорость прессования – один из основных факторов, изменяющих температуру деформируемого металла. С увеличением скорости прессования сокращается время теплопередачи между металлом и инструментом и температура металла повышается. Рост температуры металла в пластической зоне при увеличении скорости прессования является в ряде случаев основной причиной ограничения скорости сравнительно низкими значениями.

При определении температурного режима прессования нужно учитывать диаграммы пластичности сплавов, температурные условия процесса, факторы, влияющие на их изменение и методы регулирования. При этом необходимо стремиться к следующему:

- наибольшему снижению сопротивления деформации для уменьшения необходимых усилий и нагрузок на инструмент;
- обеспечению равномерного распределения температуры (не выше критической для данного сплава);
- соблюдению оптимальных температурных условий работы прессового инструмента;
- соблюдению условий для проявления антифрикционного и защитного действия применяемых смазок;
- обеспечению оптимальных значений механических свойств в пресс-изделии и равномерной структуры.

Регулирование температуры металла при прессовании заключается в создании таких условий, которые позволяют или удалить излишек деформационного тепла, или повысить температуру металла в определенные промежутки времени; или по возможности выровнять температурное поле в пресс-изделии и поддерживать его постоянным.

При выдавливании металла из контейнера различают скорость прессования (скорость движения пуансона пресса) и скорость исте-

чения (течения металла) – величину, определяющую скоростные условия на выходе из очага матрицы. Скорость прессования $v_{пр}$ и скорость истечения $v_{и}$ связаны между собой зависимостью $v_{и} = \mu \cdot v_{пр}$ (где μ – коэффициент вытяжки), что указывает на связь степени деформации со скоростными условиями процесса. Изменяя скорость прессования, получают различные виды течения металла (различные виды очага деформации). Следовательно, скорость прессования может определенным образом влиять на качество продукции обработки.

Пластичные металлы прессуют с повышенными скоростями. Скорость истечения при прессовании медных труб при вытяжке $\mu < 40$ составляет 120 см/с, а при $\mu > 100$ – 500 см/с. При прессовании прутков алюминия при $\mu > 100$ скорость истечения достигает 2500 см/с. При прессовании стальных прутков $v_{ист}$ доходит до 600-800 см/с, при этом скорость перемещения пресс-штемпеля составляет 40 см/с. В то же время малопластичные материалы, например сплавы магния МА5, МА3, прессуют со скоростью истечения до 1,5...5 см/с.

Условиями, определяющими допустимые скорости прессования и истечения металла, служат: начало появления поверхностных трещин, образование рисок, наклепов и других поверхностных дефектов, устойчивость размеров поперечного сечения изделия, возникновение гофров и других дефектов.

Скорости прессования выбирают одновременно с температурой нагрева металла перед прессованием, при этом учитывают и другие деформационные усилия, то есть вытяжку, форму профиля, смазку, свойства металла и прочие факторы, влияющие на температурные условия прессования.

Кроме того, учитывают такие технические и экономические факторы как прочностные характеристики прессового инструмента и силовые возможности привода.

В связи с изложенным диапазон скоростей прессования составляет примерно 0,2-300 мм/с, а скоростей истечения 0,1...1000 м/мин.

Теорией и практикой установлены закономерности для выбора скоростей.

1. Чем шире допустимый температурный интервал прессования, тем больше интервал возможных скоростей.

2. При равных термомеханических условиях чистые металлы можно прессовать быстрее, чем их сплавы.

3. Металлы и сплавы, заметное охлаждение которых в процессе прессования недопустимо из-за значительного увеличения сопротивления деформации, а также фазовых или аллотропических превращений, прессуются при высоких и очень высоких скоростях.

4. При равных условиях быстрее прессуют профили круглых сечений, медленнее – профили сложных форм, особенно тонкостенные и асимметричные; полые профили прессуются через простые матрицы с оправкой быстрее сплошных, а через комбинированные матрицы – медленнее.

5. Прямое прессование ведут медленнее, чем обратное.

6. Применение смазки и другие мероприятия, уменьшающие контактное трение, позволяют повышать скорости.

7. С уменьшением объема заготовки и, как следствие, с уменьшением ее тепловой инерции скорости в общем случае возрастают. Поэтому чаще всего скорости прессования на больших прессах меньше, чем на малых прессах.

6.2.2. Силовые условия процесса прессования

Определение силовых условий необходимо для выбора оборудования, расчета инструмента, установления энергетических затрат и других показателей.

Экспериментально усилия прессования можно определять на моделях или в производственных условиях путем натуральных испытаний. Последний способ наиболее точный, однако трудоемок, дорог и часто для новых процессов невозможен. Моделирование горячих процессов связано с отступлением от природы в температурном режиме из-за различий удельных поверхностей модели и природы – отсюда неточности этого способа. Для определения полного усилия прессования наиболее распространенным и простым является способ измерения давления жидкости в рабочем цилиндре пресса по показаниям манометра. Применяют также метод упругих деформаций колонн пресса. Наиболее точные результаты при замере усилий дает метод тензометрии.

Аналитические методы определения усилия при прессовании

Существующие в настоящее время расчетные методы и формулы можно разбить на следующие группы:

1. Формулы, основанные полностью или частично на решении уравнений равновесия в осредненных главных нормальных напря-

жениях или совместном использовании уравнения равновесия работ или мощностей. Эти формулы делятся на две подгруппы по способу учета сил или трения:

– учет сил трения по закону Амонтона – Кулона, в котором часть полного усилия на преодоление сопротивления трению считается пропорционально действующему усилию;

– с учетом постоянного усилия трения.

2. Формулы, полученные на основе решения общих уравнений равновесия.

3. Формулы, основанные на принципе минимальной работы с применением метода вариационного исчисления.

4. Эмпирические формулы, в основе которых лежит закон линейной зависимости напряжения прессования от интегрального показателя деформации с применением одного или нескольких экспериментальных коэффициентов.

Усилие, необходимое для выдавливания металла из контейнера через отверстие матрицы, называется усилием прессования. Полное усилие P пресса, необходимое для осуществления деформации, равно:

$$P = R_m + T_{кр} + T_m + T_n,$$

где R_m – усилие для деформации металла без учета внешнего трения; $T_{кр}$ – усилие для преодоления сил трения, возникающих на боковой поверхности контейнера; T_m – усилие для преодоления сил трения, возникающих на боковой поверхности калибрующего пояса матрицы; T_n – усилие для преодоления сил трения, возникающих на поверхности калибрующего пояса матрицы.

К основным факторам, влияющим на величину усилия прессования, относятся следующие:

– прочностные характеристики металла;

– степень деформации;

– профиль матрицы;

– размеры заготовки;

– условия трения;

– скорости прессования и истечения;

– температура контейнера.

6.2.3. Оборудование и инструмент для прессования

Прессование металла обычно осуществляют на гидравлических прессах с горизонтальным или вертикальным перемещением плунжера. Давление плунжера передается на пуансон с пресс-шайбой. Механические прессы применяют значительно реже. Наибольшее распространение получили горизонтальные прессы с усилием прессования до 10 000 т.

Инструмент, применяемый для прессования на горизонтальных гидравлических прессах, включает контейнер, пресс-штемпель, матрицы, пресс-шайбы, иглы и др. (рис. 6.15).

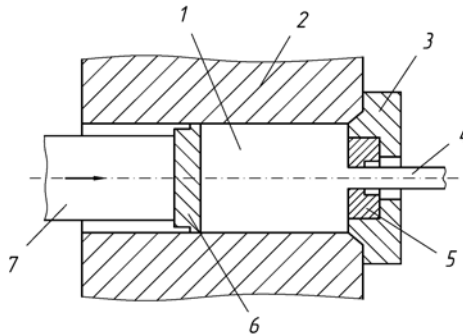


Рис. 6.15. Оснастка для прессования: 1 – заготовка, 2 – контейнер, 3 – матрицедержатель, 4 – изделие, 5 – матрица, 6 – пресс-шайба, 7 – пресс-штемпель

Контейнер прессы состоит из корпуса, внутренней и промежуточной втулок. Корпус имеет каналы для размещения нагревателей, а на быстроходных (50...70 прессовок/ч) прессах также каналы для охлаждения. Внутренняя втулка изготавливается из теплостойкой стали, часто с упрочняющей наплавкой.

Пресс-штемпель изготавливают из поковок легированной стали с пределом прочности, равным 1600...1700 МПа. Пресс-шайба служит для предохранения пресс-штемпеля от разогретого слитка.

Матрицы – это наиболее ответственные и быстроизнашиваемые детали инструмента. Матрица служит для формирования контура пресс-изделия и определяет точность его геометрических размеров и качество пресс-изделий. Матрица устанавливается в передней части втулки контейнера и замыкает ее полость с заготовкой. Изготавливают матрицы из высоколегированных сталей и жаропрочных сплавов.

Прессовый инструмент (контейнер, матрицы, пресс-шайба и др.) работает в тяжелых условиях (высокие температуры, большие напряжения). Отдельные элементы инструмента нагреваются до температур прессуемого металла. Для медных сплавов температурный интервал прессования достигает 500...900°C, а для стали, никелевых и титановых сплавов – 1000...1250°C. В процессе прессования напряжения, например в пресс-шайбе и контейнере, могут превышать 1500 МПа. Кроме того, инструмент после прессования подвергается быстрому охлаждению. В связи с этим прессовый инструмент изготавливают из высококачественной легированной стали 5ХНВ, 3Х2В8, ЭИ617 и др. Отдельные элементы инструмента изготавливают из жаростойких материалов: победит (ВК8), микролит (ЦМ332), термокунд (ТВ14) и другие.

При прессовании для уменьшения трения металла о стенки контейнера и достижения более равномерного истечения металла из матрицы применяют смазку – смесь машинного масла с графитом, жидкое стекло (для легированных сталей) и другие. Смазка подбирается соответственно прессуемым металлам и сплавам.

Матрица работает исключительно в тяжелых условиях – высокая температура, высокие удельные давления при минимальных возможностях смазки и охлаждения. По количеству отверстий матрицы могут быть одноочковыми и многоочковыми. Количество отверстий определяется видом получаемого изделия и необходимой производительностью пресса. Так, при прессовании круглых профилей небольших размеров матрица может иметь до 30 и более отверстий.

6.2.4. Технологические особенности разных видов прессования

При прямом прессовании сплошных профилей (рис. 6.11, а) движение пуансона пресса и истечение металла через отверстие матрицы происходят в одном направлении. При прямом прессовании требуется прикладывать значительно большее усилие, так как часть его затрачивается на преодоление трения при перемещении металла заготовки внутри контейнера. В отдельных случаях доля усилия, затрачиваемая на это, может достигнуть 40...60 % от полного усилия прессования. Пресс-остаток составляет 18...20 % от массы заготовки (в некоторых случаях – 30...40 %). Имеет место большая неравномерность деформации на протяжении всего процесса. Это приводит к неравномерности структуры и механических свойств в

продольном и поперечном направлениях пресс-изделий. Но процесс характеризуется более высоким качеством поверхности, схема прессования более простая.

При обратном прессовании сплошных профилей (6.11, б) заготовку закладывают в глухой контейнер и она при прессовании остается неподвижной, а истечение металла из отверстия матрицы, которая крепится на конце полого пуансона, происходит в направлении, обратном движению пуансона с матрицей. Обратное прессование требует меньших усилий, пресс-остаток составляет 5...6 %. Однако меньшая деформация приводит к тому, что прессованный пруток сохраняет следы структуры литого металла. Конструктивно эта схема более сложная.

Способы прессования труб. Наибольшее распространение в производстве получили прямое и обратное прессование труб (рис. 6.16), которые существенно не отличаются от схем прессования сплошных изделий.

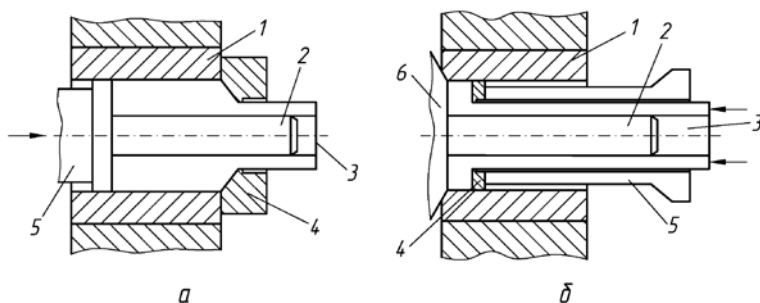


Рис. 6.16. Схемы прессования труб с прямым (а) и обратным (б) истечением:
1 – контейнер; 2 – игла; 3 – труба; 4 – матрица; 5 – пресс-штемпель;
6 – заглушка

Наличие иглы-оправки для формирования внутреннего канала трубы изменяет характер течения металла, поэтому требуется применение специального ее привода, обеспечивающего различные кинематические условия в зависимости от соотношения скорости перемещения иглы-оправки, пресс-штемпеля и контейнера

Преимущества обратного прессования по сравнению с прямым прессованием:

1) Повышение скорости истечения металла из-за большей равномерности его течения по сечению очага деформации.

2) Снижение усилия прессования, что позволяет увеличивать коэффициент вытяжки и снижать температуру прессования.

3) Монотонный характер истечения металла, обеспечивающий формирование равномерной структуры и механических свойств по длине пресс-изделий.

4) Рост выхода годного за счет уменьшения толщины пресс-остатка и снижения глубины распространения пресс-утяжины в изделии.

5) Повышение производительности прессовой установки за счет увеличения скоростей истечения труднодеформируемых сплавов.

6) Увеличение срока службы контейнера из-за неподвижного его контакта с заготовкой.

Недостатками обратного прессования являются:

1) Уменьшение возможного поперечного размера пресс-изделия и числа одновременно прессуемых изделий по сравнению с прямым прессованием из контейнера того же размера в связи с сокращением размера проходного отверстия в матричном блоке.

2) Для получения профилей с хорошим качеством поверхности необходимо применять заготовки с хорошим состоянием поверхности, что достигается дополнительными операциями, такими как предварительная обточка, скальпирование заготовок или отливка слитков в электромагнитный кристаллизатор.

3) Ограничение номенклатуры пресс-изделий из-за недостаточной прочности удлиненного матричного узла.

4) Увеличение стоимости гидропрессов и вспомогательного времени циклов.

Прессование через многоканальную матрицу

Многоканальное прессование ведут через матрицу с числом каналов 2...20, а иногда и более. При этом основными отличиями от прессования через одноканальную матрицу при одинаковых заготовках и скоростях истечения являются:

– уменьшение средней длины пресс-изделий пропорционально числу нитей;

– сокращение длительности процесса;

– уменьшение полного давления прессования из-за возрастания суммарного поперечного сечения всех нитей и, следовательно, уменьшения общей вытяжки;

– снижение теплового эффекта деформации из-за уменьшения общей вытяжки;

– увеличение контактной поверхности в каналах матрицы.

Поэтому многоканальное прессование применяют, если при этом растет производительность; номинальное давление прессы многократно превышает необходимое для прессования через один канал; в условиях, когда желательна ограниченность роста температуры металла в пластической зоне в процессе прессования, а также при необходимости получения профилей с очень маленькой площадью поперечного сечения.

Течение металла при многоканальном прессовании характеризуется следующим:

1. Разделением прессуемого металла при приближении к матрице на отдельные потоки соответственно числу каналов.

2. Уменьшением средней вытяжки из-за разделения металла на потоки, каждый из которых питается уменьшенным объемом заготовки. Скорости истечения из каждого канала матрицы не одинаковы, поэтому прутки, выпрессованные из более удаленных от оси каналов, короче выпрессованных из более близких к оси каналов. Поэтому такое прессование характеризуют средней вытяжкой λ_{cp} :

$$\lambda_{cp} = F_3 / \sum F_{из} ,$$

где F_3 – сечение заготовки после распрессовки; $F_{из}$ – сечение пресс-изделия.

3. При использовании для одноканального и многоканального прессования одного контейнера – уменьшением абсолютной величины гидростатического давления во всех элементарных объемах пластической зоны из-за увеличения суммарной площади поперечного сечения каналов для выхода металла. При этом падение полного давления прессования с увеличением числа нитей не пропорционально числу нитей.

4. Каждая нить прессуется со «своей» вытяжкой, отличающейся от другой.

5. Непрерывным изменением скоростей истечения через различные каналы по мере продвижения пресс-шайбы к матрице.

Для обеспечения истечения всех нитей со сравнительно одинаковыми скоростями, что важно для получения пресс-изделий заданной длины, каналы на матрице располагают определенным образом.

Скорости истечения будут близкими, если центры каналов расположены равномерно по всей окружности с центром на оси заготовки. Если каналы располагаются на нескольких концентрических окружностях, то центр каждого канала должен совпадать с центром тяжести равновеликих ячеек сетки, нанесенной на торцевую поверх-

ность матрицы. Ячейки должны быть расположены симметрично относительно оси. Площадь каждой ячейки $F_{я}$ определяется по формуле:

$$F_{я} = \pi \cdot D_3^2 / 4n,$$

где n – число каналов матрицы.

Для выравнивания скоростей истечения устраняют причины неравномерности скоростей: или изменяют силовой подпор у выхода металла из пластической зоны, изменяя эффективную длину калибрующего пояска каждого канала за счет наклона образующей пояска к его оси, или несколько приближают периферийные каналы к центральному. Часто увеличивают эффективную длину поясков на внутренних каналах, в результате чего возрастает подпор, скорости истечения уменьшаются и заметно сравниваются со скоростями истечения из периферийных каналов.

Особенности прессования некруглых профилей. Основная общая особенность прессования некруглых сплошных профилей из круглых заготовок – возникновение дополнительных по сравнению с круглыми профилями деформаций и напряжений, из которых опасны большие напряжения растяжения, приводящие к местным разрушениям, и большие напряжения сжатия, вызывающие образование местных складок (гофров).

Возникновение таких напряжений обусловлено следующими причинами:

1. Нарушение геометрического подобия начального и конечного поперечных сечений.
2. Увеличение неравномерности температур и сопротивления деформации по поперечным сечениям обжимающей части пластической зоны из-за нарушения геометрического подобия поперечных сечений и изменения величины и формы пластической зоны.
3. Отсутствие симметрии или малая степень симметрии поперечного сечения.

Для уменьшения возникающих дополнительных напряжений и улучшения процесса истечения необходимо уменьшение осевой асимметрии деформаций и неравномерности скоростей истечения прессуемого металла. Первое достигается максимально возможным приближением формы поперечного сечения заготовки к поперечному сечению прессуемого профиля. Например, для профилей, вписывающихся в вытянутый прямоугольник, применяют заготовки пря-

моугольного (с овализацией краевых участков) поперечного сечения. Для выполнения второго условия необходимо, чтобы равновеликие по своему поперечному сечению участки прессуемого профиля питались равными объемами прессуемой заготовки или чтобы все «поучастковые» условные вытяжки были равны между собой.

Для такого выравнивания используется:

1. Рациональное расположение канала (или каналов) на матрице. При одном канале совмещения центра тяжести поперечного сечения с осью заготовки целесообразно только при профилях с осевой симметрией поперечного сечения или близких к ним. При отсутствии симметрии и особенно при разнотолщинности участков профиля центр тяжести профиля нужно смещать относительно оси заготовки так, чтобы участки профиля с меньшим удельным периметром (т.е. периметром, приходящимся на единицу поперечного сечения этого же участка) располагались против уменьшенных питающих объемов.

На рис. 6.17 изображено правильное и неправильное расположение каналов для прессования треугольного профиля.

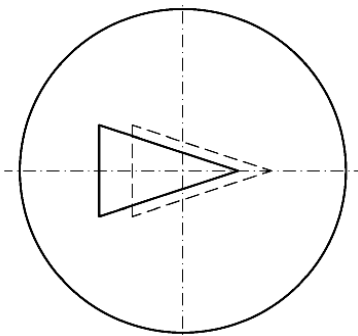


Рис. 6.17. Правильное и неправильное (пунктир) расположение канала на матрице

При неправильном расположении центр тяжести профиля смещен с осью заготовки, а его равные части – против равных объемов заготовки. В окрестностях правой части, имеющей большой удельный периметр, гидростатическое давление повышено по сравнению с левой, поэтому из правой половины заготовки металл частично потечет в левую, объем истечения которой и скорость истечения увеличиваются.

В результате через левую часть пройдет металла больше, чем через правую, а так как их сечения равны, происходит коробление профиля. Следовательно, канал нужно смещать влево, что приведет к уменьшению питающего объема левой части, выравниванию скоростей истечения и получению ровного профиля.

2. Участки профиля с большими удельными периметрами нужно располагать ближе к внутренним зонам заготовки, чтобы не происходило их захлаживание.

3. Для профилей сложных форм дополнительно к смещению центра тяжести профиля на различных его участках меняют эффективную величину контактной поверхности калибрующего пояска. С ее увеличением повышается гидростатическое давление в соответствующем участке пластической зоны, что уменьшает питающий объем и скорость истечения на этом участке.

Поэтому на участках профиля с большим удельным периметром контактная поверхность пояска уменьшается.

4. Некоторому выравниванию вытяжек отдельных участков поперечного сечения профиля и скоростей истечения металла на этих участках помогает приложение растягивающей нагрузки к вышедшему из матрицы переднему концу профиля.

6.2.5. Технологический процесс прессования

Процесс прессования металла включает следующие стадии:

1) Подготовка слитка или заготовки к прессованию (удаление наружных дефектов, резка заготовки на мерные длины и т.д.).

2) Нагрев слитка или заготовки до заданной температуры в пламенной или электрической печи с последующей очисткой поверхности. Наиболее эффективный способ удаления поверхностных дефектов слитка – это горячее скальпирование, т.е. проталкивание слитков через матрицу с острой кромкой (на отдельном прессе усилием 2...3 МН, расположенном на выходной стороне нагревательной печи). При этом снимается слой толщиной 2...3 мм. Слитки подвергают гомогенизации (нагреву и выдержке при заданной температуре) с целью устранения дендритной ликвации и повышения пластичности литой заготовки.

3) Подача нагретого металла в контейнер. Оптимальная температура нагрева слитка зависит от пластичности и прочности металла, степени неравномерности деформации, окисления поверхности,

схватывания (сваривания) металла с инструментом, скорости остывания металла в контейнере и т.д. Температурный интервал прессования шире у однофазных сплавов и чистых металлов. Перед прессованием латуни, магниевых, алюминиевых сплавов и других применяют подогрев контейнера, матрицы и пресс-шайбы до 200...250°C, а иглы – до 350°C. При прессовании прутков алюминиевых сплавов контейнер подогревают до 330...430°C.

4) Выдавливание металла из контейнера через очко матрицы. Технологическая смазка поверхности контейнера и пресс-шайбы уменьшает усилие прессования, остывание заготовки, неравномерность деформации, удлиняет срок службы инструмента.

5) Отделка полученного изделия (отделение пресс-остатка, резка на мерные длины изделия, правка на правильных машинах, отбраковка и удаление дефектов). После прессования профили проходят термическую обработку, их режут на мерные длины, правят на правильно-растяжных машинах, устраняют поверхностные дефекты вырубкой, шабровкой, травлением и другими методами. Термическую обработку (закалку, старение) проводят, как правило, в электрических печах. Для защиты от коррозии изделия покрывают лаком, краской, оксидируют, анодируют, смазывают и т.п.

При прессовании выход годной продукции обычно составляет 70...80%.

Преимущества и недостатки процесса прессования

Достоинства прессования по сравнению с сортовой и трубной прокаткой, которыми можно получить продукцию, аналогичную прессованной:

1. Если при прокатке на многих участках пластической зоны возникают большие растягивающие напряжения, понижающие пластичность обрабатываемого металла, то при прессовании имеет место схема всестороннего неравномерного сжатия, позволяющая получать различные пресс-изделия вообще не получаемые прокаткой или получаемые за большое число проходов. Это расширяет область применения процессов прессования, особенно когда относительные степени деформации за один переход значительны и, как правило, превышают 75%, а иногда достигают и 99%, а коэффициенты вытяжки могут иметь значения более 100.

2. Прессованием возможно получать изделия практически любых форм, тогда как прокаткой получают профили и трубы лишь сравнительно простых форм поперечного сечения.

3. При прессовании быстрее перевод процесса получения одного типа размера пресс-изделия на другой – достаточна только замена матрицы.

4. Повышенная точность пресс-изделий обусловлена замкнутостью калибра матрицы и зависит от точности ее изготовления и состояния ее термической обработки.

5. При прессовании меньше затраты на переналадку, чем при прокатке. Это позволяет рекомендовать прессование для многосерийного производства.

6. Высокие степени деформации при прессовании обеспечивают высокий уровень свойств изделий.

Основные технологические недостатки прессования следующие:

1. Для ряда металлов и сплавов, чтобы получать бездефектную продукцию, требуются низкие скорости прессования.

2. Низкий выход годного из-за больших технологических отходов, достигающих более 15 % за счет необходимости оставления больших пресс-остатков и удаления слабдеформированного выходного конца пресс-изделия.

3. Ограничение длины заготовки, обусловленное прочностью пресс-штемпелей, силовыми возможностями прессы и устойчивостью заготовки при распрессовке.

4. Повышенная неравномерность деформации, влияющая на неравномерность распределения свойств в продольном и поперечном направлениях.

5. Сравнительно низкая стойкость инструмента и его высокая удельная стоимость из-за тяжелых условий нагружения, а также необходимости использования для его изготовления дорогих легированных сталей.

Исходя из перечисленных преимуществ и недостатков, можно определить наиболее целесообразную область применения прессования:

– производство толстостенных и тонкостенных профилей и труб сложной формы, прессуемых из металлов и сплавов с высокими скоростями истечения;

– обработка труднодеформируемых и малопластичных металлов и сплавов;

- получение полуфабрикатов сложной геометрии, повышенной точности и с тонкой полкой;
- получение тонкой проволоки из металлов и сплавов, не подвергающихся волочению;
- среднее и мелкосерийное производство.

6.3. Научные основы технологических процессов волочения

Волочением называют пластическую деформацию при протягивании проволоки, прутка, профиля, трубы через сужающийся канал инструмента (волоки).

Конфигурация отверстия определяет форму получаемого профиля. Схема волочения представлена на рис. 6.18.

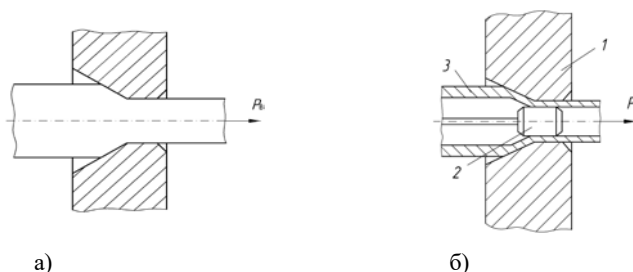


Рис. 6.18. Схема волочения: а – без оправки; б – с оправкой

Усилие растяжения, приложенное к концу изделия, расходуется на формоизменение заготовки и преодоление сил трения о канал волоки. Обжатие за проход ограничено прочностью выходящего конца изделия и, как следствие, обрывом металла.

При волочении труб с утонением стенки металл 3 деформируется в кольцевом зазоре между волокой 1 и оправкой 2.

Схемы напряженного состояния при волочении (рис. 6.19): $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$.

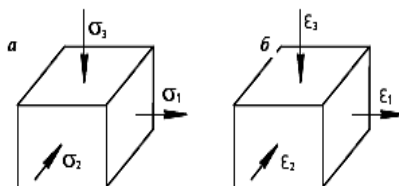


Рис. 6.19. Схемы напряженного и деформированного состояния при волочении

Схема главных деформаций характеризуется двумя деформациями сжатия – радиальной и окружной, продольной деформацией удлинения.

Сила P , прикладываемая к переднему заостренному концу проволоки, введенному в волоку, называется силой волочения. Так как размеры сечения канала, а в отдельных случаях и его форма, измеряются по длине канала, заготовка, протягиваясь через волоку, деформируется и принимает форму и размеры наименьшего сечения канала. При этом площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, а длина увеличивается.

Так как из условия постоянства объема при пластической деформации волочения алгебраическая сумма деформаций равна нулю, то деформация в направлении волочения равна сумме двух других:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3 .$$

Волочением обрабатывают самые различные материалы: стали, алюминий, медь, никель, титан и сплавы на их основе, тугоплавкие металлы (Mo, W, Nb, Zr) и их сплавы, благородные металлы (Au, Ag, Pt) и сплавы на их основе.

При волочении прутков, проволоки, профилей сплошного сечения и труб без утонения стенки форма и размеры сечения изделия определяются только конфигурацией и размерами выходного сечения канала волоки.

Усилие волочения определяется экспериментально по приборам или рассчитывается по формулам. Суммарные обжатия в зависимости от протягиваемого материала и желаемых конечных механических свойств могут достигать 90-99%.

6.3.1 Инструмент и основные параметры процесса волочения

Основной инструмент при волочении – волоки различной конструкции (рис. 6.20).

Волока, или фильер, имеет четыре зоны: I – смазочную, II – деформирующую, калибрующую III (очко или поясok) и выходную IV. Калибрующая зона обычно имеет цилиндрическую форму, а остальные зоны – коническую. Угол α рабочего конуса деформирующей зоны II выбирают в пределах (8-24°) в зависимости от вида изделия и химического состава металла.

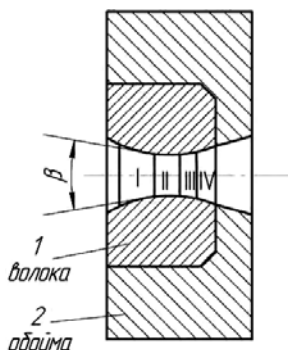


Рис. 6.20. Схема устройства волоки: 1 – волока; 2 – обойма;
I, II, III, IV – зоны волоки

Чистота обработки деформирующей и калибрующей зон должна соответствовать 9 -11 классам ($Ra=0,08\dots0,32$).

Волока работает в сложных условиях: большое напряжение сочетается с износом при протягивании, поэтому их изготавливают из твердых сплавов (ВК3, ВК6). Для получения особо точных профилей волоки изготавливают из алмаза. Для мелкосерийного производства и производства труб диаметром до 300 мм применяют волоки из сталей У8-У 12, Х12М, ШХ15 и др.

Отверстия в волоках из твердых сплавов изготавливаются электроискровым методом. Полировка отверстий производится на станках с помощью специальных игл и абразивных порошков.

Стойкость волок зависит от материала волоки, величины обжата, марки деформируемого материала, смазки и т.п. Например, через волоку из твердого сплава можно протянуть около 140 км медной проволоки диаметром от 1 до 10 мм, а через волоку из алмаза можно протянуть до 7200 км медной проволоки с диаметром от 0,2 до 0,3 мм.

Виды полуфабрикатов, получаемых волочением:

- круглая проволока диаметром 0,008-17 мм;
- проволока квадратного, прямоугольного, шестиугольного и других сечений;
- прутки круглые, квадратные, шестиугольные, трапециевидные и других форм;
- трубы круглые диаметром 0,3-500 мм со стенкой толщиной 0,05-25 мм, овальные, прямоугольные и других форм;

– фасонные профили с различной формой поперечного сечения и самых разных размеров.

При волочении площадь поперечного сечения обрабатываемой заготовки уменьшается, а так как объем остается неизменным, то длина ее увеличивается:

$$L_0 \times F_0 = L_1 \times F_1,$$

где L_0, F_0 – начальная длина и площадь поперечного сечения заготовки; L_1, F_1 – ее значения после операции волочения.

Кроме формоизменения и вытяжки (удлинения) достигается упрочнение (наклеп) материала, улучшается качество поверхности и точность размеров. Волочение позволяет получать изделия с высоким классом точности и высокой чистотой поверхности.

Величинами, характеризующими деформацию при волочении, являются:

1. Коэффициент вытяжки (или вытяжка) μ , показывающий во сколько раз увеличилась длина или уменьшилась площадь поперечного сечения изделия за переход волочения:

$$\mu = \frac{L_1}{L_0} = \frac{F_0}{F_1}.$$

2. Относительное обжатие – отношение уменьшения площади поперечного сечения изделия за переход волочения к ее начальному значению:

$$\varepsilon = \frac{F_0 - F_1}{F_0}.$$

3. Относительное удлинение – отношение увеличения длины изделия за переход к ее начальному значению:

$$l = \frac{L_1 - L_0}{L_0}.$$

4. Интегральная (логарифмическая) деформация – натуральный логарифм отношения площади поперечного сечения изделия до и после перехода волочения:

$$i = \ln \mu = \ln \left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \right) = \ln(l + 1).$$

Обычно коэффициент вытяжки металла при волочении составляет 1,25...1,30; а максимальное обжатие для высокопластичных материалов за одну протяжку не должно превышать 0,5...0,6.

Некоторые виды проката (проволока, трубы и др.) должны иметь очень точное сечение и чистую поверхность. Для этого их подвергают калиброванию, т.е. протягиванию через волоку, установленной формы и размеров, без существенного обжатия (0,08...0,12) и вытяжки.

Для нормального протекания процесса волочения важно правильно выбрать величины единичных обжатий по переходам или так называемый маршрут обжатия. Максимальное обжатие за одну протяжку ограничено.

Сила волочения P – продольная сила, приложенная к протягиваемому металлу у выхода его из волоки, рассчитывается по формуле

$$P = \sigma_u (F_0 - F_1) (1 + \text{fctg} \alpha),$$

где

$$\sigma_u = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}.$$

Напряжение волочения – это отношение силы волочения P_B к площади поперечного сечения изделия на выходе из волоки F_k , т.е. продольное напряжение σ_1 в конце деформационной зоны.

Условие пластичности для волочения круглого сплошного профиля:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_s.$$

Оно показывает, что ни одно напряжение при волочении не может превышать сопротивления деформации.

Поэтому напряжение волочения σ_1 должно быть меньше предела текучести металла в его состоянии после волочения σ_s . В противном случае пластическая деформация может происходить и после выхода металла из волоки, отчего будет искажаться форма поперечного сечения изделия после волочения и в конечном счете может произойти его обрыв. Поэтому при волочении обязательно должно соблюдаться условие:

$$\sigma_1 = P/F_k < \sigma_s.$$

Условие волочения без обрывов:

$$\gamma_3 = \sigma_s / \sigma_1 > 1,$$

где γ_3 – коэффициент запаса.

На практике для волочения без обрывов принимается $\gamma_3 = 1,35...2,0$, иногда до 2,5. При этом чем меньше изделие и выше требование к качеству его поверхности и точности размеров, тем γ_3

больше. Поэтому максимальной величины γ_3 достигает в последнем калибровочном переходе.

Производительность процесса волочения определяется скоростью на выходе из волоки (скоростью волочения), вытяжкой за проход, затратами времени на начало процесса и замену инструмента. Скорость волочения составляет 1...10 м/с для прутков, профилей и труб и до 50 м/с для тонкой проволоки. При таких скоростях скольжения неизбежны проблемы износостойкости волок, обеспечения качества поверхности изделий. Первостепенная роль при волочении принадлежит технологической смазке и управлению процессом трения. Радикальным средством уменьшения износа, повышения скорости и производительности является волочение в режиме гидро- или пластогидродинамического трения.

Процесс волочения производится преимущественно в холодном состоянии. Усилие волочения составляет 30...1500 кН. Различают волочение на цепных станах (для получения труб, прутков и профилей ограниченной длины) и волочение на станах барабанного типа (для получения длинномерной продукции, например, проволоки).

Сортамент изделий, изготавливаемых волочением, весьма разнообразен. Волочением изготавливают стальную проволоку диаметром от 0,002 до 10 мм, калибруют стальные трубы с наружными диаметрами от нескольких мм до нескольких сотен (примерно 500 мм), калибруют стальные прутки с диаметром от 3 до 150 мм. Из цветных металлов волочением изготавливают проволоку, прутки различных сечений, трубы круглого и прямоугольного сечений и т.п.

Вследствие наклепа при волочении значительно повышается предел прочности металла. Например, углеродистая сталь (0,5% С) после горячей прокатки имеет предел прочности около 700 МПа, а после волочения – 1600 МПа.

6.3.2 Влияние различных факторов на силу и напряжение волочения

Основные факторы, влияющие на силу и напряжение волочения: степень деформации за переход; прочностные свойства протягиваемого металла; геометрия продольного профиля канала волоки; трение на контактных поверхностях деформируемого металла и инструмента; форма конечного и начального поперечных сечений; вибрация инструмента.

1. Степень деформации.

Влияние степени деформации, выраженной показателем $\ln\mu$, графически можно представить прямой линией (рис. 6.21).

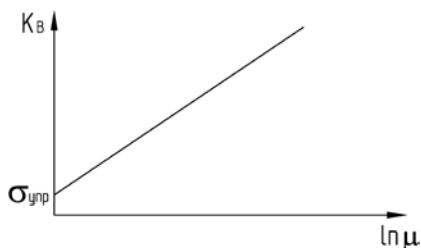


Рис. 6.21. Зависимость напряжения волочения от степени деформации, выраженной показателем $\ln\mu$, при волочении

Это позволяет определить напряжение на границе упругой и пластической зон в канале волокна $\sigma_{упр}$, необходимое для расчета напряжения по формулам. При отсутствии экспериментальных данных можно применять:

$$\sigma_{упр} = (0,1 \dots 0,12)\sigma_{0,2}.$$

2. Прочностные свойства металла.

Из условия пластичности ($\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_s$) следует, что при увеличении сопротивления деформации должно увеличиваться и продольное напряжение в деформационной зоне σ_1 . Поскольку при холодной деформации сопротивление деформации можно принять равным временному сопротивлению материала разрыву протягиваемого изделия, очевидно, что с повышением этой характеристики прочности напряжение волочения также должно увеличиваться. Для большинства сплавов, используемых для волочения, имеют значения отношения напряжения волочения σ_s к среднему значению временного сопротивления разрыву σ_1 в довольно узком интервале 0,46...0,53. Т.е. изменение напряжения волочения прямо пропорционально изменению среднего значения временного сопротивления разрыву.

3. Геометрия продольного профиля канала волокна.

Волочильный канал обычно состоит из пяти зон (рис. 6.22): 1 – входной, 2 – обжимающей, 3 – переходной, 4 – калибрующей и 5 – выходной. Из этих пяти зон в контакте с деформируемым металлом в процессе волочения находятся три: обжимающая, калибрующая и очень короткая переходная между ними.

Поэтому на силу и напряжение волочения оказывает влияние продольный профиль только этих зон. Совокупность этих зон часто называют деформационной зоной.

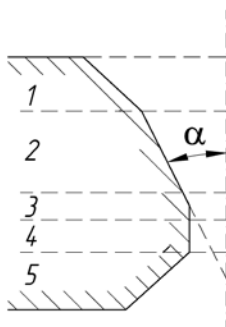


Рис. 6.22. Профиль канала волокна

Особенно заметно на силу и напряжение волочения влияет угол наклона α образующей обжимающей зоны к оси канала. Существует зона оптимальных углов, при которых сила и напряжение волочения имеют минимальные значения (рис. 6.23).

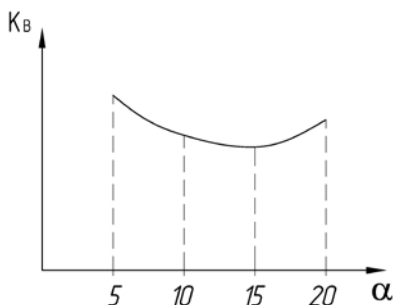


Рис. 6.23. Зависимость напряжения волочения от угла волокна

Увеличение α приводит к уменьшению контактной поверхности металла с волокой, это снижает силу трения и силу волочения. Одновременно повышается давление металла на поверхность волочильного канала, выжимается смазка из деформационной зоны, растет коэффициент трения и усилие волочения. Кроме того, на преодоление дополнительных сдвигов из-за увеличения степени деформации требуется дополнительная сила. При малых углах увеличивается контактная поверхность металла с волокой, но снижается степень деформации. Из-за наличия двух групп факторов, оказываю-

щих противоположное влияние на силу волочения, существует зона оптимальных углов, соответствующая минимальным значениям силы волочения – $\alpha = 5 \dots 18^\circ$.

4. Трение на контактных поверхностях деформируемого металла и инструмента.

Величина сил контактного трения, а следовательно и величины силы и напряжения волочения, определяются свойствами металла волокна и деформируемого металла, качеством обработки поверхности волочильного канала и протягиваемой заготовки, свойствами смазки и способом ее ввода в деформационную зону. Чем тверже материал волокна, тем лучше она полируется и тем меньше налипание на поверхность канала волокна деформируемого металла, и тем ниже коэффициент трения. Важен правильный подбор смазки. Действие смазки ухудшается при увеличении угла α и повышении степени деформации за переход из-за выдавливания смазки из волокна и разрушения смазочной пленки на контактной поверхности. Эффективность действия смазки зависит также от способа ее ввода в деформационную зону. При традиционном волочении смазка затягивается в деформационную зону протягиваемым металлом.

При этом давление в смазочном слое невелико и недостаточно для создания смазочной пленки, надежно разделяющей поверхности волочильного канала и изделия. Подачу смазки в волокно можно увеличить специальными трубками (рис. 6.24).

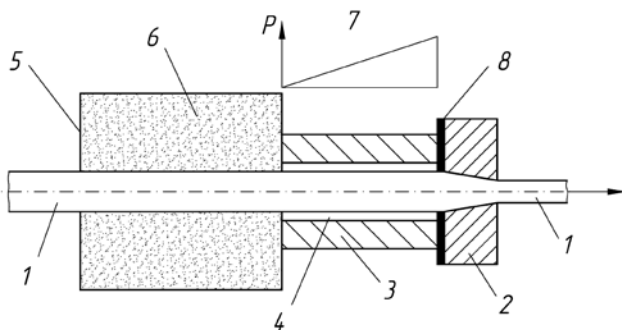


Рис. 6.24. Схема волочения с гидродинамической подачей смазки:

1 – заготовка и изделие; 2 – волокно; 3 – насадка; 4 – зазор; 5 – резервуар для смазки; 6 – смазка; 7 – эпюра изменения давления смазки по длине насадки; 8 – прокладка

При прохождении протягиваемого изделия через насадку из-за небольшого зазора между внутренней поверхностью насадки и наружной поверхностью изделия смазка интенсивно затягивается в волоку и в ее слое создается высокое давление. Величина этого давления в отдельных случаях может достигать предела текучести деформируемого материала. Такая подача смазки – гидродинамическая. Смазка разделяет поверхности волоки и изделия и создаются условия жидкостного трения, характеризующегося очень малым коэффициентом трения, т.к. основная сдвиговая деформация выводится в смазочный слой. Условия жидкостного трения можно обеспечить только при достаточно высоких скоростях волочения.

5. Форма конечного и начального поперечных сечений.

Силы внешнего трения, а поэтому сила и напряжение волочения растут с увеличением контактной поверхности канала волоки и деформируемого металла. При одинаковой площади поперечного сечения минимальный периметр у круга, поэтому минимальные сила и напряжение волочения соответствуют волочению круглых профилей. Чем больше отличие форм начального и конечного поперечных сечений, тем больше напряжение волочения.

6. Вибрация.

При наложении на волочильный инструмент вибрационных колебаний сила и напряжение волочения могут заметно снижаться. Используемые частоты колебаний делят на низкие – звуковые (25...500 Гц) и высокие – ультразвуковые (16...80 кГц). Для получения первых используют виброустройства с механическими или гидравлическими приводами, для получения вторых – пьезоэлектрические или магнитострикционные излучатели.

Уменьшение силы и напряжения волочения при наложении вибрации объясняется уменьшением сопротивления деформации протягиваемого металла и сил контактного трения. Существенное уменьшение сопротивления деформации наблюдается только при наложении высокочастотных колебаний. Уменьшение напряжения волочения за счет уменьшения сопротивления деформации может достигнуть 60...70%.

Изложенные особенности волочения с наложением вибрационных колебаний показывают, что такой процесс может быть эффективен только при сравнительно небольших скоростях волочения (не более 1...2 м/с).

6.3.3. Технологические операции при волочении

Исходным материалом может быть горячекатаный прут, сортовой прокат, проволока, трубы. Заготовку перед волочением очищают от окалины. Для удаления окалины обычно применяют химическое травление в растворах кислот. После травления металл промывают, удаляя с его поверхности остатки кислоты и шлам. После удаления окалины наносят подмазочный слой, который должен хорошо удерживать смазку при волочении и предохранять рабочую поверхность волоки от налипания металла. Подмазочный слой появляется при операциях желтнения, омеднения, фосфатирования, известкования.

Желтение достигается легким ржавлением заготовки, поверхность ее покрывается тонким слоем гидрата оксида железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$, имеющего желтый цвет, который вместе с нанесенной затем на него известью играет роль наполнителя для смазки.

При омеднении заготовку погружают в слабо подкисленный раствор (1,5 % H_2SO_4) медного купороса (3...4 %) CuSO_4 . Омеднение применяется для волочения с большими обжатиями и давлениями; коэффициент трения при этом равен 0,08–0,12. После нанесения покрытия заготовку сушат в камере при 300...350 °С.

Фосфатирование – процесс образования на проволоке мелкой кристаллической пленки фосфатов марганца и железа или цинка. Известкование в растворе нейтрализует остатки кислот и образует пленку наполнителя для смазки. К пленке фосфатов хорошо прилипает смазка и коэффициент трения снижается до 0,04...0,06. Это позволяет проводить волочение при больших обжатиях, при этом снижается коэффициент трения, причем при фосфатировании примерно в два раза больше, чем при омеднении.

Известкование проводится кратковременным погружением заготовки в ванну с кипящим известковым раствором. Известкованием проволоки решаются две задачи: с одной стороны, нейтрализация остатков кислоты, с другой – осевшие частицы извести на ее поверхности играют роль наполнителя при сухой смазке мыльным порошком.

Затем заготовки сушатся в специальных камерах при циркуляции воздуха с температурой 300...350 °С. Во время сушки удаляется вода и часть растворенного в металле водорода, что способствует устранению травильной хрупкости металла.

На сухую поверхность перед протяжкой наносят смазку. Смазка уменьшает усилие волочения, способствует получению гладкой по-

верхности протягиваемого металла и повышает стойкость инструмента (волоки). В качестве смазки при волочении применяют минеральное и растительное масла, животные жиры, графит, мыло и некоторые эмульсии.

Смазки, понижая коэффициент трения, должны плотно прилипать к поверхностям, хорошо сопротивляться выдавливанию и не взаимодействовать с обрабатываемым материалом.

Процесс волочения регламентируется технологическими картами, в которых расписан весь технологический процесс:

1 Маршрут волочения, т.е. последовательность изменения размеров сечения заготовки (обжатие или коэффициент вытяжки) по переходам.

2 Температура и продолжительность промежуточного отжига для снятия наклепа.

3 Режим травления для удаления окалины, полученной при отжиге.

4 Отделка готовой продукции. Правка, шлифовка, полировка, нанесение защитных покрытий (оцинкование, лужение, хромирование и т.д.), резка на мерные длины, смазка и упаковка.

6.4. Научные основы технологических процессов заготовительно-штамповочного производства

6.4.1. Ковка

Ковка – это процесс обработки металлов давлением, при котором необходимое изменение форм и размеров заготовок достигается путем ударов или нажимов бойками, не ограничивающих течение металла в плоскости, перпендикулярной оси приложения давления. При свободной ковке течение металла ограничено частично трением на контактной поверхности деформируемый металл – поверхность инструмента: бойков плоских или фигурных, подкладных штампов.

Деформирование нагретого (реже холодного) металла осуществляется или многократными ударами молота, или однократным давлением пресса.

Достоинствами ковки является возможность с помощью простого и дешевого инструмента изготавливать поковки разнообразной формы и размеров любой массы (до нескольких сотен тонн), улуч-

шение структуры и механических свойств обрабатываемого металла и исправление дефектов литого металла.

В качестве исходного материала дляковки применяются: стали всех марок, алюминиевые, магниевые, титановые сплавы, а также сплавы на основе меди и никеля.

Первичной заготовкой для поковок являются:

- слитки для изготовления массивных крупногабаритных поковок;
- прокат сортовой горячекатаный простого профиля (круг, квадрат).

Ковка может производиться в горячем и холодном состоянии.

В современных условиях холодная ковка встречается редко, в основном в ювелирном производстве. Горячая ковка применяется для изготовления различных изделий, а также инструментов.

Нагрев заготовок перед ковкой сопровождается изменением структуры и механических свойств исходного материала. С превышением температуры металла свыше величины, составляющей диапазон 0,3...0,4 от температуры плавления, начинают протекать процессы возврата и рекристаллизации. Ковочные температуры находятся между температурами плавления и интенсивной рекристаллизацией сплава. При нагреве заготовок в случае несоблюдения технологических требований могут иметь место явления перегрева и пережога. Первое ведет к росту зерен и резкому снижению механических свойств, а второе сопровождается окислением поверхности зерен и полной потерей пластических свойств.

Температурный интервалковки – это максимальная температура нагрева металла в печи (верхний предел) и температура окончания процесса деформации поковок (нижний предел). Различают допустимый и рациональный температурные интервалыковки. Допустимый интервал является более широким и не зависит от размеров и формы поковок, а рациональный интервал назначается с учетом освоения технологического процесса для конкретных условий. Допустимые интервалы для некоторых сплавов приведены в табл. 6.1.

Т а б л и ц а 6.1. Допустимые температурные интервалыковки

Сплавы	Максимальная температура нагрева заготовок, °С	Минимальная температура окончанияковки, °С
Стали	1150...1300	700...800
Алюминиевые сплавы	400...470	320...400
Медные сплавы	730...950	600...850
Магниевые сплавы	380...430	300...350
Титановые сплавы	950...1000	800...850

Основные операцииковки

Основными формоизменяющими операциямиковки являются осадка, протяжка и прошивка. Оборудованием для проведения этих операций являются в основном молоты и прессы.

Осадкой называется технологическая операция, при которой увеличение сечения заготовки, перпендикулярное к действующей силе, происходит за счет уменьшения размера по высоте. Чтобы избежать потери устойчивости и появления продольного изгиба, осадке подвергают заготовки высотой $H_0 \leq (2,5 \dots 3)D_0$, где D_0 – диаметр исходной заготовки (рис. 6.25).

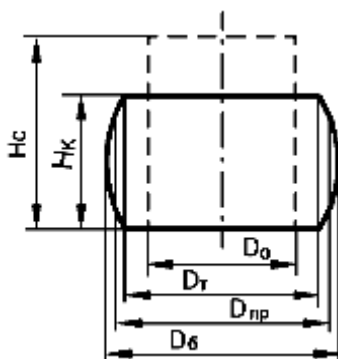


Рис. 6.25. Схема осадки

Осадку применяют для получения формы поковки с целью уменьшения глубины прошивки, для обеспечения соответствующего расположения волокон в будущей детали, как контрольную операцию (из-за значительной деформации по периметру на боковой поверхности вскрываются дефекты).

При осадке в результате взаимодействия поверхности инструмента и деформируемого металла возникают силы контактного трения, препятствующие радиальному перемещению приконтактных слоев металла, при этом диаметр образца неравномерно увеличивается и образуется «бочка». Осадка с образованием «бочки» приводит или к снижению производительности оборудования в случае, если после осадки применяется обкатка заготовки по боковой поверхности, или к повышенному расходу металла, если обкатку не применять, так как на образование «бочки» потребуется

дополнительный объем металла. При недостаточной пластичности металла на боковой поверхности заготовки возможно образование трещин.

Протяжкой называется операция, в результате которой происходит увеличение длины вследствие уменьшения поперечного сечения деформируемой заготовки. Протяжка не только изменяет форму заготовок, но и улучшает качество металла. Операция заключается в нанесении последовательных ударов и перемещении заготовки, при этом между бойками во время удара находится только часть заготовки. После каждого обжатия заготовка продвигается на величину, меньшую, чем длина бойка.

Прошивкой называется основная кузнечная операция, посредством которой в заготовке получают отверстие (сквозная прошивка) или углубление (несквозная прошивка).

Различают открытую (рис. 6.26,а) и закрытую (рис. 6.26, б) прошивку.

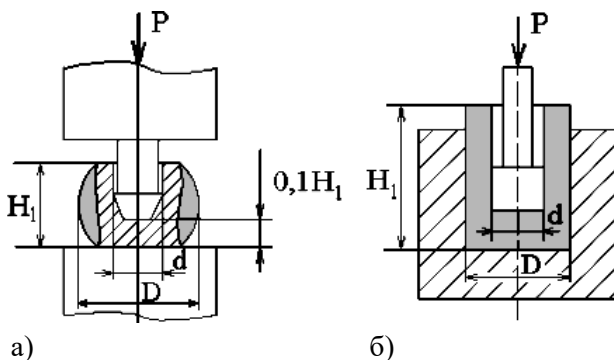


Рис. 6.26. Схема открытой и закрытой прошивки

При открытой прошивке боковая поверхность заготовки свободна от воздействия инструмента, течение металла не ограничено, поэтому она приобретает бочкообразную форму. При закрытой прошивке формоизменение металла ограничено стенками инструмента, при этом на последней стадии прошивки металл течет в направлении, противоположном направлению перемещения пуансона (прошивня), формируя стенки изделия в зазоре между матрицей и пуансоном. Перед открытой прошивкой заготовку необходимо осадить с целью получения необходимой толщины стенок прошиваемого цилиндра, обеспечивающей хорошую боковую поверхность поковки, получения параллельных торцов для лучшей установки прошивня и

уменьшения высоты заготовки, чтобы облегчить прошивку. Более длинная поковка после прошивки получается путем протяжки на оправке.

Инструментом для прошивки служат прошивни сплошные (рис. 6.27) и пустотелые. Пустотелые прошивни применяют при прошивке отверстия большого диаметра (400...900 мм).

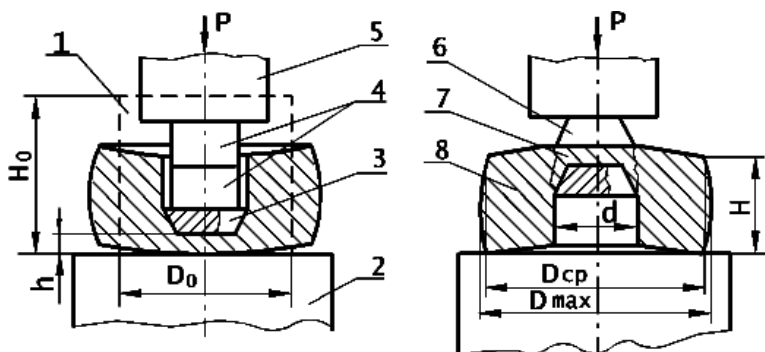


Рис. 6.27. Схема прошивки сплошным прошивнем: 1 – заготовка; 2, 5 – бойки; 3 – прошивень; 4 – надставка; 6 – прошивень просечной; 7 – выдра; 8 – прошитая поковка

При сквозной прошивке сравнительно тонких поковок применяют подкладные кольца. Более толстые поковки прошивают с двух сторон без подкладного кольца. Диаметр прошивня выбирают не более половины наружного диаметра заготовки, при большем диаметре прошивня заготовка значительно искажается. Прошивка сопровождается отходом (выдрой).

Основным показателем, влияющим на формоизменение металла при прошивке и энергосиловые затраты процесса, является отношение диаметра поковки D к диаметру прошивня d . Открытая прошивка применяется при $D/d > 2$, закрытая при $D/d < 2$. Усилие и давление прошивки также зависят от отношения D/d и формы пуансона. Следует отметить, что усилие закрытой прошивки при прочих равных условиях больше, нежели усилие открытой прошивки, что объясняется большими энергосиловыми затратами при формировании стенки изделия на последней стадии формоизменения.

Оборудование дляковки

В качестве основного оборудования дляковки применяют прессы и молоты. Выбор оборудования зависит от технологии получения поковок, заданной программы выпуска и особенностей деформации обрабатываемого сплава.

В качестве инструмента дляковки применяют плоские, вырезные или плоско-вырезные бойки. Выделяют основные (осадка, протяжка и прошивка) и вспомогательные (рубка, кузнечная гибка др.) операцииковки.

Для свободнойковки применяют машины динамического действия (молоты) и машины статического действия (гидравлические прессы). Продолжительность деформации у машин первой группы исчисляется тысячными долями секунды, а у машин второй группы – секундами и даже десятками секунд.

Оборудование выбирают в зависимости от режимаковки 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.

Прессы ковочные гидравлические – машины статического действия. Продолжительность деформации составляет до десятков секунд. Металл деформируется приложении 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.

6.4.2. Объемная штамповка

Объемной штамповкой называют процесс, при котором формообразующую полость штампа, называемую ручьем, принудительно заполняют металлом исходной заготовки.

Штамп имеет две или большее число частей, при сопряжении которых образуется объемная полость по форме детали (рис. 6.28).

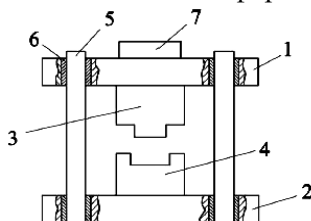


Рис. 6.28. Типовая конструкция штампа для объемной штамповки:

- 1 – верхняя плита; 2 – нижняя плита; 3 – верхняя часть штампа (пуансон);
- 4 – нижняя часть штампа (матрица); 5 – направляющие колонки, входящие в направляющие втулки 6; 7 – хвостовик

В отличие отковки, которая обеспечивает в процессе обжима заготовки фиксированные размеры вдоль одной оси, объемная штамповка обеспечивает заданные размеры по трем осям. Штамповкой можно получать очень сложные по форме изделия, которые невозможно получить приемами свободнойковки.

При этом по сравнению со свободнойковки: достигается более высокая производительность труда, уменьшаются отходы металла, обеспечивается более высокая точность изделия при лучшем состоянии его поверхности. Объемная штамповка обеспечивает получение поверхности высокого качества, при этом отпадает необходимость последующей обработки резанием всей поверхности детали, резанием обрабатывают лишь те поверхности, которые в процессе работы соприкасаются с другими деталями. Методом объемной

штамповки можно получать поковки из сталей и цветных металлов различной конфигурации с высокими механическими свойствами.

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.

Характер течения металла в процессе штамповки определяется типом штампа. Поэтому этот признак считается основным для классификации способов штамповки. В зависимости от типа штампа выделяют штамповку в открытых и закрытых штампах (рис. 6.29). В открытом штампе избыток металла выдавливается наружу (в облой), поэтому заготовки можно нарезать с малой точностью. При безоблойной штамповке весь металл расходуется на изделие, но появляется необходимость в точной дозировке металла.

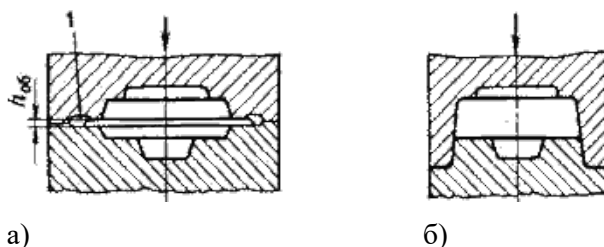


Рис. 6.29. Схемы штамповки в открытых (а) и закрытых (б) штампах:
1 – облойная канавка

Штамповка *в открытых штампах* сопровождается образованием заусенца (облоя), который выполняет специальные технологические функции.

На рис. 6.30 представлена схема штамповки в открытых штампах. Верхняя половина штампа 1 перемещается под действием усилия P и давит на торцевые поверхности заготовки 5. Металл при этом деформируется в ручьях 6 штампа, образованного верхней 1 и нижней 2 половинами, и, заполняя его, вытекает в заусенечную канавку 3. Направление вытеснения металла перпендикулярно направлению движения штампа. Сформированная таким образом поковка 4 имеет по периметру заусенец (облой) 7. Для извлечения поковки из штампа служат штамповочные уклоны α , величина которых составляет $5 \dots 10^\circ$.

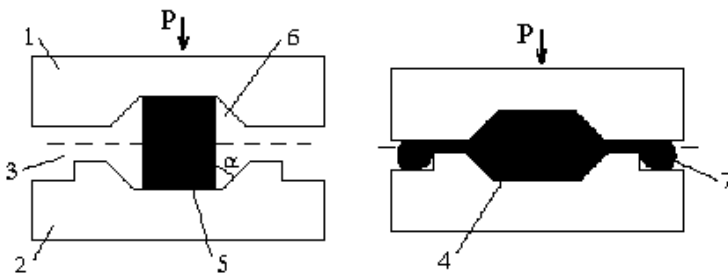


Рис. 6.30. Схема штамповки в открытых штампах

Открытая штамповка характеризуется следующими факторами. Объем металла при ней – непостоянен. Следовательно, имеется часть металла, которая удаляется в отход. При этом должно соблюдаться условие:

$$V_{\text{заг}} = V_{\text{пок}} + V_{\text{заус.}}$$

где $V_{\text{заг}}$, $V_{\text{пок}}$, $V_{\text{заус.}}$ – соответственно объемы заготовки, поковки и заусенца.

При штамповке в открытом штампе выделяют три основных стадии течения металла (рис. 6.31): свободную осадку (рис. 6.31, а); заполнение штампа (рис. 6.31, б) и выдавливание заусенца (рис. 6.31, в).

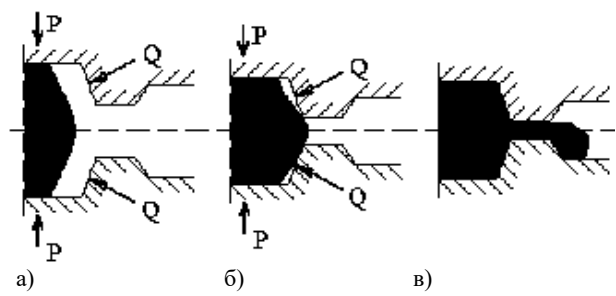


Рис. 6.31. Схема стадий течения металла при штамповке: а – стадия свободной осадки; б – стадия заполнения штампа; в – стадия выдавливания заусенца

Канавка для заусенца является важным элементом ручья штампа, так как она определяет расход металла на заусенец. В соответствии со своим назначением канавка имеет по ширине обычно два участка: низкий – мостик, прилегающий непосредственно к ручью и расположенный за ним более высокий – магазин рис. 6.32.

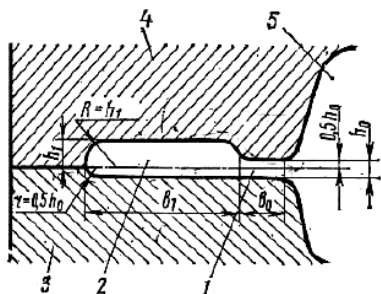


Рис. 6.32. Схема и элементы канавки молотового штампа: 1 – мостик; 2 – магазин; 3 и 4 – нижняя и верхняя половины штампа; 5 – полость окончательного ручья штампа

Мостик, формирующий тонкую часть заусенца, создает в процессе деформирования заготовки перемычку, играющую роль пояса, ограничивающего (сдерживающего) преждевременный выход металла заготовки за пределы полости окончательного ручья, тем самым способствуя получению полноценной поковки.

Канавки (рис. 6.33) выполняют двух видов: для машин со свободным ходом (молот, гидропресс) и для машин с регламентированным ходом (кривошипные прессы).

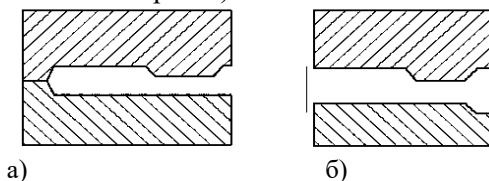


Рис. 6.33. Формы заусенечной канавки: а – для машин со свободным ходом; б – для машин с регламентированным ходом

Магазин выполняет функцию сборника (приемника) вытесняемого избыточного металла. Магазин должен быть заполнен не более чем на две трети от своего объема, в противном случае возможна поломка штампа. Этот металл выполняет технологическую функцию, а именно: тонкий слой металла создает значительное противодействие течению металла в зазор между частями штампа, увеличивая гидростатическое давление в штампе, обеспечивает заполнение угловых элементов ручья. За счет этого материал заготовки затекает в глубокие полости и углы ручья штампа. При этом реализуется возможность регулирования заполнения штампа.

Глубокая часть магазина снижает прочность стенки ручья. Поэтому ее размещают в верхней части штампа, так как она, соприкасаясь с горячим металлом, в течение более короткого времени разогревается меньше нижней части штампа и стенки ручья остаются достаточно прочными.

По виду и расположению элементов канавки также бывают с одинаковым мостиком и магазином в обеих частях штампа и с расширенным нижним магазином, с верхним или с нижним мостиком, с предварительным магазином, с мостиком без магазина или клиновые канавки без магазина и мостика.

В случаях применения клиновой канавки силы, тормозящие истечение металла в заусенец, по мере заполнения канавки стремительно возрастают. Это резко повышает давление в полости ручья и обеспечивает быстрое и четкое его заполнение при весьма небольшом заусенце. Трудность изготовления клиновой канавки ограничивает их применение.

Основной недостаток штамповки в открытых штампах – это большие потери металла на заусенец, которые зависят от массы и формы поковок и могут достигать 30 % и более. Волокна металла при удалении облоя оказываются перерезанными, что существенно снижает качество поковок. Несмотря на потери металла, этот способ штамповки имеет широкое распространение, т.к. в данном случае обеспечивается надежное заполнение полостей штампа и можно получить поковки всех типов.

Штамповка *в закрытых штампах* (см. рис. 6.29, б) характеризуется тем, что полость штампа в процесс деформирования остается закрытой. Зазор между подвижной и неподвижной частями штампа постоянный и небольшой, образование в нем облоя не предусмотрено. Штамповку в закрытых штампах (безоблойную штамповку) применяют для получения поковок несложной формы с небольшой разницей в размерах сечений.

При штамповке в закрытых штампах необходимо строго соблюдать равенство объемов заготовки и поковки $V_{\text{заг}} = V_{\text{пок}}$, 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.

К преимуществам штамповки в закрытых штампах относятся:

- отсутствие дополнительных операций обрезки заусенца;
- благоприятная для обработки схема всестороннего сжатия;

– значительная экономия металла по сравнению со штамповкой в открытых штампах.

Штамповка в закрытых штампах характеризуется благоприятной схемой всестороннего сжатия, меньшей величиной уклонов ($\alpha = 1 \dots 3^\circ$), чем при открытой штамповке. Особенно эффективна схема штамповки в закрытых штампах для малопластичных сплавов, так как боковой подпор стенок полости штампа значительно повышает гидростатическое давление, в результате чего пластичность металла возрастает. Кроме того, макроструктура поковок характеризуется тем, что волокна металла получают очертания контура поковки и не перерезаны.

Недостатки штамповки в закрытых штампах: отсутствие универсальности, ограниченность рациональных форм, необходимость предварительной подготовки заготовок точных размеров и необходимость использования в штампах выталкивателей. При нарушении высокой точности объема (массы) заготовок наблюдается повышенный износ штампа, что приводит к нарушению технологического процесса и даже может явиться причиной аварии. Точность поковки по высоте ниже, чем при штамповке в открытом штампе.

Во избежание перегрузки штампов и оборудования при нарушении условия равенства объемов заготовки и поковки применяют компенсаторы. Это специальный приемник излишков металла, расположенный в месте наиболее трудного заполнения металлом штампа, в который выдавливается лишний металл после оформления поковки. В отдельных случаях компенсатор выполняет те же функции, что и заусенечная канавка, при этом металл тормозится при выходе из полости штампа, обеспечивая заполнение всех его углов, и в то же время излишки металла поступают в компенсатор, не создавая перегрузки инструмента и оборудования.

Доля поковок, получаемых в закрытых штампах, пока составляет меньше 10 % от всех поковок.

Для уменьшения износа штампов и облегчения извлечения поковки из ручья штампа при штамповке широко применяют смазочно-охлаждающие технологические средства. Наиболее широкое применение в качестве смазочного материала в горячей объемной штамповке находят различные графитовые композиции и, в том числе, масляно-графитовая композиция, состоящая из отработанного масла и графитовой пудры.

Термическая обработка поковок

Недостатки, которые могут появиться в материале заготовки при нагреве и ковке, это крупнозернистое строение в результате перегрева или рано законченнойковки и упрочнения, как и следствие неравномерного охлаждения. Внутренние напряжения устраняют последующей термообработкой – отжигом или нормализацией. При термообработке температуру нагрева выбирают в соответствии с видом термообработки и критическими температурами, характерными для металла данной марки.

В результате термической обработки улучшаются не только механические свойства поковки, но и ее обрабатываемость резанием.

Отпуск и отжиг поковок из сталей различных марок производят с фазовой перекристаллизацией и без нее. Отпуск проводят для снятия внутренних напряжений, его осуществляют путем нагрева поковок до требуемой температуры (низкотемпературный до 250°C, среднетемпературный до 450°C и высокотемпературный до 650°C) с последующим охлаждением на воздухе.

Изотермический отжиг проводят с целью придания поковке кристаллического состояния – пластинчатый перлит. Осуществляется изотермический отжиг путем нагрева поковки до аустенитного состояния с последующим охлаждением ниже температуры перлитного превращения (линия 723°C), изотермической выдержкой при данной температуре и охлаждением на воздухе. Применение изотермического отжига позволяет сократить время на отжиг от 3 до 4 раз. Особенно целесообразно применять такой отжиг для поковок из легированной стали.

Рекристаллизационный отжиг проводят без фазовой перекристаллизации. Его осуществляют путем нагрева поковок до температуры ниже температуры фазовой кристаллизации, выдержки при этой температуре и последующего охлаждения. Этот вид отжига применяется для холоднокатаной стали и холодноштампованных изделий.

Отжиг на зернистый перлит осуществляют путем нагрева поковки до температуры несколько выше температуры перлитного превращения (линии 723°C), выдержке при этой температуре и последующем медленном охлаждении. Как следует из названия, этот вид отжига применяется для придания поковкам мелкозернистой структуры. Его используют для термообработки поковок из высоколегированных сталей.

Полный отжиг – вид термообработки поковок, характеризующийся наибольшей продолжительностью процесса. Осуществляют полный отжиг путем нагрева стальных поковок до температуры от 30 до 50°С выше линии 723°С с выдержкой и последующим медленным охлаждением вместе с печью.

Нормализация – нагрев заэвтектоидной стали до температуры на 50 °С выше линии превращения с выдержкой при этой температуре и последующим охлаждением на воздухе.

Высокую нормализацию выполняют для поковок из низкоуглеродистой стали путем нагрева их до температуры несколько выше температуры полного отжига (примерно до 1000 °С) с выдержкой при данной температуре и последующим охлаждением на воздухе.

Очистка поковок от окалины

Для придания поковкам лучшего вида и для повышения стойкости режущего инструмента поковки подвергают очистке от окалины, которая образуется в результате нагрева перед ковкой и в результате термообработки. Существует несколько видов удаления окалины, из которых наиболее распространенными являются очистка дробью, в барабанах и травление. Очистка дробью осуществляется чугунными дробинками диаметром до 2 мм, летящими со скоростью до 60 м/с в специальных метательных барабанах. При этом поковки находятся на движущейся бесконечной ленте. Бывает и дробеструйная очистка, когда дробинки подают воздушной струей. Недостатки очистки дробью – ее значительный расход (от 2,5 до 3,5 кг/т поковок, дробинки крошатся и их безвозвратно теряют).

Обработку поковок во вращающемся барабане с металлическими звездочками, абразивным боем и т.д. применяют для сравнительно мелких поковок простой конфигурации, чтобы избежать забоин поверхности изделий. Недостатки – шум установки, невозможность очистки внутренних полостей, периодичность процесса.

Травление – воздействие раствора кислоты на металл. Для стальных поковок применяют 20%-й раствор серной кислоты при температуре от 60 до 90°С, реже 15%-й раствор соляной кислоты или смесь указанных кислот. Травление стальных поковок применяют редко, так как этот процесс дорогой и при нем плохие санитарно-гигиенические условия труда. Травление широко используется для очистки от окалины поковок из цветных сплавов.

Оборудование для объемной штамповки

Объемную штамповку выполняют на молотах, на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП) и на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ).

На молотах осуществляется штамповка и в закрытых, и в открытых штампах. Используются штамповочные молоты (для стальных поковок) с массой падающих частей 15–25 т. В качестве инструмента применяют молотовые штампы.

Достоинства этого вида штамповки:

- возможность осуществления энергоемких операций за счет высоких скоростей деформации и многократного обжата в ручьях;
- универсальность и простота эксплуатации;
- возможность деформации малопластичных сплавов.

Недостатки:

- низкая степень автоматизации и механизации;
- экологический вред и тяжелые условия труда;
- необходимость в больших фундаментах.

Штамповка на КГШП является современным видом обработки металла, позволяющим исключить динамические удары и осуществлять деформацию за счет нажимов бойками. При этом КГШП имеют более высокий коэффициент полезного действия и примерно при той же производительности – возможность более полной механизации и автоматизации. Так как КГШП сравнительно тихоходная машина, то деформацию металла осуществляют, как правило, в двух-ручьевом штампе. В качестве вспомогательного оборудования для фасонирования заготовок (приближения к окончательной форме поковки) используются ковочные вальцы.

Технологический процесс штамповки на КГШП состоит из следующих операций:

- вальцовки;
- штамповки в предварительном ручье;
- штамповки в окончательном ручье;
- обрезки заусенца на обрезных прессах.

Штамповкой на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ) изготавливают преимущественно асимметричные поковки в виде стержней с утолщениями разной формы. Особенностью является то, что штампы имеют плоскость разъема в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

К преимуществам данного процесса относятся:

- штамповка, которая, как правило, проводится без облоя, то есть когда нет необходимости в дополнительных операциях;
- отсутствие штамповочных уклонов;
- простота конструкции штампов;
- возможность изготовления длинноосных деталей;
- получение волокновой структуры.

6.4.3 Специальные методы обработки металлов давлением

Объемная изотермическая штамповка

Одной из передовых технологий, которая позволяет получать высококачественные заготовки и экономить металл, является объемная изотермическая штамповка (или ковка).

Изотермическая штамповка представляет собой процесс горячей деформирования заготовок в штамповом инструменте, при котором заготовка и инструмент нагреты до температуры горячей либо полугорячей штамповки материала. Термин «изотермическая штамповка» относится к условиям выполнения технологической операции пластического деформирования, а не к состоянию деформируемого материала во время выполнения этой операции.

В отличие от обычной объемной горячей штамповки при изотермической штамповке штамп и штампуемая заготовка нагреты в процессе деформирования до одной и той же высокой температуры, что исключает нежелательное охлаждение поверхности заготовки и возникающий перепад температур. Это существенно улучшает условия для пластического течения материала и позволяет получать высококачественные заготовки, значительно более близкие по форме к конечным требованиям.

Горячая изотермическая штамповка имеет ряд преимуществ перед традиционной горячей объемной штамповкой, а именно:

- 1) равномерное распределение температуры по сечению поковки;
- 2) меньшее значение силы деформирования вследствие меньшего значения скорости деформации и скорости деформирования;
- 3) повышенная пластичность материала вследствие более полного разупрочнения и залечивания дефектов;
- 4) однородность деформации.

Изотермическая штамповка позволяет обеспечить высокую точность штамповки заготовок сложных конфигураций, особенно тонкостенных поковок, характеризующихся большим отношением площади поверхности к объему.

Точность и качество заготовок, штампованных в изотермических условиях, достигается в результате:

- уменьшения упругих деформаций системы пресс-штамп из-за снижения сопротивления деформированию штампуемого металла и усилия штамповки;

- уменьшения колебаний температуры деформации;

- снижения остаточных напряжений в объеме штампованной поковки, что уменьшает ее поводки при остывании и термообработке.

Наиболее эффективной областью применения изотермической штамповки является деформирование высокопрочных и малопластичных сплавов магния, титана, алюминия, например высококремнистых сплавов алюминия, изготовленных методом порошковой металлургии.

Изотермическая штамповка позволяет:

- изготавливать штамповки непосредственно из исходного литого материала, имеющего плохую пластичность;

- штамповки с небольшими штамповочными уклонами или без них, с резкими перепадами сечений, малыми радиусами переходов и припусками на обработку резанием;

- осуществлять горячее изостатическое прессование для устранения микропористости, встречающейся обычно в алюминиевых отливках;

- штамповать металлы в сверхпластичном состоянии.

Изотермический способ позволяет экономить вес исходного материала. В некоторых случаях вес материала штампуемой заготовки бывает примерно в три раза меньше, чем требуется для аналогичной детали при обычной штамповке.

Изотермическая штамповка выполняется на тихоходных прессах, в частности гидравлических прессах. Скорость деформирования менее 0,005 м/с.

Однако в отличие от обычной горячей штамповки изотермическая штамповка требует применения более дорогих материалов для изготовления штамповой оснастки и сложного оборудования для точного поддержания температуры штампа в процессе деформирования металла.

Так как штампы нагревают приблизительно до той же температуры, что и заготовку, обычные инструментальные стали не могут быть использованы для изготовления штампов изотермической штамповки из-за их недостаточной стойкости.

Поэтому для штампов изотермической штамповки в зависимости от марки штампуемого материала могут применяться теплостойкие стали либо жаропрочные стали и сплавы. Например, при изотермической штамповке алюминиевых сплавов рабочий инструмент изготавливают из теплостойких сталей марок 5ХНВ (5ХНМ), 4Х5В2ФС и др.

Штамповка с использованием сверхпластичности

При горячей деформации ряда сплавов в некоторых условиях проявляется явление сверхпластичности. Сверхпластичность – способность поликристаллических твёрдых тел к большим пластическим деформациям при растяжении. При этом достигается удлинение образцов до несколько тысяч процентов, тогда как при обычных пластических деформациях поликристаллические материалы удлиняются не более чем на десятки процентов.

Состояние сверхпластичности отличается малым сопротивлением металлов пластической деформации и проявляется:

1) при наличии исходной ультрамелкозернистой структуры с равновесными зёрнами размером не более 10 мкм;

2) при температурах выше $0,4T_{пл}$, когда у металлов в процессе пластической деформации происходят фазовые или иные структурные изменения;

3) при скоростях деформации $10^{-4} \dots 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Состояние сверхпластичности можно определить совокупностью признаков:

1) повышенная чувствительность σ_s к изменению скорости деформации;

2) крайне незначительная величина деформационного упрочнения;

3) аномально высокий ресурс деформационной способности;

4) напряжение текучести σ_s материала в состоянии сверхпластичности в несколько раз меньше предела текучести, характеризующего пластическое состояние данного материала.

Режимы сверхпластичности установлены уже примерно для 150 черных и цветных металлов и сплавов. В большинстве случаев это

состояние характеризуется повышенной на один порядок пластичностью при пониженном на порядок сопротивлении деформации. В этом состоянии сплавы находятся, например, при температуре немного выше температуры начала рекристаллизации и должны иметь чрезвычайно мелкозернистую структуру (величина зерна 1...5 мкм). В этих условиях и проявляется сверхпластичность при определенной скорости деформации, которая чаще всего невелика, но может быть и значительной.

Преимущества обработки давлением в состоянии сверхпластичности – повышенный ресурс пластичности и, следовательно, возможность значительного формоизменения за одну операцию.

Повышенная текучесть и малые удельные усилия при штамповке сверхпластичных материалов способствуют более качественному воспроизведению формы ручья штампа, повышению точности размеров и чистоты поверхности поковок, уменьшению разброса размеров в пределах партии поковок. Высокая способность к релаксации напряжений материалов в состоянии сверхпластичности практически исключает внутренние напряжения в изделиях, а это, в свою очередь, обеспечивает стабильность размеров и формы готовых деталей, повышенную стойкость металла детали против коррозии в химически активных средах, исключает коробления в процессе и после термообработки и т.д. И наконец, отсутствие существенных изменений структуры материала заготовки в процессе сверхпластической деформации обеспечивает получение высококачественных штампованных поковок, изотропных в отношении структуры и механических свойств.

Различают две разновидности сверхпластичности: 1) структурную и 2) связанную с фазовыми превращениями.

Структурная сверхпластичность проявляется у металлов с особо мелким зерном ($d \leq 10$ мкм). Большая зависимость эффекта сверхпластичности от исходного размера зерен: чем меньше зерно, тем больше склонность материала к скоростному упрочнению, соответственно больше его деформационная способность и меньше погрешность течения. При этом необходимо, чтобы зерна имели равноосную форму, а также в процессе нагрева до температуры деформирования и при последующем деформировании обладали устойчивостью против роста (собирающей рекристаллизации).

Сверхпластичность полиморфных металлов проявляется при деформировании их в процессе фазовых превращений.

В сверхмелкозернистое состояние сплавы обычно переводят предварительной термической или термомеханической обработкой. Это достигается интенсивной пластической деформацией по специальному режиму. Логарифмическая степень накопленной деформации должна быть не менее 5,0, а конечная температура должна соответствовать условиям низкотемпературной сверхпластичности.

Температурный интервал существования структурной сверхпластичности металлов может находиться от температуры начала рекристаллизации ($0,4T_{пл}$) до температуры ближе к температуре плавления ($T_{пл}$).

Признаки свойств сверхпластичности проявляются в определенных условиях.

1) Температура процесса сверхпластичности должна поддерживаться постоянной по объему деформируемого металла в течение всего периода деформирования, чтобы обеспечить равномерное течение материала (изотермические свойства пластичности).

2) Скорость деформации должна быть:

а) достаточно малой, чтобы успевали протекать диффузные процессы;

б) достаточной высокой, чтобы в условиях повышенных температур не допускать роста зерен.

В основном скорость деформации 10^{-2} (10^{-3})... 10^{-4} с⁻¹, т.е. между скоростями высокотемпературной ползучести и скоростями деформации, используемыми (при обычной штамповке) в процессах ОМД – 2...10 мм/с.

Область применения сверхпластичности при штамповке

1) Штамповка малопластичных и труднодеформируемых сплавов на основе Ni, Ti, Al, Fe и магния. Состояние сверхпластичности этих сплавов позволяет существенно увеличить деформацию: один технологический переход – переход к малооперационной технологии.

2) Штамповка деталей особо сложной формы (тонкостенные детали, сложной формы с оребрением). Улучшение качества готовой продукции: лучшее заполнение ручья штампа; повышается точность размеров; меньше шероховатость детали.

Поковки, изготовленные за счет сверхпластичности, как правило, не нуждаются в обработке резанием (кроме сверления). На рис. 6.34 представлен анализ эффективности различных видов обработки при изготовлении детали сложной формы.

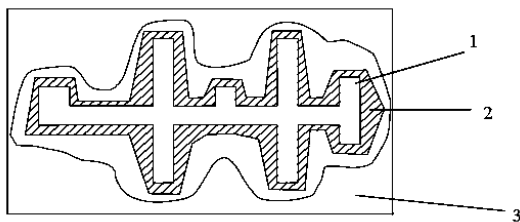


Рис. 6.34. Сопоставительный анализ эффективности процесса сверхпластичности: 1 – деталь; 2 – отход (ковка); 3 – отход (литье)

Штамповые уклоны не более 1° . КИМ $\geq 0,8$ (обработка на прессах – КИМ = 0,2...0,5), что очень важно при штамповке из дорогостоящих материалов.

3) Снижение усилий штамповки и мощности применяемого оборудования. Малые удельные усилия при деформировании в состоянии сверхпластичности способствуют существенному увеличению стойкости штампованного инструмента и позволяют заметно уменьшать его по стоимости.

В целом преимущества использования эффекта сверхпластичности в процессах обработки давлением сводятся к следующему:

- 1) простота и низкая стоимость инструмента;
- 2) исключение промежуточных термообработок;
- 3) достижение полного повторения профиля и контуров штампа;
- 4) практически неограниченная степень деформации;
- 5) высокое качество поверхности;
- 6) получение оптимальной структуры и свойств обработанного металла.

Из недостатков необходимо отметить следующие:

- 1) низкая скорость деформации;
- 2) необходимость поддержания с высокой точностью температурного интервала деформирования, что в ряде процессов требует подогрева инструмента (прокатка, прессование, объемная штамповка);
- 3) необходимость применения нового технологического оборудования или дополнительной оснастки;
- 4) необходимость подготовки структуры обрабатываемого металла при реализации эффекта изотермической сверхпластичности.

В настоящее время реализуются такие технологические процессы, как, например, бесфильтрное волочение, газостатическая формовка, которые вообще не нуждаются в прессовом оборудовании.

Оригинальным способом формоизменения является бесфильтренное волочение, объединяющее нагружение только растягивающими усилиями с локализованным нагревом. Трубную заготовку (рис. 6.35) зажимают с одного торца, а другой вытягивается с контролируемой скоростью v_2 . Индуктор нагревает локализованный участок трубы до сверхпластичного состояния и перемещается со скоростью v_1 .

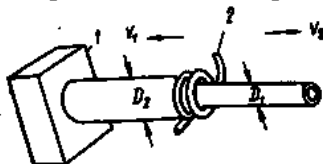


Рис. 6.35. Схема метода бесфильтренного волочения: 1 – фиксатор, 2 – индуктор

Полученное обжатие определяется из простой формулы:

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \left(\frac{v_2}{v_1}\right) - 1.$$

За один проход были достигнуты обжатия до 50 %. Многократные проходы позволяют получить большие суммарные обжатия. Указанная схема перспективна для случаев, когда необходимо сохранить осевую симметрию при обжатии заготовок. Конические формы получаются при условии, что одна скорость будет постоянной, а другая – переменной. Аналогичным способом листы или пластины можно прокатать до любого заданного размера, при этом для локального нагрева при деформировании может быть использовано контактное сопротивление в очаге деформации.

Процесс обработки материала в режиме сверхпластичности позволяет получать деталь неограниченной сложности по форме. Однако многие сверхпластичные материалы не нашли широкого промышленного применения. Поэтому более перспективны процессы обработки давлением промышленных сплавов в температурно-скоростном режиме сверхпластичности.

Появляются новые способы формоизменения для использования уникальных свойств сверхпластичного состояния сплавов. Например, способы вакуумного или вакуумно-газового прессования с механической подпрессовкой либо без нее легко применимы к вытяжке листа сверхпластичных металлов (рис. 6.36).

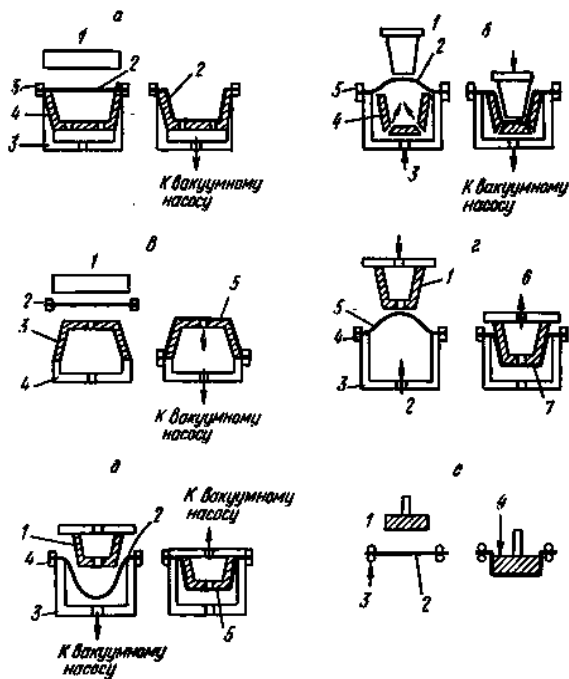


Рис. 6.36. Схемы способов вакуумно-газового термопластического формоизменения:

- а – способ прямой вакуумной вытяжки; б – формоизменение с волнообразным плунжером; в – фасонная гибка; г – формоизменение с обратной обжимкой; д – вакуумная вытяжка с обратной обжимкой; е – вакуумная вытяжка с плунжером и скользящими кольцами

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Раздел «Физические основы обработки металлов давлением»

1. Что представляет из себя элементарная кристаллическая ячейка? Основные типы кристаллических решеток металлов и сплавов?
2. Что такое полиморфизм?
3. Виды деформации твердых тел?
3. Основные механизмы пластической деформации кристаллических тел?
4. Роль кристаллографических плоскостей в механизме пластической деформации?
5. Назовите основные типы дислокаций в монокристаллах.
6. Роль и влияние плотности дислокаций на сопротивление деформированию?
7. Понятие о сопротивлении деформации?
8. Величины, характеризующие пластическую деформацию?
9. Основные законы пластической деформации?
10. Закон постоянства объема. Физическая сущность. Где и как учитывается в процессах ОМД?
11. Закон сдвигающих напряжений. Физическая сущность и механизм проявления в процессах ОМД?
12. Закон наименьшего сопротивления. Его сущность и применение в расчетах процессов ОМД?
13. Закон подобия. Его сущность и применение в проектировании процессов ОМД?
14. Закон дополнительных напряжений. Виды и причины возникновения дополнительных напряжений?
15. В чем заключается сущность механизма пластической деформации двойникованием?
16. Как происходит пластическая деформация в поликристалле?
17. Чем отличаются внутри- и межкристаллитная деформации поликристалла?
18. Как записывается условие несжимаемости?
19. Сущность закона постоянства секундных объемов?
20. Главные условия подобия процессов пластического деформирования?

Раздел «Изменение механических характеристик материалов при пластической деформации»

1. Что называется деформационным упрочнением и разупрочнением?
2. При каких температурных условиях протекают процессы возврата и рекристаллизации металла?
3. Влияние наклепа на физические свойства материала?
4. Что такое рекристаллизация. Виды рекристаллизации?
5. Связь температуры рекристаллизации с абсолютной температурой нагрева?
6. Виды деформации при обработке давлением. Отличия и температурный диапазон?
7. Характер протекания процессов упрочнения и разупрочнения при горячей, неполной горячей, неполной холодной и холодной деформации?
8. Факторы, влияющие на пластичность металлов и сплавов?
9. Влияние химического состава и структуры на пластичность?
10. Влияние температуры на пластичность металлов и сплавов?
11. Влияние скорости деформации на пластичность металлов и сплавов?
12. Влияние схемы напряженного состояния и схемы главных деформаций на пластичность металлов и сплавов?
13. Схемы главных напряжений?
14. Схемы главных деформаций?
15. Чем различаются горячая и холодная деформации?
16. Какова зависимость сопротивления металла пластической деформации от температуры?
17. Какая схема напряженного состояния наиболее благоприятна для проявления пластических свойств?

Раздел «Нагрев металла в технологических процессах обработки давлением»

1. Цель и разновидности нагрева?
2. Основные задачи при разработке технологии нагрева?
3. Температурный интервал обработки металлов давлением?
4. Устранимый и неустраняемый вид брака при нагреве?

5. Влияние скорости и времени нагрева на качество изделий при ОМД?
6. Факторы, влияющие на величину угара?
7. Методы уменьшения окисления и обезуглероживания металла при нагреве?
8. Виды безокислительного нагрева?
9. При какой температуре у металла наибольшая пластичность?
10. Что происходит с пластичностью металла в области температур фазовых превращений?
11. Как влияет скорость деформации на пластичность при различных температурах обработки?
12. Как влияет степень деформации на пластичность?
13. Назначение промежуточной термообработки в ОМД?
14. При каких температурах в чистых металлах протекают возврат и рекристаллизация?
15. К чему приводит перегрев металла в процессе ОМД? Можно ли исправить этот дефект металла?
16. Какие дефекты в процессе ОМД можно исправить, а какие исправить нельзя?
17. Почему способы ОМД в основном проводят при температурах выше температуры рекристаллизации?
18. Какой способ (или способы) ОМД предполагает обработку металла при температурах ниже температуры рекристаллизации?
19. Как влияет скорость деформации на сопротивление деформированию?

Раздел «Внешнее трение при обработке металлов давлением»

1. Роль трения при обработке металлов давлением?
2. Основные отличия трения при ОМД и трения в деталях машин?
3. Назовите три вида контактного трения?
4. Законы трения при ОМД?
5. Влияние различных факторов на коэффициент (показатель) трения?
6. Дайте характеристику сухого трения.
7. Назовите процессы, в которых может быть реализовано жидкостное трение и каковы условия для его реализации?
8. Сущность закона трения Амонтона-Кулона?

9. Какое дополнительное условие нужно принимать в расчет при пользовании законом Амонта-Кулона?
10. Сущность закона трения по Зибелю?
11. Назовите шесть основных факторов, влияющих на контактное трение.
12. При каких процессах ОМД силы трения оказывают активное действие?
- 13.. В каких пределах изменяется показатель трения?
14. В каких пределах изменяется коэффициент трения?
15. В каких случаях предпочтительнее применять законы трения Амонта-Кулона и Зибеля?

Раздел «Сопrotивление металлов пластической деформации»

1. Как определяется удельное усилие деформирования?
2. Связь между напряжениями и деформациями?
3. Условия пластичности Губера-Мизеса?
4. Что такое «скорость деформирования»?
5. Что такое «скорость деформации»?
6. Какова зависимость сопротивления металла пластической деформации от температуры?
7. Что такое «пластичность»?
8. Какие факторы влияют на пластичность?
9. Как влияет на пластичность состав и структура деформируемого металла?
10. Какие показатели напряженного состояния используются в теории ОМД?
11. Как рассчитываются показатели напряженного состояния при растяжении?
12. Какова зависимость сопротивления металла пластической деформации от степени деформации?
13. В виде какой математической модели представляют кривую упрочнения?
14. Что такое «анизотропия»?
15. Что такое «текстура деформации»?
16. Какие факторы влияют на сопротивление металла пластической деформации при горячей обработке?
17. В каком случае сопротивление деформации не зависит от степени деформации?

18. Сущность гипотезы единой кривой?
19. Как зависит процесс разупрочнения от скорости деформации?
20. Какова зависимость сопротивления металла пластической деформации от степени деформации?

Раздел «Основы технологических процессов обработки давлением»

1. Определение процесса прокатки. Способы прокатки?
2. Схема напряженного и деформированного состояния при прокатке?
3. Геометрия очага деформации при прокатке. Различие геометрического и фактического очага деформации?
4. Параметры, влияющие на опережение металла при прокатке?
5. Закон секундных объемов?
6. Параметры, влияющие на уширение металла при прокатке?
7. Основные технологические операции прокатного производства?
8. Разновидности прокатных станов, их назначение по виду проката?
9. Продукция прокатного производства?
10. Изготовление бесшовных труб. Изготовление сварных труб?
11. Определение процесса прессования?
12. Схема напряженного и деформированного состояния при прессовании?
13. Оборудование и инструмент для прессования?
14. Основные методы получения изделий прессованием металла. Достоинства и недостатки?
15. Способы прессования труб. Достоинства и недостатки?
16. Технологические особенности разных видов прессования?
17. Прессование через многоканальную матрицу?
18. Особенности прессования некруглых профилей?
19. Технология прессования?
20. Скорости прессования и истечения?
21. Преимущества и недостатки процесса прессования по сравнению с сортовой и трубной прокаткой?
22. Определение процесса волочения?

23. Схема напряженного и деформированного состояния при волочении?
24. Геометрия и материалы для изготовления волок?
25. Основные величины, характеризующие деформацию при волочении?
26. Определение усилия волочения. Значения коэффициентов запаса рекомендуют для устойчивого протекания процесса волочения?
27. Основные факторы, влияющие на силу и напряжение волочения?
28. Гидродинамическая подача смазки при волочении?
29. Технологические операции при волочении?
30. Ковка, сущность процесса и назначение основных операций?
31. Оборудование дляковки?
32. Объемная штамповка, сущность процесса и классификации способов штамповки?
33. Преимущества и недостатки штамповки в закрытых штампах?
34. Термическая обработка поковок. Основные операции и их назначение?
35. Методы очистки поковок от окалины?
36. Для чего необходим заусенец (облой) при штамповке в открытых штампах?
37. В чем заключается принципиальное отличиековки от объемной штамповки?
38. В чем различие горячей и холодной объемной штамповки?
39. Горячая изотермическая штамповка. Преимущества и недостатки?
40. Штамповка с использованием сверхпластичности?
41. Сущность явления сверхпластичности. Разновидности возникновения режима сверхпластичности?
42. Условия проявления сверхпластичности?
43. Область применения сверхпластичности при штамповке?
44. Технологические процессы с использованием режимов сверхпластичности?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Титов, Ю.А.* Специальные способы обработки металлов давлением (Раздел 2: основные технологии ОМД): учеб. пособие / Ю.А. Титов, В.Н. Кокорин, А.Ю. Титов. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. 78 с.
2. *Филимонов, В.И.* Теория обработки металлов давлением: учеб. пособие / В.И. Филимонов, О.В. Мищенко. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. 208 с.
3. Теория обработки металлов давлением: конспект лекций и варианты заданий для выполнения курсовой работы / сост. Н.Н. Загиров, Э.А. Рудницкий. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2011. 56 с.
4. *Колмогоров В.Л.* Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов / 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета – УПИ, 2001. 836 с.
5. *Богатов А.А.* Механические свойства и модели разрушения металлов: учеб. пособие для вузов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.
6. *Кучеряев Б.В.* Механика сплошных сред: учебник для вузов. – М: МИСиС, 2000. 320 с.
7. *Константинов И.Л., Сидельников С.Б.* Основы технологических процессов обработки металлов давлением: учебник. – Красноярск, СФУ, 2014. 512 с.
8. *Сидельников, С.Б.* Элементы расчетов процессов обработки металлов давлением : учеб. пособие / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, И.С. Гоголь. – Красноярск: ГУЦМиЗ, 2005. 105 с.
9. *Сидельников, С.Б.* Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. – М.: МАКС Пресс, 2005. 343с.
10. *Еланский, Г.Н.* Основы производства и обработки металлов: учебник для вузов / Г.Н. Еланский, Б.В. Линчевский, А.А. Кальмев. – М. : МГВМИ, 2005. 416 с.