

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН**

**КАРАГАНДИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

С.Н. Лежнев

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Учебное пособие

Темиртау 2013

УДК 669:0(075.8)
ББК 34.1я73
Т33

Рецензенты:

Задиранов А.Н. – доктор технических наук, профессор Московского государственного машиностроительного университета «МАМИ»;
Соломонов К.Н. – доктор технических наук, профессор Воронежского филиала Московского государственного университета путей сообщения

Лежнев С.Н.

Теоретические основы обработки металлов давлением: Учебное пособие. –
Темиртау: КГИУ, 2013. – 124 с.

ISBN 978-601-7369-27-9

В учебном пособии кратко изложены базовые положения теории обработки металлов давлением, с использованием которых в дальнейшем производится анализ и осуществляется разработка общих принципиальных основ рационального построения процессов пластической деформации. Рассмотрены вопросы, касающиеся основных законов и принципов, которым подчиняется поведение металлов при пластической деформации; закономерностей и особенностей возникновения контактного трения, а так же его учета при пластическом формоизменении и др. Так же в учебном пособии кратко разобраны основные способы обработки металлов давлением.

Учебное пособие может быть полезным для студентов специальностей: «Машиностроение», «Металлургия», Технология обработки материалов давлением».

Рекомендовано к изданию учебно-методической секцией по специальности «Технология обработки материалов давлением» (Протокол №1 от 07.02.2013 года).

УДК 669:0(075.8)
ББК 34.1я73

ISBN 978-601-7369-27-9

© МОиН РК
© КГИУ
© Лежнев С.Н.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ И ВИДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	7
2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	9
2.1 Условие постоянства объема.....	9
2.2 Условие постоянства секундных объемов.....	10
2.3 Коэффициенты деформации.....	11
2.4 Вытяжка средняя и суммарная.....	14
2.5 Скорость деформации.....	14
3 МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	15
3.1 Краткие сведения о строении металлов.....	15
3.2 Дефекты в кристаллах.....	17
3.3 Пластическая деформация монокристалла.....	20
3.4 Пластическая деформация поликристалла.....	22
4 НАПРЯЖЕННОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ТОЧКЕ ТЕЛА.....	23
4.1 Напряженное состояние в точке тела.....	23
4.2 Деформированное состояние в точке тела.....	27
4.3 Условие пластичности.....	28
4.4 Условие постоянства максимальных касательных напряжений.....	29
5 ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ ПРИ ОМД.....	30
5.1 Общие положения	30
5.2 Роль трения при ОМД.....	32
5.3 Механизмы трения	33
6 ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ ПРИ ОМД.....	36
6.1 Закономерности контактного трения при ОМД.....	36
6.2 Механизм приконтактных деформаций при трении	39
6.3 Трение при различных видах ОМД.....	40
7 СМАЗКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	41
7.1 Смазки для ОМД.....	41
7.2 Виды и назначение смазок	42
7.3 Требования к смазкам.....	46
7.4 Смазки для холодной прокатки стали.....	47
7.5 Смазки для горячей прокатки стали.....	48

7.6 Смазки для волочения.....	49
7.7 Смазки дляковки и объемной штамповки.....	49
8 РАВНОМЕРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ.....	50
9 НЕРАВНОМЕРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ.....	51
10 НАПРЯЖЕНИЯ.....	56
11 МЕХАНИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДЕФОРМАЦИИ	60
12 ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....	63
12.1 Влияние различных факторов на пластичность металла.....	63
12.2 Методы оценки пластичности.....	65
13 СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПЛАСТИЧЕСКОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ.....	69
14 ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ.....	72
14.1 Виды разрушения.....	72
14.2 Влияние различных факторов на характер разрушения.....	74
15 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	74
16 ТЕОРИЯ ПРОКАТКИ.....	77
16.1 Определение процесса прокатки. Продольная прокатка.....	77
16.2 Геометрия очага деформации при прокатке.....	78
16.3 Условие захвата металла валками.....	79
16.4 опережение и уширение.....	82
16.5 Виды продольной прокатки и получаемая продукция.....	83
16.5.1 Классификация основной продукции, получаемой продольной прокаткой.....	83
16.5.2 Получение профилей переменного и периодического сечения.....	84
16.6 Оборудование для прокатки.....	86
16.7 Описание технологических процессов некоторых видов прокатки.....	89
16.7.1 Производство блюмов и слэбов.....	89
16.7.2 Производство труб на станах поперечно-винтовой прокатки.....	90
16.7.3 Производство труб на станах холодной прокатки труб.....	91
16.7.4 Производство сварных труб.....	92
17 ПРЕССОВАНИЕ МЕТАЛЛА.....	93
17.1 Сущность процесса прессования.....	93
17.2 Преимущества и недостатки прессования.....	95

17.3 Способы прессования.....	96
17.4 Стадии прессования. Особенности течения металла.....	98
18 ВОЛОЧЕНИЕ.....	98
18.1 Сущность процесса волочения.....	98
18.2 Основные характеристики процесса волочения.....	99
18.3 Инструмент для волочения.....	101
19 СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА КОВКИ И ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ.....	102
19.1 Назначениековки.....	102
19.2 Основные операцииковки.....	103
19.3 Влияниековки на структуру и свойства металлов.....	108
20 ГОРЯЧАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА.....	110
20.1 Сущность процесса горячей объемной штамповки.....	110
20.2 Виды горячей объемной штамповки.....	111
21 ХОЛОДНАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА.....	116
22 ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА.....	119
22.1 Основные виды продукции.....	119
22.2 Операции листовой штамповки.....	120

ВВЕДЕНИЕ

Использование металлов в большинстве случаев становится возможным только после придания им необходимой формы. Тогда из экономической категории «предметы труда» металлы переходят в категорию «средства труда» или становятся готовым продуктом.

Существует много способов формоизменения металлов, из которых наиболее распространенными являются литейное производство, обработка металлов резанием и обработка металлов давлением.

Литье – наиболее простой, высокопроизводительный и дешевый способ получения отливок практически из всех металлов и сплавов. Литые изделия отличает разнообразие форм от простых до очень сложных. К последним можно отнести изделия, получаемые художественным литьем. Однако для отливок характерны такие дефекты, как пористость, неметаллические включения, крупнозернистая структура. Кроме того, в результате неравномерного охлаждения отливок в них возникают значительные остаточные напряжения.

Поэтому (чаще всего) литые детали не способны работать при значительных силовых и ударных нагрузках и уступают по уровню механических свойств изготовленным обработкой давлением.

Обработкой резанием получают разнообразные детали, имеющие высокую точность размеров и чистоту поверхности. Но при этом в отход в виде стружки идут миллионы тонн металла. Снизить стружкообразование при резании можно за счет использования заготовок, близких по своим размерам к изделиям.

Обработка металлов давлением (ОМД) способна объединить указанные способы получения изделий из металлов. Так, в качестве заготовок для обработки давлением чаще всего используются отливки. В процессе деформирования меняется их структура: измельчается зерно, завариваются поры, устраняется химическая неоднородность (дендритная ликвация) и т.д. Изменения структуры способствуют повышению уровня механических свойств: повышаются прочность и пластичность металлических заготовок. Кроме того, обработанная давлением заготовка становится максимально приближенной к готовой детали по своей форме и размерам, что значительно снижает количество отходов при обработке резанием и упрощает технологию этих процессов.

1 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ И ВИДЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Обработка металлов давлением основывается на способности металлов принимать значительную пластическую деформацию без разрушения. Этот важный технологический процесс металлургического производства обеспечивает не только придание слитку или заготовке необходимой формы и размеров, но и существенно улучшает свойства металлов.

В ряду инженерных дисциплин обработка металлов давлением наиболее близка к литейному производству и особенно к металловедению. Это закономерно, так как, во-первых, исходными заготовками для обработки давлением чаще всего являются слитки. Во-вторых, обработчики имеют дело с металлами, свойства которых определяются их структурой, меняющейся в процессе пластической деформации, обычно протекающей при высоких температурах. Очень эффективным для получения изделий с высокими свойствами является сочетание пластической деформации с термической обработкой – термомеханическая обработка, отражающая связь обработки давлением с металловедением.

В последние годы широкое развитие получили процессы, в которых литье комбинируется с обработкой давлением: прессованием, прокаткой, штамповкой и т.д. Эти способы позволяют повысить свойства изделий и производительность процесса, а также снизить количество отходов.

Как и другие инженерные дисциплины, обработка металлов давлением имеет свою теоретическую базу. Теория обработки металлов давлением разрабатывает общие основы рационального построения и анализа технологии всех процессов. В ее задачи входит определение условий деформации, которые обеспечивают:

- наивысшую пластичность обрабатываемого металла и тем самым возможность достижения максимальной деформации в каждой операции обработки;
- получение заготовок или изделий с оптимальным сочетанием физико-механических свойств;
- проведение процесса при минимальном расходе энергии.

Основные направления теории обработки металлов давлением: механико-математическое, физическое и физико-химическое.

Механико-математическое направление изучает напряжения и деформации в пластически деформируемом теле и условия перехода упругой деформации в пластическую. Это направление использует гипотезы об однородности, изотропности и неизменности свойств металлов в процессе деформации. Перечисленное практически исключает применение этого направления для изучения пластической деформации, основной

особенностью которой является непрерывное изменение физических и физико-механических свойств деформируемого металла.

Физическое направление теоретически и экспериментально исследует механизм пластической деформации с учетом анизотропии, характерной для кристаллического строения металлов. При этом учитывается влияние на процесс пластической деформации металлов температуры, скорости и степени деформации, а также внешнего трения.

Физико-химическое направление изучает связь химического состава и фазового состояния металла с процессом пластической деформации.

Физическое и физико-химическое направления теории обработки металлов давлением тесно связаны с металловедением.

Принято различать шесть основных видов обработки металлов давлением (рис. 1.1): прокатка, прессование, волочение, ковка, объемная штамповка (горячая или холодная), листовая штамповка. Часто перечисленные виды делят на две групп. В первую группу включают прокатку, прессование и волочение, которыми получают однотипную длинномерную продукцию, а ко второй – относят оставшиеся виды, объединяя их в кузнечно-штамповочное производство. Дадим определения каждому из перечисленных процессов обработки металлов давлением.

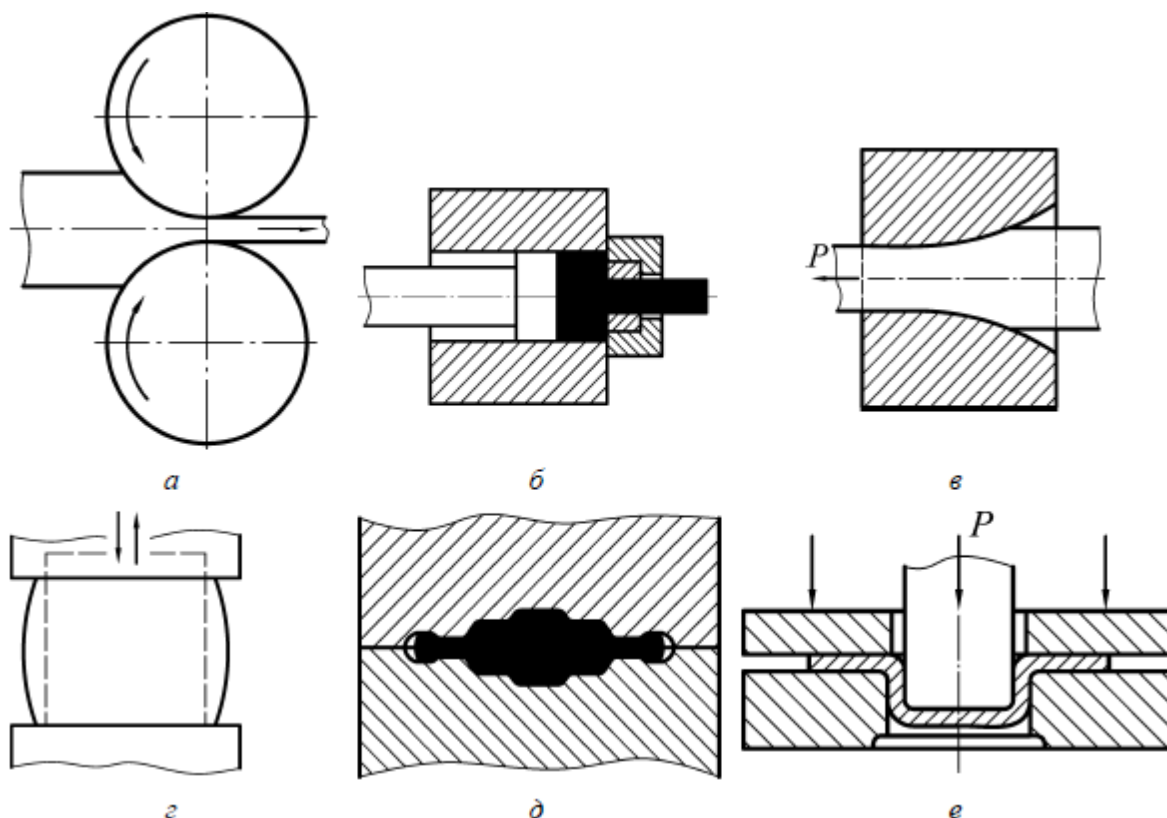


Рис.1.1. Основные виды обработки металлов давлением

Прокатка – пропускание заготовки между вращающимися валками (рис. 1.1, а).

Прессование – выдавливание металла из замкнутого объема через отверстие в прессовом инструменте (рис. 1.1, б).

Волочение – протягивание металла через плавно сужающийся канал волоки (рис. 1.1, в).

Ковка – деформирование металла ударным прерывистым воздействием универсального инструмента (рис. 1.1, г).

Объемная штамповка (горячая или холодная) – процесс деформирования металла, при котором его свободное течение ограничено поверхностями ручьев штампов (рис. 1.1, д).

Листовая штамповка – процесс получения изделия из листовой заготовки, толщина которой в процессе деформации практически не изменяется (рис. 1.1, е).

В соответствующих разделах данного учебного пособия эти процессы будут рассмотрены подробнее.

2 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

2.1 Условие постоянства объема

Если деформация, вызванная внешними силами, исчезает при прекращении действия внешних сил и твердое тело полностью восстанавливает свои исходные форму и размеры, то такую деформацию называют упругой. Если же при прекращении действия внешних сил твердое тело не полностью восстанавливает свои исходные форму и размеры, то такую деформацию называют пластической. Как та, так и другая происходят без разрушения деформируемого тела или отдельных его участков, т.е. без нарушения сплошности.

Пластическая деформация литого металла сопровождается незначительным (1-3 %) изменением объема, в результате чего плотность его несколько возрастает за счет ликвидации имеющихся в нем пустот. Это изменение не имеет практического значения при решении задач, связанных с определением напряжений и деформаций, поэтому им в технологических расчетах пренебрегают и считают, что объем тела до пластической деформации равен его объему после деформации. Математически условие постоянства объема можно записать в виде:

$$V_i = \text{const.} \quad (1)$$

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

Условие постоянства объема неразрывно связано с рассматриваемым в некоторых случаях в теории ОМД условием несжимаемости, согласно которому алгебраическая сумма логарифмических степеней деформации по трем взаимно перпендикулярным направлениям равна нулю. При этом по крайней мере одна из степеней деформации имеет знак, противоположный знаку двух других.

2.2 Условие постоянства секундных объемов

С его помощью устанавливают взаимосвязь между скоростью движения металла и изменениями размеров поперечного сечения деформируемой заготовки при непрерывном режиме обработки. Так, например, при реализации прямого метода прессования (рис. 2.1), когда направление выдавливания металла совпадает с направлением движения пресс-штемпеля, скорость истечения получаемого профиля заданного сечения будет напрямую зависеть от скорости перемещения пресс-штемпеля через рабочую втулку контейнера определенного диаметра.

Формулируется закон постоянства секундных объемов следующим образом: 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:

$$V_i * F_i = \text{const}, \quad (2)$$

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

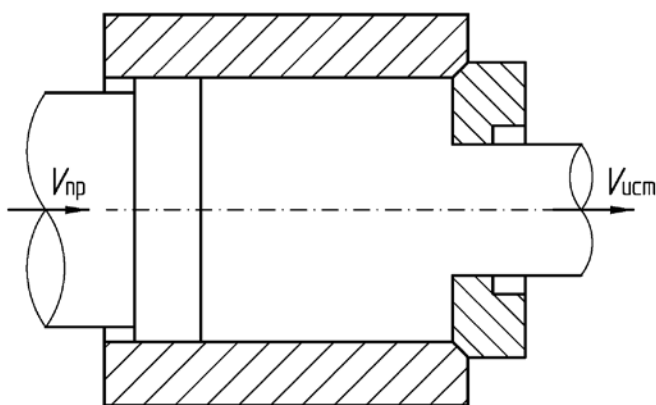


Рис. 2.1. Схема процесса прямого прессования

2.3 Коэффициенты деформации

Для количественной оценки деформации используют различные показатели.

Коэффициенты деформации:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} - \text{коэффициент вытяжки (вытяжка)};$$

$$\beta = \frac{B}{B_0} - \text{коэффициент уширения};$$

$$\eta = \frac{H}{H_0} - \text{коэффициент осадки (обжатия)}.$$

Наиболее часто используют относительную деформацию (показатель Коши, который известен из курса сопротивления материалов):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} - \text{относительная деформация по длине};$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta B}{B_0} - \text{относительная деформация по ширине};$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} - \text{относительная деформация по высоте}.$$

Здесь $\Delta L = L - L_0$; $\Delta B = B - B_0$; $\Delta H = H - H_0$ - абсолютная деформация – разница между конечным и начальным расстоянием между двумя точками тела.

Деформациями Коши обычно пользуются при анализе малых деформаций. Малыми деформациями называются такие относительные деформации, квадратом которых можно пренебречь по сравнению с единицей. Обычно это деформации значения, которых не превосходят 5-10%. Для оценки больших деформаций больше подходит другая характеристика – показатель Генки или логарифмическая деформация:

$$\delta_l = \ln \frac{L}{L_0} - \text{логарифмическая деформация по длине};$$

$$\delta_b = \ln \frac{B}{B_0} - \text{логарифмическая деформация по ширине};$$

$$\delta_h = \ln \frac{H}{H_0} - \text{логарифмическая деформация по высоте}.$$

При малых деформациях показатели Коши и Генки практически совпадают, что будет показано далее.

Если измерять изменение длины, толщины, радиуса и т.д., то мы получим среднюю деформацию в определенном направлении. Это важная величина, но деформация может быть распределена по объему тела неравномерно. Поэтому в теории обработки давлением нас больше интересуют не средние, а локальные деформации, или деформации элементарных объемов.

Относительная деформация Коши является очень удобной для использования, поскольку имеет достаточно простое определение и является тензорной величиной. Однако при выводе соотношений для деформации Коши элементарного отрезка мы использовали допущения о малой деформации. Малыми являются упругие деформации, поэтому деформации Коши применяются в теории упругости. В обработке давлением приходится иметь дело с большими (или как их еще называют конечными) деформациями. Для таких величин деформации, определенные по формулам деформаций Коши уже не являются тензорными величинами.

На первый взгляд, можно использовать подход, при котором конечную деформацию можно рассматривать как сумму нескольких последовательных деформаций, каждая из которых является малой. Однако такой подход не реализуем, поскольку деформации Коши не обладают свойством аддитивности. Действительно, рассмотрим конечную деформацию стержня начальной длиной L_0 до величины L_2 . Тогда относительная деформация:

$$\varepsilon_{02} = \frac{L_2 - L_0}{L_0} . \quad (3)$$

Представим процесс растяжения стержня как сумму двух шагов – сначала от L_0 до L_1 , а затем от L_1 до L_2 . Определим деформации на каждом из этих шагов: $\varepsilon_{01} = \frac{L_1 - L_0}{L_0}$, $\varepsilon_{12} = \frac{L_2 - L_1}{L_1}$. Очевидно, что $\varepsilon_{02} \neq \varepsilon_{01} + \varepsilon_{12}$

Введем понятие бесконечно малой деформации или *приращения деформаций*.

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} , \quad (4)$$

где l – текущая длина элементарного отрезка,
 dl – бесконечно малое ее изменение.

Проинтегрировав приращение деформаций вдоль пути деформирования, получим т.н. *истинную деформацию*:

$$\delta = \int_l d\varepsilon . \quad (5)$$

В случае деформации стержня (путь деформирования – прямая) приходим к логарифмической деформации:

$$\delta = \int_{L_0}^L d\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \frac{L}{L_0} . \quad (6)$$

Поэтому *логарифмическую* деформацию также называют *истинной*.

Логарифмические деформации, в отличие от малых, обладают свойствами аддитивности. Используем пример с растяжением стержня за два шага. Общая логарифмическая деформация стержня: $\delta_{02} = \ln \frac{L_2}{L_0}$

Логарифмические деформации на промежуточных шагах:

$$\delta_{01} = \ln \frac{L_1}{L_0}, \quad \delta_{12} = \ln \frac{L_2}{L_1} . \text{ Тогда: } \delta_{01} + \delta_{12} = \ln \frac{L_1}{L_0} + \ln \frac{L_2}{L_1} = \ln \frac{L_1 L_2}{L_0 L_1} = \ln \frac{L_2}{L_0} = \delta_{02}$$

Логарифмическая деформация может быть выражена через деформацию Коши:

$$\delta = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = \ln(1 + \varepsilon) . \quad (7)$$

Здесь ΔL - удлинение или абсолютная деформация,

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} - \text{относительная деформация (деформация Коши)}.$$

Рассмотрим вопрос о том, в каких пределах логарифмические деформации можно заменить малыми. Разложим натуральный логарифм в ряд:

$$\delta = \ln(1 + \varepsilon) = \varepsilon - \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{\varepsilon^3}{3} + \dots + (-1)^{n-1} \frac{\varepsilon^n}{n} . \quad (8)$$

Этот ряд при $\varepsilon < 1$ - сходящийся. При $\varepsilon < 0.1$ разница между δ и ε не превосходит 5% ($0.95 < \frac{\varepsilon}{\delta} < 1$, т.е. $\varepsilon > \delta$). При $\varepsilon < 0.05$ разница не превосходит 2%. Поэтому *деформации менее 5% считаются малыми*, для них истинные деформации равны относительным.

Логарифмические степени являются точными характеристиками любых больших деформаций, но часто кажутся сложными и плохо физически представляемыми величинами. Логарифмические деформации можно выразить в процентах как отношения к главной деформации, например к высотной деформации (по размеру h). Тогда они становятся легко представляемыми и очень удобными.

Обозначим относительное логарифмическое уширение через B и относительное логарифмическое удлинение через L :

$$B = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{h_0}{h}} = \frac{\ln \beta}{\ln \eta} \text{ или } B = \frac{\ln \beta}{\ln \eta} 100\%; \quad L = \frac{\ln \frac{\ell}{\ell_0}}{\ln \frac{h_0}{h}} = \frac{\ln \lambda}{\ln \eta} \text{ или } L = \frac{\ln \lambda}{\ln \eta} 100\% ; \text{ т.е. } L = 1 - B.$$

Величины B и L изменяются от 0 до 1 или от 0 до 100% при любых сложных деформациях. Для их вычисления требуется только один точный замер, второй получается из известного, если степень обжатия задана.

Величины B и L являются отношениями боковых деформаций к высотной (главной), поэтому их можно считать коэффициентами Пуассона для пластических деформаций.

2.4 Вытяжка средняя и суммарная

Для тел прямоугольного сечения можно записать

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{h_0 b_0}{h_1 b_1} = \frac{F_0}{F_1}, \quad (9)$$

где F_0 и F_1 - соответственно площади поперечных сечений до и после деформации.

Выражение $\lambda = \frac{F_0}{F_1}$ - справедливо для любой формы поперечного сечения деформируемого тела.

Пусть имеем процесс деформации, состоящий из ряда операций, и площади сечения деформируемого тела после каждой из этих операций, обозначим: $F_1; F_2; F_3 \dots F_n$, где F_n - площадь поперечного сечения тела после последней операции. Вытяжки, имеющие место при проведении каждой из этих операций, будут:

$$\lambda_1 = \frac{F_0}{F_1}; \lambda_2 = \frac{F_1}{F_2}; \dots \lambda_n = \frac{F_{n-1}}{F_n}. \quad (10)$$

Суммарная вытяжка, исходя из выражения (9), будет равна

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{F_0}{F_n} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n, \quad (11)$$

где λ_{Σ} - суммарная вытяжка.

В случае, если частные вытяжки равны между собой: $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \dots = \lambda_n$, то можно записать $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{cp}^n$.

2.5 Скорость деформации

Скоростью деформации называется изменение степени деформации в единицу времени или изменение удельного смещенного объема в единицу времени.

В случае малых деформаций скорость линейной деформации в направлении осей x , y и z будет равна соответственно:

$$\varpi_x = \frac{d\varepsilon_x}{dt} ; \quad \varpi_y = \frac{d\varepsilon_y}{dt} ; \quad \varpi_z = \frac{d\varepsilon_z}{dt}. \quad (12)$$

Скорости деформаций сдвига:

$$\varpi_{xy} = \frac{d\gamma_{xy}}{dt} ; \quad \varpi_{yz} = \frac{d\gamma_{yz}}{dt} ; \quad \varpi_{zx} = \frac{d\gamma_{zx}}{dt}. \quad (13)$$

При небольших деформациях, например при осадке мы имеем:

$$\varpi_h = \frac{dh/h}{dt} = \frac{d\delta h}{dt}. \quad (14)$$

Из выражений (12) - (14) видно, что скорость деформации имеет размерность с^{-1} . Скорость хода инструмента (например, бойка молота или плиты пресса), осуществляющего деформацию имеет размерность мм/с, см/с, м/с и ее называют *скоростью деформирования*.

Выражение (14) можно представить в виде $\varpi_h = \frac{dh}{h dt}$, но $\frac{dh}{dt}$ - это скорость деформирования v_h , поэтому скорость деформации в данный момент времени осадки можно представить как:

$$\varpi_h = v_h / h. \quad (15)$$

Следовательно, скорость деформации зависит от скорости деформирования и размера тела в направлении деформации.

В процессе осадки с постоянной скоростью деформирования v_h скорость деформации в соответствии с уменьшением высоты будет изменяться (увеличиваться) от $\varpi_{h_0} = v_h / h_0$ до $\varpi_{h_1} = v_h / h_1$.

Средняя скорость деформации за время осадки определяется по формуле:

$$\varpi_{CP} = \frac{\delta_h}{t} = \frac{\ln(h_0/h_1)}{t}. \quad (16)$$

3 МЕХАНИЗМЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

3.1 Краткие сведения о строении металлов

Все металлы и сплавы имеют кристаллическое строение. Чаще всего кристаллизация расплавленного металла происходит из большого числа

центров, поэтому обычно металл состоит не из одного, а из множества кристаллов, называемых зернами, или кристаллитами. В отличие от кристаллов, поверхность которых образована плоскостями, кристаллиты характеризуются произвольной формой поверхности. Кристалл – это тело, наружной поверхностью которого являются грани, пересекающиеся под определенными углами. Общим у кристаллов и кристаллитов является закономерность во взаимном расположении атомов. 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.

Для металлов характерны 3 основных типа решетки (рис. 3.1): кубическая объемноцентрированная (ОЦК); кубическая гранецентрированная (ГЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГПУ). Каждому металлу при данной температуре и давлении свойственно определенное строение кристаллической решетки.

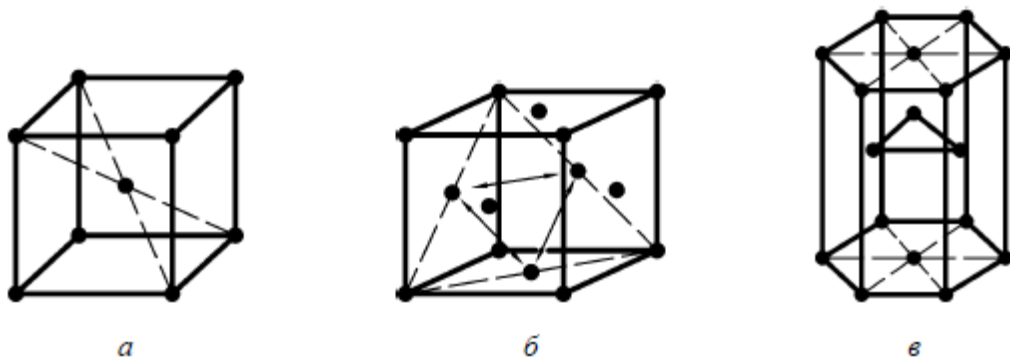


Рис. 3.1. Типы элементарных кристаллических решеток металлов: а – ОЦМ; б – ГЦК; в – ГПУ

Известно, что 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.

Однако реальные металлы и сплавы – поликристаллы, состоящие из большого количества по-разному ориентированных зерен. Произвольная ориентировка зерен приводит к усреднению свойств в поликристалле. Это называется квазиизотропностью. Кроме того, в отличие от идеальных, реальные кристаллы обладают рядом структурных несовершенств, основными из которых являются дислокации. Теория дислокаций наиболее логично объясняет механизм пластической деформации. Согласно этой теории, скольжение атомов друг относительно друга, происходящее при пластической деформации, является результатом перемещения дислокаций.

3.2 Дефекты в кристаллах

Дефекты делятся на точечные, линейные и объемные.

Точечные дефекты:

Вакансия (дырка) – простейший дефект кристаллической решетки, когда вышедший из положения равновесия атом, оставляет после себя в узле кристаллической решетки пустое место.

Свободный (внедренный) атом – лишний, по сравнению с идеальной решеткой атом.

Вакансии и внедренные атомы независимо друг от друга перемещаются по решетке. С увеличением температуры скорость этого перемещения увеличивается.

Примеси других металлов. Даже небольшое количество примесей сильно искажает решетку за счет несоответствия атомных радиусов основного металла и примесей. Примеси делятся на примеси внедрения и примеси замещения. Примеси внедрения больше искажают кристаллическую решетку, чем примеси внедрения.

Объемные дефекты: микро и макротрещины, поры, раковины и т.д., границы между блоками.

Линейным дефектом (один размер значительно больше двух других) являются дислокации.

Дислокация – линейный дефект кристаллической решетки, вдоль которого нарушены связи между соседними атомами и число ближайших соседей каждого атома не соответствует необходимому. Дислокации делятся на краевые и винтовые.

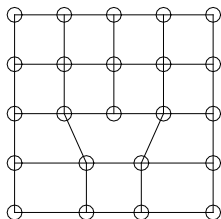


Рис. 3.2. – Кристаллическая решетка с краевой дислокацией

Краевая (прямолинейная) дислокация – недостаток или избыток одной атомной полуплоскости. Лишняя по сравнению с идеальной решеткой плоскость называется **экстраплоскостью**. Край экстраплоскости представляет собой линию с разорванными межатомными и называется **осью дислокации**. Вокруг оси дислокации образуется ядро дислокации. Размер ядра составляет несколько атомных радиусов. Ось дислокации не обрывается внутри кристалла: она либо выходит на поверхность, либо образует замкнутую петлю. Плоскость скольжения проходит через эту ось перпендикулярно лишней полуплоскости. Если лишняя полуплоскость расположена над осью скольжения, то дислокация считается положительной,

если под осью скольжения, то дислокация считается отрицательной. Если такие дислокации встречаются, то они взаимно уничтожаются.

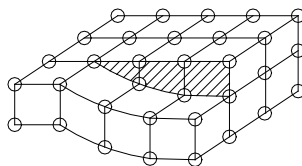


Рис.3.3. Кристаллическая решетка с винтовой дислокацией

Винтовая (спиральная) дислокация – дефект кристаллической решетки, при котором одна часть кристаллической решетки сдвигается относительно другой ее части, в результате чего образуется винтовая поверхность вокруг некоторой оси. По мере удаления от оси дислокации искажения решетки быстро исчезают, и восстанавливается правильное строение кристалла. В отличие от краевой дислокации экстраплоскость при винтовой дислокации отсутствует, просто плоскости решетки изгибаются. В зависимости от направления перемещения вокруг оси дислокации различают правую (по часовой стрелке) и левую (против часовой стрелки) дислокации. Особенностью винтовой дислокации является то, что направление сдвига параллельно оси дислокации, тогда как при краевой дислокации сдвиг происходит в направлении, перпендикулярном оси.

Осью краевой и винтовой дислокации является прямая линия. В общем случае ось дислокации может быть и не прямой. Если дислокация имеет ступенчатую форму, то одни ее участки являются чисто краевыми, а другие чисто винтовыми. Если же дислокация (или ее часть) расположена под углом к вектору сдвига, то такая дислокация называется **смешанной**. Смешанной будет дислокация с криволинейной осью, например в виде петли.

Образование дислокаций происходит в результате многих причин.

1. В недеформированном кристалле дислокации могут образоваться на границах зерен при их росте.
2. При наличии точечных дефектов дислокации могут порождаться скоплением вакансий и образованием пустот.
3. Дислокации могут образовываться в результате пластической деформации, например, по механизму **источников Франка-Рида**.

Так на рисунке 3.4,а представлена линейная дислокация DD' , находящаяся в плоскости скольжения, совпадающей с плоскостью чертежа. В неподвижных точках D и D' дислокация закреплена. Закрепление может происходить вследствие инородных включений в точках D и D' или пересечения рассматриваемой дислокации дислокациями, которые перемещаются по другим плоскостям скольжения. Под действием касательного напряжения линейная дислокация DD' начнет выгибаться и примет в какой-

то момент времени форму полуокружности (рис. 3.4,б); радиус кривизны линии дислокаций достигнет минимального значения. Расчетom установлено, что напряжение, необходимое для движения дислокаций, обратно пропорционально радиусу кривизны линии дислокации.

При искривлении линии дислокации от положения *a* до *б* касательное напряжение растет и в положении *б* достигает критического значения $\tau_{кр}$. Дальнейшее выгибание дислокационной линии может происходить при напряжении, меньшем $\tau_{кр}$, так как радиус кривизны увеличивается. При этом на участках дуги вблизи точек закрепления линейная дислокация переходит в винтовую, так как направление сдвига становится параллельным линии дислокации; петля выпучивается и образует спирали вокруг точек *D* и *D'*.

Направление перемещения винтовой дислокации перпендикулярно направлению сдвигающего напряжения; спирали сближаются (рис. 3.4,г), смыкаются (рис. 3.4,д), и дислокационная линия распадается на два участка: внешний в виде наружной окружности и внутренний, занимающий исходное положение. Наружная дислокация разрастается до внешней поверхности блока или кристалла или какого-либо другого барьера. Внутренняя дислокация под влиянием касательного напряжения выпучивается, образуя новую наружную дислокацию, и т. д. В процессе пластической деформации число (плотность) дислокаций увеличивается.

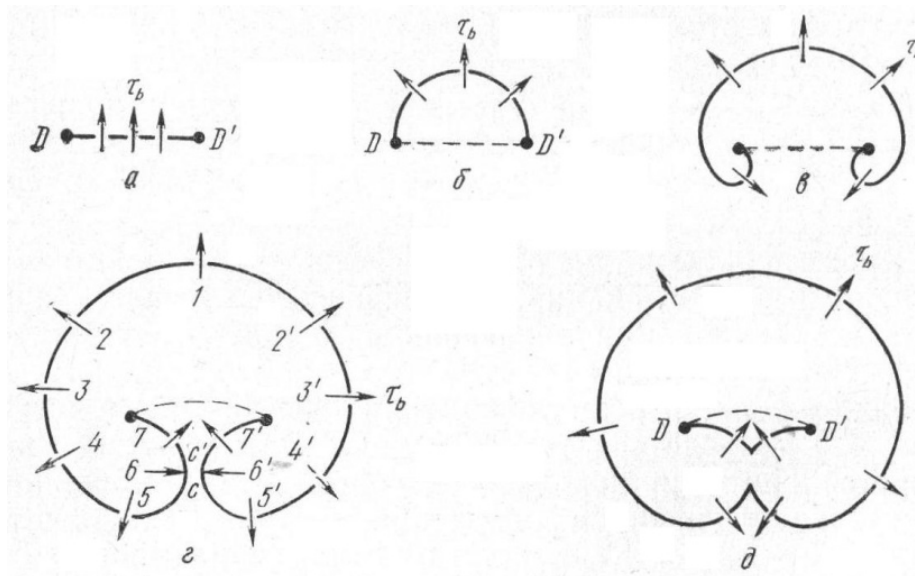


Рис.3.4. Последовательность стадии источника Франка - Рида

В процессе пластической деформации дислокации могут зарождаться, помимо источников Франка-Рида, в местах концентрации напряжений вблизи дефектов.

Подавляющая часть пластических деформаций обусловлена движением дислокаций.

Не смотря на то, что перемещение дислокаций приводит к их выходу на поверхность, количество дислокаций при пластической деформации не уменьшается, а наоборот, растет. Дислокации, движущиеся по разным плоскостям скольжения, могут взаимно пересекаться, при этом замедляя или ускоряя движение друг друга. Дислокации с противоположным знаком могут взаимно уничтожаться. Движущаяся дислокация часто вынуждена прорезать целый «лес» дислокаций, не лежащих в ее плоскости. В результате на линии дислокации появляется множество ступенек, испускающих большое количество вакансий и внедренных атомов.

От количества дислокаций и условий их перемещения зависит прочность кристалла. Идеальный кристалл, не имеющий дислокаций, требует очень больших усилий для деформации. Такие кристаллы выращивают искусственно. Если дислокации есть, но есть препятствие их перемещению, прочность такого кристалла повышается. Препятствием являются различные дефекты кристаллов: другие дислокации, различные включения, границы раздела зерен.

3.3 Пластическая деформация монокристалла

Для правильного понимания механизма пластической деформации реальной металлической заготовки, представляющей собой поликристалл, рассмотрим пластическую деформацию монокристалла. Принято считать, что пластическая деформация – результат необратимых смещений атомов. В кристаллах эти смещения атомов в большинстве случаев происходят путем движения дислокаций, что является основным атомным механизмом пластической деформации. Движение дислокаций может вызвать макропластическую деформацию образца путем скольжения или двойникования.

Скольжение представляет собой параллельное смещение тонких слоев монокристалла по определенным кристаллографическим плоскостям, называемым плоскостями скольжения (рис. 3.5). Конечным итогом такого смещения является сдвиг отдельных частей кристалла относительно других. Обычно плоскостями скольжения являются плоскости с наибольшей плотностью размещения атомов, а направлениями скольжения – те направления, по которым межатомные расстояния минимальны. Например, в металлах с ГЦК решеткой плоскостями скольжения обычно являются плоскости октаэдра типа (111), а направлениями скольжения – направления типа [101]. Повышение температуры, а следовательно, и амплитуды тепловых колебаний атомов приводит к тому, что процесс скольжения может происходить и по другим плоскостям.

Вторым механизмом пластической деформации является двойникование (рис. 3.6). Этот механизм заключается в смещении атомов, расположенных в плоскостях, параллельных некоторой плоскости (плоскости

двойникования), на расстояния, пропорциональные расстоянию этих плоскостей от плоскости двойникования. Конечным итогом такого движения является сдвиг и поворот атомных рядов в отдельных участках образца под некоторым углом к направлению сдвига. В результате поворота получается зеркальное отображение одной части кристалла по отношению к другой. Двойникование чаще всего происходит при динамическом нагружении, например, при ковке.

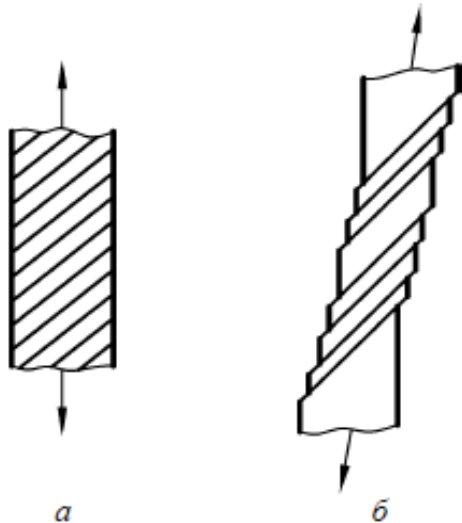


Рис.3.5. Схема механизма скольжения: а – до скольжения; б – после скольжения

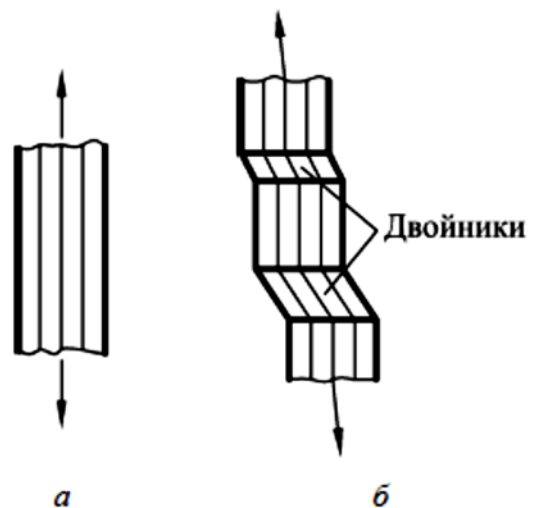


Рис. 3.6. Схема механизма двойникования: а – до деформации; б – после деформации

У металлов процесс пластической деформации в основном осуществляется путем скольжения. Установлено, что 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.



Рис. 3.7. Схема растяжения монокристалла

Так, например (рис. 3.2), если растягивать с усилием P образец из монокристалла с плоскостью поперечного сечения F , у которого нормаль к плоскости скольжения и направление скольжения наклонены по отношению к направлению действующей силы под углами, соответственно, φ и λ , то величину сдвигающего напряжения τ можно найти по следующей формуле:

$$\tau = \frac{P}{F} \cos \varphi \cdot \cos \lambda . \quad (17)$$

Анализ формулы показывает, что при постоянном τ величина предела текучести монокристалла (нормального напряжения $\sigma = P/F$, соответствующего началу пластической деформации) для каждого металла существенно зависит от ориентировки плоскостей скольжения относительно направления действия сил, имея минимум при $\varphi = \lambda = 45^\circ$.

По современным воззрениям, процесс скольжения не является одновременным смещением всех атомов одной плоскости относительно атомов соседней, а происходит путем последовательного смещения отдельных групп атомов. Наибольшее распространение получила теория, объясняющая процесс скольжения перемещением в плоскости скольжения отдельных несовершенств пространственной решетки – дислокаций.

3.4 Пластическая деформация поликристалла

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 осуществляется путем скольжения и двойникования, вторая – путем поворота и перемещения одних зерен относительно других. Оба вида деформации протекают в металлах одновременно. 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 формы поликристалла. С повышением температуры прочность зерен становится больше прочности их границ из-за наличия на границах легкоплавких примесей и меньшей термодинамической

устойчивости пограничных зон самого металла. Поэтому при горячей обработке давлением преобладает межкристаллитная деформация.

Рассмотрим последовательность развития пластической деформации поликристалла (рис. 3.8). Поскольку в поликристалле зерна имеют различную ориентировку плоскостей скольжения, то пластическая деформация при действии внешних сил начинается не во всех зернах одновременно.

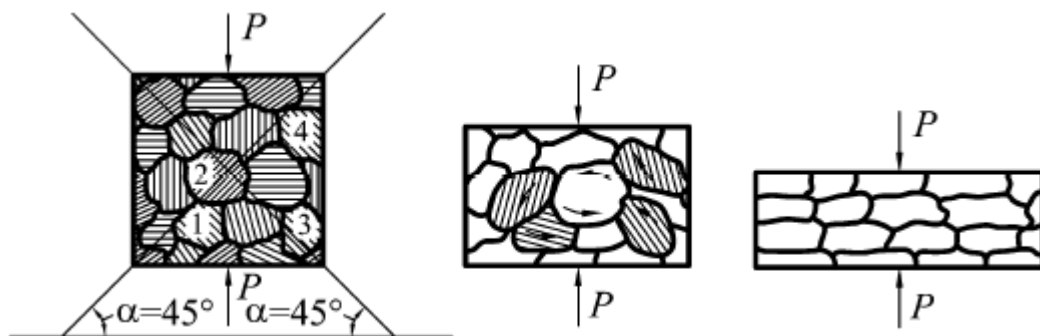


Рис. 3.8. Схема последовательного развития пластической деформации поликристалла

Вначале деформируются наиболее благоприятно ориентированные зерна, т.е. зерна, плоскости скольжения в которых составляют с направлением усилия 45° (рис. 3.8, зерна 1–4). Остальные зерна в этот момент поворачиваются, и, когда их плоскости скольжения составят с направлением усилия угол 45° , они также подвергнутся деформации. В конце концов большинство зерен вытягивается в направлении наиболее интенсивного течения металла. После деформации плоскости скольжения вытянувшихся зерен ориентированы в одном направлении. Такую структуру называют волокнистой. Так как одновременно с изменением формы зерен в процессе деформации происходит и поворот плоскостей скольжения в отдельных зернах, то при значительных степенях деформации плоскости скольжения зерен поликристалла стремятся совместиться с направлением течения металла. Такая ориентировка плоскостей скольжения зерен называется текстурой и вызывает в поликристалле анизотропию свойств.

4 НАПРЯЖЕННОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ТОЧКЕ ТЕЛА

4.1 Напряженное состояние в точке тела

Пластическое деформирование для придания необходимой формы обрабатываемому изделию осуществляется приложением к нему внешних сил с помощью механизма или устройства. Внешние силы вызывают

появление в теле внутренних сил, уравнивающих действие первых. Интенсивность внутренних сил называют напряжением. Очевидно, что напряжение σ на площадке, выделенной внутри или на поверхности тела, можно выразить следующей формулой:

$$\sigma = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F}, \quad (18)$$

где ΔF – элементарная площадка;

ΔP – результирующая внутренних сил, действующих на площадке.

При изучении напряженного состояния принимают, что тело однородно, изотропно и представляет собой систему непрерывных материальных точек, каждая из которых в напряженном теле находится под действием всех ее окружающих точек. Поэтому в любой плоскости, проведенной через данную точку, на нее будет действовать напряжение, характеризуемое определенной величиной и направлением.

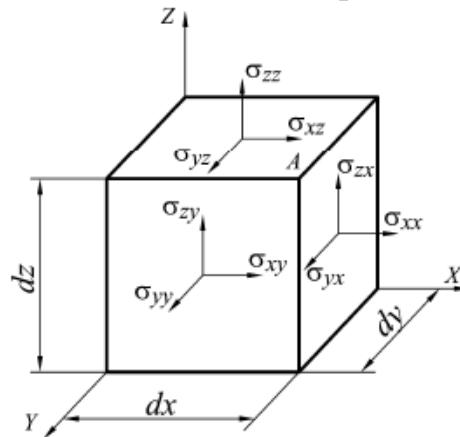


Рис. 4.1. Напряженное состояние в точке тела

В напряженном теле возьмем точку A и проведем через нее три плоскости, параллельные плоскостям координат. Для того чтобы иметь возможность обозначить на чертеже напряжения, действующие на точку в этих плоскостях, построим параллелепипед, ребра которого примем бесконечно малыми, неограниченно приближающимися к точке. Тогда на гранях такого элементарного параллелепипеда, проходящих через точку A , можно изобразить векторы напряжений, действующих на точку в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. При этом напряжение на каждой площадке разложим на три: одно нормальное и два касательных, которые направим параллельно осям координат. Таким образом, всего получим три нормальных и шесть касательных напряжений (рис. 4.1): σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} – нормальные напряжения; σ_{xy} , σ_{xz} , σ_{yx} , σ_{yz} , σ_{zx} , σ_{zy} – касательные напряжения. Для касательного напряжения первый индекс – это координатная ось, вдоль которой оно действует, а второй – координатная ось, перпендикулярная

площадке, к которой приложено напряжение. Нормальные напряжения принято считать положительными, если они стремятся вызвать растяжение тела, и отрицательными – если сжатие.

Удобнее всего записывать напряжения по трем координатным плоскостям в виде матрицы, в которой каждая строка представляет напряжения одного направления в последовательности адресов x, y, z ; а каждый столбец – напряжения одного адреса в последовательности направлений x, y, z :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Вследствие парности касательных напряжений в этой матрице только шесть неизвестных, так как $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$; $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$; $\sigma_{yz} = \sigma_{zy}$. Поэтому считается, что если заданы напряжения в трех взаимно перпендикулярных площадках (известны 6 компонент матрицы), то напряженное состояние точки определено. Матричное описание означает, что напряженное состояние – это тензорная величина, в отличие от скалярной (определяемой числом) и векторной (определяемой числом и направлением). Геометрический смысл тензора напряжений – поверхность второго порядка. С тензорами производят различные математические действия, изучаемые в тензорном анализе. Важное следствие: по тензору напряжений определяют напряжение на любой площадке, наклонной относительно осей координат. Для этого нужно знать ее положение относительно осей координат, которое задается косинусами углов между нормалью к ней и координатными осями.

Через точку, находящуюся в напряженном состоянии, всегда можно провести такие три взаимно перпендикулярные плоскости, в которых касательных напряжений не будет. При этом полученные три нормальных напряжения будут называться главными нормальными напряжениями, а плоскости, на которые они действуют, – главными плоскостями. Таким образом, если оси координат выбраны параллельно главным направлениям, то в соответствующих координатных плоскостях будут действовать только главные нормальные напряжения. В этом случае напряженное состояние будет определено, если даны направления трех главных осей и величины трех главных нормальных напряжений, обозначаемых обычно $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Тензор напряжения будет иметь диагональный вид:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Принято, что $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

Главные касательные напряжения – это максимальные касательные напряжения. Их можно выразить через главные напряжения:

$$\sigma_{12} = \pm \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2), \quad \sigma_{23} = \pm \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3), \quad \sigma_{31} = \pm \frac{1}{2}(\sigma_3 - \sigma_1). \quad (21)$$

При этом

$$\sigma_{12} + \sigma_{23} + \sigma_{31} = 0. \quad (22)$$

Главные касательные напряжения возникают в площадках, перпендикулярных одной из координатных плоскостей и составляющих углы 45° с каждой из двух других, или в площадках, проходящих через одну координатную ось и делящих угол между двумя другими пополам.

Если выделить в напряженном теле кубик со сколь угодно малыми гранями, перпендикулярными к главным направлениям, то грани кубика будут главными площадками. При уменьшении размеров кубика он превратится в точку и напряжения на его гранях станут напряжениями в точке. Графическое представление о наличии и знаке главных нормальных напряжений в точке называется схемой напряженного состояния. В ряде случаев можно принять, что схема главных напряжений одинакова для всех точек и характеризует напряженное состояние деформируемого тела. Всего имеется 9 схем напряженного состояния: 2 линейных; 3 плоских и 4 объемных (рис. 4.2).

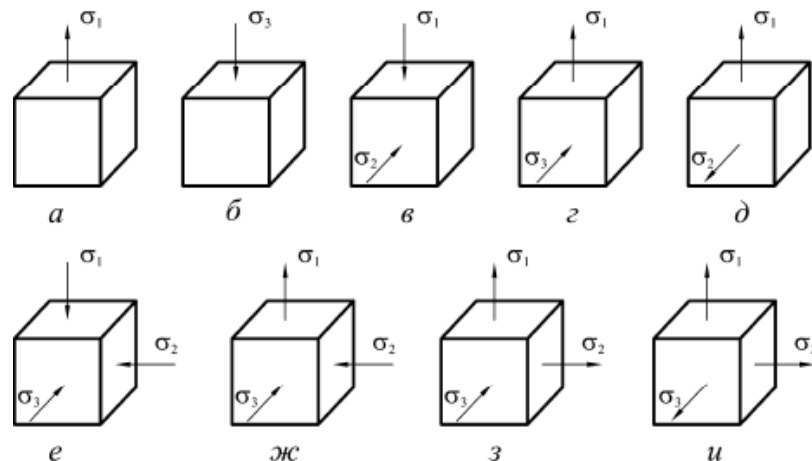


Рис. 4.2. Схемы напряженного состояния: а, б – линейные; в–д – плоские; е–и – объемные

Линейные схемы напряженного состояния, соответствующие одноосному растяжению (сжатию), в обработке давлением практически не встречаются из-за действия сил трения. Плоское напряженное состояние

(рис. 4.2, в–д) возникает в таких видах листовой штамповки, как гибка, отбортовка и т.д. Чаще всего в обработке давлением реализуется объемное напряженное состояние.

При равномерном всестороннем растяжении (рис. 4.2, и) пластическая деформация невозможна из-за хрупкого разрушения. При всестороннем равномерном сжатии деформация не происходит из-за отсутствия сдвигающего напряжения. Пластическая деформация возможна при всестороннем неравномерном сжатии (рис. 4.2, е) или при совмещении сжатия и растяжения (рис. 4.2, ж, з). Из двух последних схем благоприятнее для проявления пластических свойств та, в которой преобладают сжимающие напряжения (рис. 4.2, ж).

Большинство процессов обработки металлов давлением (прокатка, прессование, ковка и объемная штамповка) протекают в условиях всестороннего неравномерного сжатия. При этом сжимающие напряжения препятствуют нарушению межкусталлитных связей, способствуют развитию внутрикристаллических сдвигов и повышению пластичности металлов.

4.2 Деформированное состояние в точке тела

Деформация любого тела определяется изменением формы и размеров его элементарного объема. Чаще всего в технологических расчетах принимают, что объем металла при обработке давлением не изменяется. По аналогии с напряженным состоянием деформированное состояние точки описывает тензор деформации T_ϵ :

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}, \quad (23)$$

где ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{zz} – относительные удлинения по осям x , y , z ; $\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}$; $\epsilon_{yz} = \epsilon_{zy}$; $\epsilon_{zx} = \epsilon_{xz}$ – компоненты тензора, характеризующие сдвиговые деформации.

По условию постоянства объема:

$$\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = 0. \quad (24)$$

В любой точке деформируемого тела можно обнаружить такие три взаимно перпендикулярные оси, в системе которых отсутствуют сдвиговые деформации. Они и называются главными осями деформированного состояния. Относительные удлинения вдоль этих осей также называют

главными и обозначают $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Тензор деформации в главных осях имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}. \quad (25)$$

В свою очередь, из условия вытекает условие постоянства объема для главных осей деформации:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0. \quad (26)$$

Из-за ограничения, накладываемого выражением, существует только три схемы деформированного состояния. При этом деформации, направленные на увеличение первоначального размера, считают положительными, а на уменьшение – отрицательными.

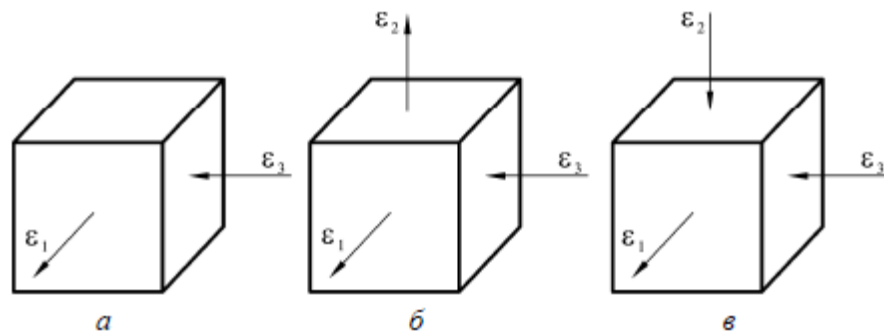


Рис. 4.3. Схемы деформированного состояния: а – плоская; б, в – объемные

Уменьшение одного размера тела ведет к увеличению двух других (рис. 4.3, б). Так осуществляется деформация при осадке и прокатке. Наиболее рациональной (для производительности процесса обработки давлением) является третья схема (рис 4.3, в): размеры тела уменьшаются по двум направлениям, а увеличиваются в третьем, т.е. длина увеличивается максимально. По этой схеме происходят процессы прессования, волочения и некоторые виды прокатки труб. Плоская схема деформации (рис. 4.3, а) встречается при прокатке широкого листа, когда его ширина в процессе прокатки практически не меняется.

4.3 Условие пластичности

Для практических расчетов необходимо знать минимальное усилие, которое обеспечивает пластическое изменение формы тела. В условиях

линейной схемы напряженного состояния пластическая деформация начинается при достижении нормальным напряжением предела текучести σ_T :

$$\sigma_1 = \sigma_T. \quad (27)$$

В условиях сложной схемы напряженного состояния, когда в деформируемом теле действуют все три главных нормальных напряжения, переход тела в пластическое состояние описать сложнее. Совокупность соотношений главных напряжений $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ представляет из себя поверхность, называемую предельной поверхностью пластичности, которую описывает следующее равенство:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0. \quad (28)$$

Определение этой функции для сложной системы напряженного состояния вызывает трудности, поэтому в целях упрощения используют гипотезы предельного состояния, две из которых получили наиболее широкое применение.

4.4 Условие постоянства максимальных касательных напряжений

Пластическая деформация в данной точке тела возникает независимо от схемы напряженного состояния, если наибольшее касательное напряжение в рассматриваемой точке достигло предельной величины, характерной для данного материала:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T. \quad (29)$$

Эта теория применима только для плоского напряженного состояния, так как не учитывает среднего по величине напряжения σ_2 .

Энергетическое условие пластичности. Пластическая деформация в любой точке тела возникает и поддерживается в том случае, если интенсивность напряжений достигает предела текучести. Интенсивность напряжений σ_i есть некоторая характеристика напряженного состояния и не является напряжением, действующим на какой-либо площадке:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (30)$$

Условие пластичности записывается следующим образом:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_T^2. \quad (31)$$

Физический смысл условия пластичности состоит в том, что пластическая деформация возникает тогда, когда удельная потенциальная энергия упругой деформации формы элемента достигает определенного значения независимо от схемы напряженного состояния.

В теории пластичности доказано, что соотношения между главными напряжениями и главными относительными пластическими деформациями можно выразить следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \frac{1}{E'} \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right), \\ \delta_2 &= \frac{1}{E'} \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2} \right), \\ \delta_3 &= \frac{1}{E'} \left(\sigma_3 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right),\end{aligned}\tag{32}$$

где E' – модуль пластичности, зависящий от материала, температуры, скорости деформации и упрочнения.

Академик С.И. Губкин ввел понятие механической схемы деформации – совокупности схемы главных напряжений и схемы главных деформаций. Так как схем главных напряжений 9, а схем главных деформаций 3, то математически возможны $9 \cdot 3 = 27$ сочетаний. Четыре сочетания не имеют физического смысла: при линейном сжатии невозможна деформация по схемам рис. 4.2, а, в; при линейном растяжении невозможна деформация по схемам рис. 4.2, а, б. Таким образом, реальны 23 механические схемы деформации.

5 ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ ПРИ ОМД

5.1 Общие положения

Внешним трением называют такое явление, когда при перемещении одного тела по поверхности другого возникает сопротивление движению. Для преодоления этого сопротивления необходима определенная сила, называемая *силой трения*. Вектор силы трения лежит в плоскости касания тел и направлен в сторону, противоположную действию сдвигающего усилия.

По кинематическим признакам различают 2 типа трения: качения скольжения. Для ОМД характерно трение скольжения, оно характеризуется тем, что все точки поверхности одного тела движутся по касательной к поверхности другого тела. Закономерности этого трения рассмотрены в трудах Дерягина Б.В., Крагельского И.К., Чертавских А.К., Павлова И.М., Губкина С.И., Тарновского И.Я., Перлина И.Л. и др.

При взаимодействии деформируемого тела с инструментом на контактных поверхностях возникают силы трения, которые оказывают большое влияние на силы деформирования, на характер формоизменения, качество детали и т.д. Например, при осадке цилиндрической заготовки, чем больше шероховатость бойков, тем больше величина образующейся бочки. При осадке кольцевой заготовки на шероховатых бойках внутренний диаметр уменьшается, а на гладких смазанных - увеличивается и др.

Контактное трение - это механическое взаимодействие двух тел, препятствующее их относительному перемещению в плоскости соприкосновения тел.

Сила T_z влияет на качество поверхности заготовки, а сила T_n влияет на износ инструмента. Это положение известно, как закон о парности сил контактного трения сопротивления и активного действия. Силы трения относят к единице площади поверхности трения и величину $\tau_k = \lim T/\Delta F$ при $\Delta F \rightarrow 0$ называют контактным касательным напряжением.

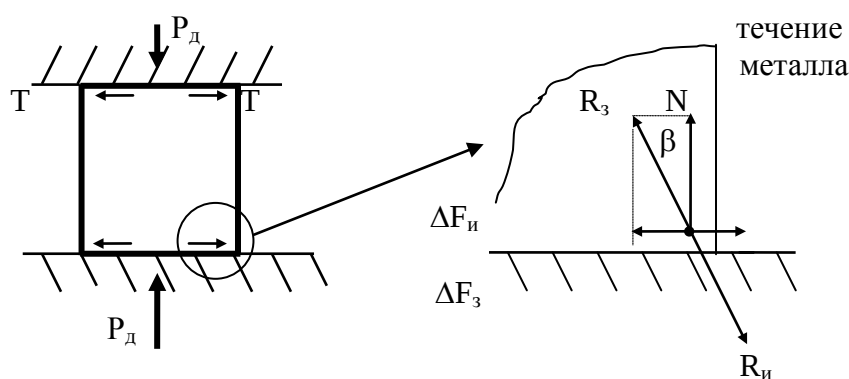


Рис. 5.1. Схема для изучения механизма контактного трения

При анализе силового режима и формоизменения заготовки оперируют напряжением $\tau_{кз}$, действующим со стороны инструмента на заготовку, при анализе нагрузки на инструмент оперируют напряжением $\tau_{ки}$, действующим со стороны заготовки на инструмент.

Для характеристики величины сил трения в технике широко используют показатель, называемый *коэффициентом трения*. В зависимости от вида трения различают:

- коэффициент трения покоя – отношение полной силы трения покоя T_s к нормальной силе N :

$$f_s = T_s / N; \quad (33)$$

- коэффициент трения скольжения – отношение силы трения движения скольжения T к нормальной силе N :

$$f = T / N; \quad (34)$$

– коэффициент трения качения – отношение момента сопротивления перекачиванию M_k к нормальной силе N :

$$k = M_k / N = T \cdot R / N, \quad (35)$$

где R -радиус катка.

Коэффициенты трения покоя f_s и скольжения f являются безразмерными величинами, а коэффициент трения качения k имеет линейную размерность. В литературе по ОМД коэффициент трения скольжения иногда обозначают μ .

Анализ формул (33) и (34) и рисунка 5.1 показывает, что коэффициент трения равен тангенсу угла трения $f = \operatorname{tg} \beta$.

5.2 Роль трения при ОМД

Трение в обработке давлением качественно отличается от трения в машинных парах. Во-первых, при пластическом деформировании контактная поверхность детали и инструмента непрерывно обновляется, т.к. увеличивается площадь контактной поверхности. Во-вторых, относительное перемещение деформируемого тела и инструмента в большинстве операций значительны и различны для различных точек контактной поверхности. В-третьих, при обработке металлов давлением имеют место высокие давления и температуры на контактных поверхностях.

Например, если в подшипниках и направляющих машин общего назначения контактные давления не превышают 20-40 МПа, в тяжелонагруженных парах трения кузнечно-штамповочного оборудования они возрастают до 50-100 МПа, то при холодной пластической деформации на контактных поверхностях давления доходят до 2000-2500 МПа. При горячей обработке металлов давления ниже, но на контактных поверхностях действует высокая температура - 800-1000 °С и более. Совместное влияние высоких давлений и температур вносит еще более существенное изменение в процесс взаимодействия инструмента с заготовкой по сравнению с трением в машинных парах.

Трение при обработке металлов давлением, за исключением отдельных операций, когда оно играет активную роль (например, прокатка, вальцовка, некоторые операции листовой штамповки и др.), является вредным фактором:

1. Контактное трение ведет к возникновению неоднородности деформации или усиливает эту неоднородность, если последняя определяется самим характером осуществляемой операции. Это объясняется тем, что в каждой точке поверхности контакта возбуждаются элементарные касательные силы трения, что вызывает появление касательных напряжений

на контактных поверхностях деформируемого тела, направленных противоположно направлению скольжения металла относительно поверхности инструмента в каждой данной точке. В результате может измениться и сама схема напряженного состояния. Например, наличие сил трения при осадке создает объемную схему напряжений, в то время как при отсутствии трения напряженное состояние было бы линейным. Действие трения от контактных поверхностей распространяется в глубину деформируемого тела, и создаются зоны затрудненности условий протекания упрочняющих и разупрочняющих процессов в объеме тела, в результате чего может возникать неоднородность металла (различная степень упрочнения по объему поковки, различная величина зерна и т. п.).

2. Контактное трение в конечном итоге преодолевается активной нагрузкой. Следовательно, контактное трение увеличивает необходимое деформирующее усилие и работу деформации. Увеличение усилия бывает весьма заметным – в несколько раз.

3. Контактное трение снижает стойкость инструмента как в результате непосредственного износа контактной поверхности, так и вследствие дополнительного нагрева поверхности и увеличения напряжений в связи с ростом деформирующего усилия.

4. Контактное трение вызывает необходимость применения технологических смазок. Это усложняет технологический процесс, а также иногда требует предварительной обработки исходного материала (например, нанесения пластмассовых пленок, фосфатирования).

5.3 Механизмы трения

В процессах обработки давлением различают следующие виды трения:

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

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

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

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

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

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

Сухое трение возникает между заготовкой и инструментом, когда их контактные поверхности не разделены каким-либо третьим телом (смазка,

окислы, воздух и др.). В момент контакта поверхность соприкосновения небольшая, т. к. соприкосновение осуществляется по вершинам выступов микронеровностей (см. рис.5.2).

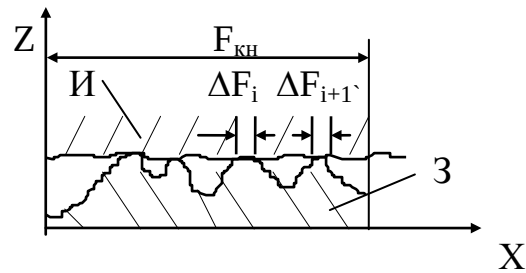


Рис.5.2. Схема контакта заготовки и инструмента при сухом трении

Фактическая поверхность контакта $F_{кф}$ в момент соприкосновения значительно меньше номинальной площади $F_{кн}$. Поэтому пластическая деформация начинается на поверхностях фактического контакта, например ΔF_i . После достижения предела текучести начинается деформация гребешков и приработка поверхности заготовки к поверхности инструмента.

В области выступов в условиях больших контактных давлений и значительной местной деформации образуются так называемые «узлы схватывания», т.е. поверхности ΔF_i , на которых вследствие адгезии образуется металлическое соединение трущихся тел. При сухом трении прочность такого металлического (местного) соединения в узле схватывания в большинстве случаев выше, чем прочность материала заготовки. Поэтому дальнейшее относительное перемещение заготовки по поверхности инструмента возможно лишь при разрушении материала заготовки.

Рассмотрим процесс на площадке ΔF_i (см. рис.5.3).

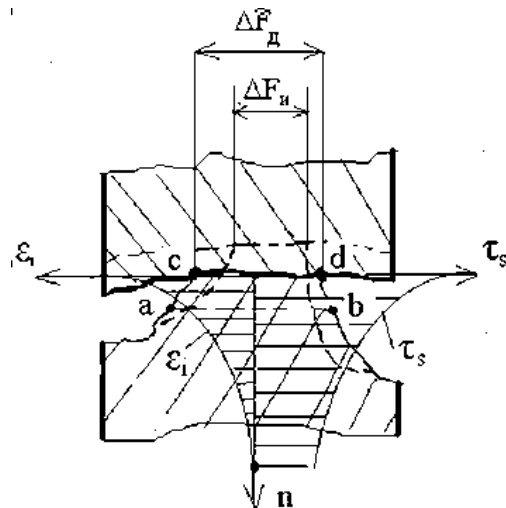


Рис. 5.3. Процесс относительного перемещения заготовки по поверхности инструмента на площадке ΔF_i

В начальный момент контакта деформация локализуется у вершины выступа, т.к. в этом месте площадь наименьшая и, следовательно, напряжения наибольшие. По мере увеличения площадки от $\Delta F_{\text{и}}$ до $\Delta F_{\text{д}}$ очаг пластической деформации распространяется вглубь выступа по нормали n . Деформация сопровождается упрочнением, поэтому напряжение текучести на сдвиг τ_s в объеме выступа является переменным. У поверхности контакта τ_s больше, чем вглубь выступа, т.е. градиент механических свойств - отрицательный. В этих условиях внешнее трение переходит в трение внутреннее, и дальнейшее перемещение заготовки и инструмента в направлении u_x возможно только, если узел схватывания разрушится по поверхности среза «ab», для которой произведение $\tau_s \Delta F_{\text{ab}}$ (сила сопротивления срезу) будет наименьшим.

Если деформируемый металл и металл инструмента близки друг к другу по своим механическим характеристикам, то узел схватывания на поверхности контакта очень прочен, и при трении поверхностей материал заготовки налипает на инструмент. Особенно это характерно при повышенных температурах, при которых материалы более легко образуют металлическое соединение в узлах схватывания (адгезия).

Если сродство материалов инструмента и заготовки невелико, то металлический контакт при низких температурах непрочен, и с повышением температуры его прочность изменяется незначительно.

Поэтому в случае деформирования инструментом, свойства которого сильно отличаются от свойств заготовки, сопротивление срезу по поверхности «ab» больше, чем по поверхности «cd» границы раздела. В этих условиях схватывание происходит, но налипания не наблюдается.

Сухое трение приводит к резкому ухудшению качества поверхности заготовки, повышенному износу инструмента. В чистом виде сухое трение возникает только при обработке в вакууме. В обычных условиях деформации без смазки на поверхностях инструмента и заготовки всегда имеются оксиды, пленки влаги, газовые прослойки, различные загрязнения. Поэтому условия, близкие к сухому трению, существуют лишь на отдельных участках поверхности, главным образом тех, которые образовались в результате увеличения общей площади контакта и выхода на поверхность глубинных слоев металла заготовки.

Гидродинамическое трение (чаще называемое жидкостным трением) возникает при холодной пластической деформации при обильной смазке поверхностей. Особенность такого трения состоит в том, что во всех точках контактные поверхности разделены толстой (более 10^{-4} мм) пленкой смазки. Для этого вида трения контактные касательные напряжения определяются формулой Ньютона:

$$\tau_k = \mu_s \frac{dV_c}{dn}, \quad (36)$$

где μ_s - динамическая вязкость смазки, dV_c / dn - градиент скорости в слое смазки в направлении нормали к контактной поверхности.

При использовании эффективных смазок толщина слоя пленки оказывается достаточно большой, трущиеся поверхности надежно разделены, и контактные касательные напряжения оказываются минимальными, примерно на 2 порядка ниже, чем при сухом трении. В результате резко снижается деформирующая сила, повышаются качество поверхности изделия и стойкость инструмента.

Граничное трение встречается чаще, чем другие виды трения и характеризуется тем, что поверхности заготовки и инструмента разделены тончайшим слоем смазки (не более 10^{-6} - 10^{-4} мм). Контактные касательные напряжения при граничном трении на порядок больше, чем при жидкостном.

Большое значение при граничном трении имеют свойства смазки и состояние трущихся поверхностей.

Причины значительного повышения τ_k при граничном трении по сравнению с жидкостным, состоят в следующем:

- смазочные пленки толщиной менее 10^{-4} мм (граничный слой) качественно отличаются от нормальной жидкости, из которой они образованы.
- неровности контактирующих поверхностей местами прерывают смазочную пленку, образуя узлы схватывания. Если пленка имеет малую механическую прочность, то количество узлов схватывания может быть большим, и граничное трение приближается к сухому.

6 ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ ПРИ ОМД

6.1 Закономерности контактного трения при ОМД

В теории ОМД нашли применение несколько гипотез об условиях внешнего трения на контактной поверхности деформируемого металла. Вследствие множества условий и факторов, влияющих на силы трения, точный учет этих сил является затруднительным. Поэтому используют методы, построенные на приближенных закономерностях, связывающих силы трения с нормальными давлениями и константами, зависящими: 1) от природы и состояния контактирующих тел (металл и инструмент); 2) от условий трения.

Первые гипотезы трения были предложены Г.Амонтоном (1699г.) и Ш.Кулоном (1785г.). Г.Амонтон не учитывал влияние межатомных связей на силы трения, Ш.Кулон попытался это сделать.

В настоящее время известно много формул для определения величины силы трения. Те из них, которые до сих пор применяют, могут быть разбиты на 3 группы: 1) содержащие в качестве независимой переменной (аргумента) какой-либо физический фактор (нормальное давление, предел текучести

деформируемого металла, вязкость смазки и др.); 2) описывающие распределение сил трения в зоне контакта, причем одним из аргументов они включают чисто геометрический параметр, т.е. координату точки контактной поверхности; 3) определяющие среднюю удельную силу трения в очаге деформации.

Наиболее известной и широко применяемой является *формула (закон трения) Амонтона*:

$$T = \mu N. \quad (37)$$

Отсюда следует, что при $\mu = \text{const}$ имеется прямо пропорциональная зависимость между силой трения T и нормальной сжимающей силой N . По современным представлениям, физическая суть этой зависимости заключается в том, что с увеличением нормального давления прямо пропорционально растет площадь касания поверхностей. Специальные исследования показывают, что закон Амонтона выполняется с достаточной точностью в начальный момент захвата полосы прокатными валками.

Важная роль в теории трения принадлежит *двучленным законам трения*. В процессах сухого трения на контактных поверхностях трущейся пары при выполнении определенных условий (состояние поверхности, температура, физическое состояние и природа металла, скорость перемещения) силу трения рассчитывают по *формуле Кулона*:

$$T = \mu' N + A, \quad (38)$$

где μ' – коэффициент пропорциональности (коэффициент трения), отличающийся по величине от μ в формуле (37);

A – сопротивление скольжению, обусловленное молекулярным схватыванием (адгезионным взаимодействием), т.е. результирующая межатомных сил.

Закон Кулона (38) отражает физические представления, согласно которым возникновение сил трения объясняется действием двух причин: механическим зацеплением неровностей и молекулярным притяжением («сцепленностью поверхностей» по терминологии Ш.Кулона). При $A=0$ гипотезы Амонтона и Кулона совпадают.

По мер развития науки о трении предлагались различные физические модели трения, однако большинство исследователей рекомендуют все же двучленный закон трения, придавая ему различный вид. На двучленном законе трения базируются современные расчетные методы определения сил трения.

Б.В.Дерягин предложил обобщенный закон трения:

$$\tau = \mu (\sigma_n + S\rho), \quad (39)$$

где τ – касательная сила трения;

μ – коэффициент трения;
 σ_n – нормальное напряжение;
 S – истинная площадь контакта;
 ρ – удельное сцепление частиц трущихся поверхностей.

Первое слагаемое характеризует силу трения, зависящую от давления. При упругом деформировании влияние второго слагаемого ничтожно, однако при пластическом деформировании, вследствие смятия поверхности деформируемого металла, второе слагаемое имеет существенное значение.

Ряд ученых показал возможность применения к металлам, находящимся в пластическом состоянии, закона течения вязких сред. А.И.Целиков при определении сил трения, возникающих на контактных поверхностях при прокатке, исходил из закона И.Ньютона движения вязкой жидкости:

$$\tau_{\delta} = \eta \frac{dV_x}{dz}, \quad (40)$$

где η – коэффициент вязкости;

$\frac{dV_x}{dz}$ – градиент скорости в направлении, перпендикулярном действию.

Силу трения по гипотезе жидкостного трения определяют по формуле:

$$\dot{Q} = \eta v \frac{F_x}{l}, \quad (41)$$

а касательное напряжение

$$\tau_x = \eta \frac{v}{H}, \quad (42)$$

где v – скорость скольжения;

H – толщина слоя смазки;

F_x – площадь поверхности контакта.

Большое распространение в теории ОМД получил закон трения, предложенный Э. Зибелем:

$$t = \mu_{\sigma} \sigma_T, \quad (43)$$

где t – удельные силы;

μ_{σ} – показатель сил трения;

σ_T – предел текучести деформированного металла.

Иногда закон (условие) Зибеля записывают в виде формулы:

$$t = \mu_{\sigma}^* m \sigma_T, \quad (44)$$

или

$$t = \mu_{\sigma}^* 2 \tau_c = \psi \tau_c, \quad (45)$$

где m – коэффициент Лоде;

τ_c – сопротивление пластическому сдвигу металла.

Из теории пластичности известно, что величина m находится в пределах $1,0 \div 1,15$; поэтому коэффициент μ_σ^* меньше μ_σ , но не более, чем на 15%. Из формулы (45) видно, что $\psi = 2 \mu_\sigma^* = 2 \mu_\sigma / m$.

Одним из вариантов закона Зибеля можно считать формулу предельной силы трения:

$$t = \tau_c, \quad (46)$$

которую называют также *условием Прандтля*. Формулу (46) применяют в предположении, что удельные силы трения достигают максимально возможного значения, равного сопротивлению сдвига; при этом $\psi=1$, $\mu_\sigma^*=0,5$ и $\mu_\sigma=0,5 \div 0,58$.

Широкое применение закона Зибеля в теории ОМД объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, применение условия Зибеля вместо закона Амонтона во многих случаях позволяет значительно упростить математические операции и получить более простые конечные формулы. Во-вторых, по мнению многих исследователей, закон Зибеля более правильно отражает физическую суть процесса трения, поскольку возникновение сил трения связано с пластической деформацией поверхностного слоя металла. По своему физическому содержанию закон Зибеля в большей степени соответствует жестким условиям трения, когда велико отношение давления к пределу текучести металла (коэффициент подпора выше 2-3), инструмент имеет грубую поверхность, отсутствует технологическая смазка и т.д. Формула предельной силы трения отвечает особо жестким условиям трения, когда фактическая площадь касания (площадь сдвига) равна или почти равна номинальной площади.

6.2 Механизм приконтактных деформаций при трении

Природа внешнего трения (сухого и граничного) сложна, поскольку возникновение сил трения обусловлено многими процессами, протекающими на разных физических уровнях (механическом, молекулярном, атомарном). В настоящее время установлены основные источники формирования сил трения. К ним относят: 1) *механическое зацепление* неровностей трущихся поверхностей; 2) *молекулярное схватывание* поверхностей в точках истинного контакта, образование так называемых мостиков сварки с последующим их разрушением (по мнению ряда исследователей, этот механизм сухого трения является главным); 3) *преодоление сопротивления сдвигу в слое промежуточных веществ*, т. е. в микрообъемах разделительной среды.

Взаимодействие поверхностей в точках истинного контакта, приводящее к возникновению силы трения, называют *фрикционной связью*.

Основные виды фрикционных связей классифицируют следующим образом:

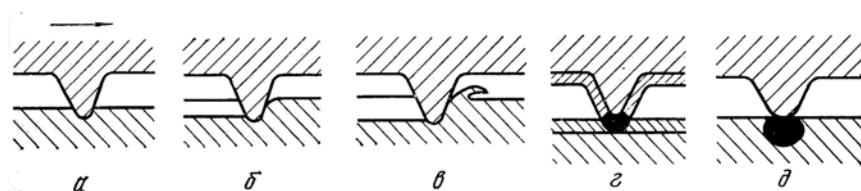


Рис. 6.1. Основные виды фрикционных связей

1. *Упругое оттеснение* микровыступом одной поверхности материала другой поверхности (рис. 6.1 а).
2. *Пластическое оттеснение* (при более глубоком внедрении выступа) (рис. 6.1 б).
3. *Микрорезание, выцарапывание* (рис.6.1 в).
4. *Схватывание и разрушение пленок*, покрывающих поверхности трущихся тел, либо слабое схватывание основных поверхностей (рис.6.1 г).
5. *Прочное схватывание поверхностей*, сопровождающееся глубинным вырыванием материала одного из трущихся тел (рис.6.1 д).

Из перечисленных видов фрикционных связей первые три относятся к категории механического зацепления, а последние два – к категории молекулярного схватывания (адгезионного взаимодействия). В современной теории трения сформулированы условия перехода от одного вида фрикционной связи к другому (для механического зацепления). На базе теории упругости и пластичности с учетом дискретности касания поверхностей разработаны методы теоретического расчета сил трения и коэффициента трения. Наибольшую трудность в таких расчетах представляет определение молекулярной (адгезионной) составляющей силы трения.

6.3 Трение при различных видах ОМД

Трение при прокатке.

В настоящее время горячую прокатку осуществляют в режиме сухого трения. Холодная прокатка осуществляется с применением смазок. При холодной прокатке листов и полосы толщиной до 2,5 мм на входе в очаг деформации действует гидродинамический эффект, нагнетающий смазку. У кромок полосы он не действует и достигает максимума в центре полосы.

Наряду с задачей снижения трения, смазка при холодной прокатке выполняет и задачу охлаждения прокатываемой полосы и валков, т.е. отводит тепло, выделяющееся в результате пластической деформации.

Прокатка без трения невозможна, но трение должно быть умеренным, чтобы неоправданно не возрастали нагрузки на прокатный стан.

Трение при волочении.

При волочении проволоки и прутков используется жидкостное трение. При волочении труб на длинной оправке трение со стороны оправки помогает процессу деформации и его нужно увеличивать в разумных пределах. Трение со стороны волокна – сопротивление деформации. И его нужно уменьшать, используя режим жидкостного трения.

Трение при ковке и штамповке.

Усилие деформации существенно превышает сопротивление металла деформации. Это объясняется тем, что шероховатые штампы оказывают сопротивление растеканию металла, т.е. обеспечивают высокую силу трения. При ковке максимальное трение сосредоточено ближе к центру инструмента. А в самом центре имеет место прилипание. Тормозящее влияние касательных напряжений растеканию металла при ковке можно существенно уменьшить, если развернуть касательное напряжение на 90 градусов, введя наряду с поступательным движением штампа его вращение вокруг оси диска. Если скорость вращения будет существенно больше скорости вертикального смещения штампа, то горизонтальная составляющая силы трения не будет существенно препятствовать растеканию металла в стороны. В этом случае сила осадки может быть существенно уменьшена.

Холодную штамповку производят с применением смазок. В последнее время эффективно стали применять жидкостной режим трения. Гидромеханическая вытяжка заключается в том, что сжатие жидкости в полости матрицы пуансоном с изделием приводит к ее прорыву между матрицей и изделием с образованием слоя, обеспечивающего жидкостное трение.

7 СМАЗКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

7.1 Смазки для ОМД

Вещества, подаваемые на контактные поверхности в зону деформации, необходимые для нормального протекания или интенсификации процесса обработки, называют *технологическими смазками*.

Такие виды ОМД, как холодная или горячая прокатка ряда цветных металлов, волочение, прессование черных и тугоплавких металлов, листовая вытяжка, холодное выдавливание, горячая прокатка труб на длинной оправке и некоторые другие неосуществимы в промышленных масштабах без применения технологических смазок. Подача смазок при горячей прокатке

стали, горячей ковке и объемной штамповке, вырубных операциях листовой штамповки, гибочных операциях позволяет значительно улучшить технико-экономические показатели процесса.

7.2 Виды и назначение смазок

Основное назначение смазки – снижение коэффициентов трения. Смазки образуют промежуточный слой между деформируемым телом и инструментом, полностью или частично изолирующий их друг от друга.

В зависимости от назначения применяют следующие смазки:

1) Жидкие и консистентные смазки – эмульсии, масла растительные и минеральные смеси. Их применяют, главным образом, при холодной ОМД с большими скоростями.

2) Порошкообразные смазки – мыла в виде порошка или стружки, графит;

3) Стекло в виде порошка или ваты применяют при горячем прессовании сталей и тугоплавких металлов.

4) Покрытие заготовки мягкими пластичными металлами (медь, свинец), на которые затем наносят смазку, используется при волочении проволоки и труб из высокопрочных сталей и сплавов.

Смазки классифицируют по химическому составу, агрегатному состоянию, назначению и другим признакам. По агрегатному состоянию смазки можно подразделить на несколько групп: масла и их производные, эмульсии, компаунды и пластичные смазки, твердые смазки.

Масла и их производные. Поверхностно-активные вещества.

По химическому составу и происхождению масла подразделяют на следующие подгруппы: а) минеральные масла; б) растительные и животные жиры; в) масла на основе синтетических жирных кислот.

Минеральные масла получают из нефти. Качество нефти как сырья для производства минеральных масел полностью зависит от характера содержащихся в ней углеводородов и кислородных соединений, а также от их относительного количества в смеси.

Перегоняя нефть при атмосферном давлении, от нее отбирают бензиновые, лигроиновые и керосиновые фракции, а в остатке получают мазут. При вакуумной перегонке мазута получают ряд фракций дистиллятов (веретенный, машинный, автоловый, цилиндровый), отличающихся по вязкости, плотности, температуре кипения и другим свойствам. После отгонки дистиллятов от мазутов остается высоковязкий остаток – гудрон, полугудрон. Очисткой дистиллятов получают дистиллятивные масла. Значительная доля масел получается смешиванием дистиллятивных и остаточных масел в различных соотношениях.

По способу очистки масла можно разделить на масла сернокислотной и селективной очистки. Операция очистки необходима для удаления из

дистиллятов остатка асфальто-смолистых веществ, части высокомолекулярных полициклических ароматических и нафено-ароматических углеводородов с короткими алифатическими цепями, нафеновых кислот, сернистых соединений и др. Очищенные масла должны содержать лишь небольшое количество смолистых веществ, являющихся естественными антиокислителями. Особым видом очистки является депарафинизация масел – удаление от дистиллятивных и остаточных фракций содержащихся в них твердых углеводородов, повышающих температуру застывания масла.

По назначению минеральные масла разделяются на большое число групп. Для улучшения эксплуатационных свойств масел в них вводят различного рода присадки. Масла содержащие присадки, иногда называют легированными.

Природные *растительные масла и животные жиры* представляют собой смеси сложных эфиров, образуемых глицерином (трехатомным спиртом) и высшими жирными кислотами. Сложные эфиры жиров называют *глицеридами*.

Жирными или *карбоновыми кислотами* называются органические вещества (углеводороды), молекулы которых содержат одну или несколько карбоксильных групп COOH . В зависимости от количества этих групп различают кислоты одноосновные, двухосновные и т.д. В состав жиров входят одноосновные (монокарбоновые) кислоты. Они подразделяются на предельные (насыщенные), непредельные (ненасыщенные), циклические и др.

Важнейшим представителем непредельных кислот с одной двойной связью является олеиновая кислота $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$. Ее производные в большом количестве входят в состав подсолнечного, хлопкового, оливкового и некоторых других растительных масел.

Все жирные кислоты (предельные и непредельные) относятся к категории *поверхностно-активных веществ* (ПАВ). Благодаря наличию карбоксильной группы COOH молекулы жирных кислот полярные. Попадая на металлическую поверхность, молекулы примыкают к ней активными группами COOH , образуя упорядоченные, прочные граничные слои. При большой протяженности молекул такие слои существенно снижают силы трения.

При воздействии на жиры или жирные кислоты щелочью образуются мыла, которые представляют собой соли жирных кислот. Мыла как и жирные кислоты являются ПАВ.

Эмульсии.

Эмульсией называется достаточно устойчивая система из двух жидких фаз, одна из которых распределена в виде мельчайших капелек в другой. Жидкость, образующую капельки, называют дисперсной фазой, остальную часть – дисперсионной (непрерывной) средой. Наиболее употребительны эмульсии типа масло-вода.

Из-за большого поверхностного натяжения вода не смачивает масло, которое стремится сосредоточиться на поверхности воды в виде отдельной фазы. Для получения устойчивых эмульсий с концентрацией дисперсной фазы выше 0,1 % необходимо присутствие в растворе эмульгатора. Растворяясь, эмульгатор уменьшает поверхностное натяжение воды и его раствор смачивает гидрофобные частицы масла. В результате на поверхности капелек масла образуется коллоидно-адсорбционная пленка эмульгатора с достаточно высокой вязкостью и прочностью. Таким образом, капельки масла оказываются изолированными одна от другой и при механическом перемешивании равномерно распределяются в воде, образуя стабильную эмульсию.

По степени диссоциации в воде эмульгаторы подразделяются на ионогенные и неионогенные. Ионогенные вещества диссоциируют в воде и по характеру ионов подразделяются на анионоактивные и катионоактивные. Катионоактивные эмульгаторы образуют стабильные эмульсии в кислой среде и поэтому, во избежание коррозии, при обработке металлов давлением обычно не применяются. Широкое применение находят анионоактивные эмульгаторы: натриевые, калиевые, триэтаноламиновые соли жирных и нафтеновых кислот. Они обладают высокой эффективностью, но чувствительны к электролитам и снижают эффективность в жесткой воде. Неионогенные эмульгаторы не диссоциируют в воде и менее чувствительны к электролитам и к жесткости воды.

Стабильные эмульсии с повышенными технологическими свойствами получают при совместном применении анионоактивных и неионогенных эмульгаторов в различных пропорциях. Иногда – с помощью ультразвуковых колебаний, либо одновременным введением эмульгатора и действием ультразвука. Одной из разновидностей эмульсий являются, так называемые, водорастворимые масла (коллоидные дисперсии): молекулы минерального масла (а также маслорастворимых ингибиторов коррозии) полностью включаются в мицеллы (молекулярные агрегаты) эмульгатора и при растворении эмульсола в воде образуются прозрачные водные мицеллярные растворы. В качестве эмульгаторов в таких растворах используют амины жирных кислот, сульфонаты и в качестве связывающих – гликоли и др.

Смазочные и эксплуатационные свойства эмульсий зависят от вида диспергированного вещества (масла), его концентрации, типа и количества эмульгатора, наличия примесей, жесткости воды и других факторов. В качестве дисперсной фазы используют минеральные и растительные масла, животные жиры, синтетические продукты, их смеси, отходы производства растительных масел; иногда в состав эмульсий вводят мелкодисперсные порошки твердых веществ. Концентрация масла в эмульсиях, применяемых при обработке давлением, в большинстве случаев находится в пределах от 1 до 10 % . При концентрациях выше 25% в растворе появляются обратные дисперсии воды в масле и возможно образование студней. При концентрации более 70%, как правило, образуются обратные эмульсии воды в масле.

В цехах по обработке давлением водные эмульсии минеральных масел изготавливают из эмульсолов: коллоидных растворов эмульгатора в масле. В некоторых случаях находят применение малостабильные (метастабильные) эмульсии, а иногда просто механические смеси масла с водой. Такие смеси получают путем постоянного интенсивного перемешивания в мешалках, циркуляцией или барботированием.

Компаунды и пластичные смазки.

Смеси минеральных масел с растительными или синтетическими продуктами в различных соотношениях называют компаундами. Растительные масла или синтетические продукты вводят в минеральное масло для повышения эффективности смазки без значительного увеличения вязкости. Установлено, что указанные добавки заметно изменяют физические и смазочные свойства основного компонента лишь тогда, когда их концентрация составляет не менее 10 %.

К пластичным (консистентным) относят смазки, полученные загущением масел, в основном минеральных, гидротированными натриевыми, кальциевыми, литиевыми, бариевыми, алюминиевыми мылами природных и синтетических жирных кислот, а также парафином, церезином, воском, вязкостными присадками (полиизобутиленом разных марок, виниполом), загустителями (силикогелем). В некоторых случаях в качестве дисперсионной среды пластичных смазок используются силиконовые жидкости.

Для повышения антифрикционных свойств, способности сохраняться на контакте, стойкости против окисления, химической стабильности, противоизносных и противозадирных свойств в компаунды и пластичные смазки вводят порошкообразные наполнители: графит, дисульфид молибдена, тальк, серу, слюду, мел, сажу, глину; органические наполнители: древесную муку или опилки, отруби и другие компоненты, а также поверхностно-активные вещества в отдельности или в различных комбинациях и соотношениях.

Твердые смазки.

Эту группу смазок можно разделить на две подгруппы: сухие твердые смазки и наполнители; твердые смазки, размягчающиеся или плавящиеся в процессе деформации. Сухие твердые смазки отличаются тем, что они не меняют своего агрегатного состояния в процессе работы.

Графит – минерал, гексагональная полиморфная модификация углерода. Имеет слоистое, чешуйчатое строение, жирный на ощупь. Природный кристаллический графит поставляется в виде концентрата марок А и Б, получаемого обогащением графитовых руд.

Дисульфид молибдена MoS_2 получают из природных минералов (молибденового блеска) либо синтетическим путем. Имеет вид серого порошка. Как и графит, дисульфид молибдена обладает высокой адгезией по отношению к металлам.

К подгруппе твердых смазок, размягчающихся или плавящихся в процессе деформации, относятся стекла, эмали, шлаки металлургические, природные минералы и горные породы, соли, сварочные флюсы. Эти смазки не горят, не дают вредных газовых выделений, но они применимы только в определенном температурном диапазоне. При температурах ниже температуры плавления (размягчения) они превращаются в абразив.

7.3 Требования к смазкам

Применение смазок обычно преследует несколько целей, что определяет основные *функциональные требования* к смазкам:

- 1) снижение сил трения на контакте;
- 2) уменьшение износа инструмента;
- 3) предотвращение схватывания и налипания металла на инструмент;
- 4) обеспечение чистоты и оптимальной шероховатости поверхности изделия;
- 5) охлаждение инструмента (для смазочно-охлаждающих жидкостей);
- 6) снижение теплопередачи между деформируемым металлом и инструментом;
- 7) уменьшение окисления металла и потерь легирующих элементов при обработке (для защитно-смазочных покрытий);
- 8) обеспечение более равномерного распределения деформаций по объему деформируемого тела.

Удовлетворить одновременно всем указанным требованиям трудно, некоторые из них противоречат друг другу. Например, увеличение толщины смазочного слоя между контактными поверхностями способствует снижению сил трения, не вместе с тем возрастает шероховатость поверхности изделия из-за ее деформирования смазкой. Поэтому в зависимости от конкретных условий и целей обработки стремятся добиться того, чтобы смазка удовлетворяла главным, первоочередным требованиям.

Важнейшей функцией смазки является уменьшение сил внешнего трения (коэффициента трения). Под *эффективностью смазки* чаще всего понимают именно ее *антифрикционную активность*. В некоторых случаях снижение сил трения ограничено устойчивостью процесса или другими причинами, например, условиями захвата при прокатке. Таким образом, смазка должна обеспечить оптимальную величину силы трения, которая не всегда является минимальной. Помимо функциональных, смазка должна удовлетворять целому ряду других требований технического, экономического и санитарно-гигиенического характера. Основные из них следующие:

- 1) стабильность состава и свойств;
- 2) удобство подачи ее на инструмент и заготовку;
- 3) простота приготовления и возможность регенерации;
- 4) простота удаления с поверхности изделий;
- 5) способность ее накапливаться на поверхности инструмента;

- 6) отсутствие вредного воздействия на металл и оборудование (коррозия и проч.);
- 7) нетоксичность, отсутствие неприятного запаха;
- 8) минимальное загрязнение рабочих мест;
- 9) отсутствие отрицательного воздействия на окружающую среду, в частности простота очистки сточных вод;
- 10) малая стоимость и недефицитность (для смазок массового потребления).

7.4 Смазки для холодной прокатки стали

Промасливание полос предохраняет их поверхность от атмосферной коррозии при межоперационном хранении, от механических повреждений при смотке, размотке и транспортировке рулонов, а также снижает энергосиловые параметры при прокатке. На некоторых станах промасливающая смазка является единственной технологической смазкой в первой клетки, а при прокатке толстых полос - во всех клетях стана. Смазка для промасливания влияет на свариваемость витков рулона при отжиге и на чистоту поверхности холоднокатаных листов. Тип масла для промасливания зависит от назначения листовой стали.

В настоящее время в мировой практике для промасливания травленных полос, предназначенных для прокатки холоднокатаных полос для машиностроения, применяются эмульсии на основе растительных, животных жиров или синтетических продуктов и минеральные масла или их смеси, а также эмульсолы эмульсий, применяемых при последующей холодной прокатке на стане. К промасливающим эмульсиям и маслам часто добавляют антикоррозионные, моющие и эмульгирующие присадки.

При нанесении подогретой до 90-95 °С эмульсии на горячую полосу вода быстро испаряется, на поверхности металла остается равномерно распределенная твердая пленка масла или мыла, прочно связанная с поверхностью активными кислотными группами, обеспечивающая высокие антизадирные и смазочные свойства и не налипающая на поверхность натяжных прессов. Эмульсии обеспечивают в 4-6 раз меньший расход смазки и меньшую загрязненность рабочих мест по сравнению с маслами.

Недостатком водной смазки является необходимость полной сушки полосы перед смоткой в рулон из-за возможности коррозии металла, а также загрязнение оборудования травильных линий масляной основой эмульсии.

В качестве масляных смазок в основном применяются минеральное масло И-20А, смазка Темп-3, эмульсол ОМ.

При прокатке жести необходимо применять высокоэффективные смазки, легко удаляемые с поверхности перед нанесением покрытий. На практике применяют маловязкие растительные и животные жиры или синтетические продукты. Масло в большинстве случаев наносят на полосу в виде механической водно-масляной смеси (10-30%-ной концентрации).

Иногда в чистом виде применяют метастабильные и нестабильные эмульсии. Одной из самых распространенных смазок является пальмовое масло, хотя при скоростях выше 25 м/с прокатка с ним становится не стабильной.

7.5 Смазки для горячей прокатки стали

Смазка подается лишь в том случае, если не нарушаются условия захвата. Смазки для горячей прокатки должны обладать высокими адгезионными свойствами, обеспечивающими их минимальный смыв с поверхности валков при прокатке.

Во избежание выгорания смазку наносят на поверхность валков. Смазка находится в очаге деформации сотые или тысячные доли секунды в замкнутом объеме, изолированном от атмосферы и под высоким давлением, что практически исключает возможность горения. В очаге деформации может происходить лишь частичное термическое разложение после прокатки на поверхности полосы остается 40-70% общего количества смазки, прошедшей через очаг деформации, остальная смазка уносится полосой и частично сгорает на ее поверхности.

С учетом того, что смазка на металле выгорает, а зольные остатки удаляются вместе с окалиной, при горячей прокатке могут применяться отходы минеральных масел, растительных и животных жиров, а также твердые смазки, консистентные и жидкие масла, водомасляные смеси, эмульсии, водные растворы и суспензии различных веществ.

Твердые смазки, несмотря на высокую эффективность, не нашли широкого применения. Стеклосмазки трудно поддаются равномерному нанесению на заготовку и плохо удаляются с готового проката. Графитные смазки, воски, аминоэфирные применяются в виде брикетов, прижимаемых к поверхности валков. При этом затруднительно осуществить точное распределение смазки по валкам, необходимость частой замены брикетов также снижает их технологичность. Такие же недостатки присущи и консистентным смазкам, в системах жидкой смазки затруднительно поддерживать высокую температуру.

Наибольшее распространение получили минеральные масла повышенной вязкости (Ц-11, Ц-24, П-28, Ц-52, очищенные отходы минеральных масел, растительные и животные жиры (рапсовое, хлопковое, полимеризованное хлопковое, льняное, китовый жир и др.), синтетические жирозаменители, смеси жиров синтетических жирозаменителей с минеральными маслами в различном соотношении, водомасляные смеси и эмульсии указанных масел.

На сортовых станах технологическая смазка подается в калибры чистовых и предчистовых клетей. С подачей смазки повышается износостойкость калибров в 1,5–2,5 раза, снижаются энергозатраты на 5–15%, улучшаются геометрические размеры и качество поверхности профилей.

При прокатке на непрерывных листовых станах смазка в большинстве случаев подается на первые три - четыре клетки чистовой группы, рабочие

валки которых подвергаются повышенному разгарному износу. Иногда смазка подается и на последние клетки черновой и чистовой групп.

7.6 Смазки для волочения

Смазка для волочения должна обеспечить высокую износостойкость инструмента и требуемое качество поверхности продукции, а при высоких скоростях волочения – эффективное охлаждение инструмента. В очаг деформации смазки поступает в основном за счет гидродинамического эффекта, возникающего во входном конусе волоки. Поверхность волоки препятствует поступлению смазки, оттесняя ее с поверхности заготовки.

Для улучшения условий трения на заготовку перед волочением наносят подсмазочные покрытия, способствующие сохранению смазки в зоне контакта, а при разрыве смазочного слоя выполняющие функцию технологической смазки.

Подсмазочные покрытия наносятся на чистую от окислов поверхность заготовки. С поверхности стали окалину удаляют травлением в кислотах или в расплавах солей, дробеструйной обработкой, механическим взламыванием окалины, гидроабразивной обработкой. После травления заготовку промывают и при необходимости нейтрализуют. Подсмазочные покрытия наносят преимущественно в два слоя. Нижний образуют меднением, желтением, фосфатированием и оксалатированием, верхний – известкованием, покрытием жидким стеклом или бурой. Нижний слой имеет молекулярное или близкое к нему сцепление с поверхностью, верхний – механическое сцепление. Верхний слой обеспечивает также нейтрализацию поверхности заготовки.

После нанесения покрытия металл сушат при 200-300 °С для устранения травильной хрупкости в сушилах или за счет собственного тепла металла. Сушка длится от нескольких минут до 1-2 ч.

Для волочения труб, прутков и проволоки диаметром >0,8-1,0 мм (грубое, грубо-среднее и среднее волочение) применяют сухие порошкообразные смазки, плавящиеся при температуре деформации, пастообразные и консистентные смазки, для цветных металлов используют также различные масла. При мокром волочении инструмент полностью погружен в водную эмульсию смазки. Мокрое волочение используют при волочении тонкой (диаметром менее 0,8-1,0 мм), тончайшей и микронной проволоки.

7.7 Смазки дляковки и объемной штамповки

Смазка должна обеспечить высокую стойкость инструмента, облегчить скольжение металла по контакту, хорошее заполнение гравюры штампа и

извлечение готовой поковки из штампа. Стойкость штампов зависит от теплоизолирующих свойств и эффективности смазки.

Смазку наносят до деформации. Необходимо обеспечить сохранность смазочной пленки на протяжении всего процесса. Накопление остатков смазки в углублениях гравюры штампа препятствует получению требуемой формы изделий. При свободной ковке (осадке) основное назначение смазки – теплоизоляция инструмента и уменьшение окалинообразования заготовки при нагреве и обработке. При объемной штамповке газообразные продукты, выделяющиеся в результате сгорания или разложения компонентов смазки, способствуют разделению поковки и штампа. Штамповка сложных по форме изделий невозможна без смазки, способствующей их извлечению и предупреждающей схватывание обрабатываемого металла со штампом.

При горячей штамповке в качестве технологических смазок используют (в чистом виде или с наполнителями) легкие и тяжелые минеральные масла и мазут, водные и масляные суспензии графита, водные растворы солей, сульфит-целлюлозный щелок и сульфитно-спиртовую барду, стеклосмазки.

Водные смазки применяют в тех случаях, когда температура поверхности штампа не превышает 200-300 °С. При более высоких температурах водные смазки не смачивают поверхность штампа и поэтому применяют масляные и масложировые смазки, стеклосмазки.

Процессы холодной штамповки отличаются высокими контактными давлениями, большими деформациями (80-90% за один переход) большим проскальзыванием по контакту, разогревом изделий до 250-300 °С за счет тепла деформации. Перед холодной штамповкой на заготовки наносят подсмазочные покрытия. При штамповке углеродистой стали используют в основном фосфатирование с последующим омыливанием; легированные и высоколегированные стали, цветные металлы оксатируют, анодируют или пассивируют и обрабатывают с применением мыльных и масляных эмульсий, графитовых и масляных смазок, животных жиров, смазок на основе дисульфида молибдена, а также лаков. В некоторых случаях наносят электролитические металлические покрытия, известково-солевые покрытия, заготовки для деталей неотчетливого назначения подвергают желтению.

8 РАВНОМЕРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

При равномерной (однородной) деформации напряженное состояние во всех точках тела одинаково, компоненты тензора напряжений и направление главных осей не изменяются при переходе от одной точки тела к другой, плоскости и прямые линии в теле не изменяются.

Равномерность и неравномерность деформации в технологическом смысле следует подразделить на структурно-физическую и геометрическую.

Если каждое зерно литой или деформированной структуры металла заготовки получило при данной деформации одинаковую степень

деформации, то такую деформацию можно считать *физически равномерной*, независимо от формоизменения заготовки в целом, т.е. независимо от ее уширения и удлинения. Иначе будет физически неравномерная деформация.

Если металл при поперечной осадке заготовки в форме прямоугольной призмы, длина которой больше ширины, растекается в длину и в ширину в одинаковых количествах, т.е. дает одинаковые смещенные объемы в обоих направлениях, то такую деформацию данной формы заготовки можно назвать *геометрически равномерной*, независимо от того, получило каждое зерно одинаковую степень деформации или нет.

Выражение «для данной формы заготовки» подчеркнуто потому, что другие заготовки симметричной формы не вполне отвечают этому. Так, у заготовки цилиндрической и квадратной в плане формы, при любой величине изотропного контактного трения, деформация может проходить крайне неравномерно, но у них одинаковые смещенные объемы в ширину и в длину, т.к. ширина равна длине.

Определение геометрической равномерной деформации можно свести к следующей краткой формулировке. Геометрическая равномерная пластическая деформация сжатием – это такая деформация, которая подчиняется условию плоских сечений (независимо от того, какие факторы, влияющие на него учтены). Если деформация не удовлетворяет этому условию, то она не будет равномерной, независимо от того, какой их множества факторов на нее повлиял.

Экспериментально этот принцип легко проверить и подтвердить, если деформировать без контактного трения. При этом призматический образец не образует “бочек” и прямоугольник в плане остается прямоугольником, подобным исходному.

9 НЕРАВНОМЕРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ

При неравномерной (неоднородной) деформации напряженное состояние и деформация различны в различных частях тела. При ОМД деформация всегда неравномерна. Однако, при решении практических задач деформацию принимают равномерной по всему объему тела или тело разбивают на отдельные объемы, в пределах которых деформацию можно принять равномерной.

Основные причины неравномерности деформации:

- 1) несоответствие формы инструмента форме деформируемого тела;
- 2) внешнее трение;
- 3) неоднородность физических свойств деформируемого тела.

Неравномерность деформации при обработке давлением в большинстве случаев нежелательна, т.к. приводит к появлению дополнительных напряжений в процессе деформации, которые снижают пластичность, повышают необходимое усилие, искажают форму тела. Неравномерность

деформации приводит к остаточным напряжениям и неоднородности свойств готовых изделий.

Влияние формы инструмента и заготовки на неравномерность деформации.

В большинстве процессов ОМД форма заготовки отличается от формы готового изделия, определяемой формой инструмента. Обычно форма заготовки проще формы изделия, что приводит к неодинаковому обжатию отдельных частей заготовки, т.е. к неравномерной деформации. Так при штамповке форма штампа и поковки отличаются от формы заготовки; при прокатке фасонных профилей форма калибров отличается от формы заготовки. Только в некоторых процессах ОМД форма инструмента совпадает с формой заготовки (ковка, прокатка листа, волочение проволоки).

Неравномерное обжатие ведет к неоднородности структуры, особенно на заключительных стадиях обработки. В результате неравномерной деформации в разных частях изделия образуются зерна разной величины, появляются дополнительные напряжения. Если распределение напряжений, вызванных внешними силами (основных), вызовет такое изменение формы, которому будет препятствовать целостность тела, то в различных частях тела появятся дополнительные напряжения разных знаков.

Рассмотрим прокатку профиля крестообразного сечения из прямоугольной заготовки (рис. 9.1). Центральная часть заготовки *I* обжимается незначительно, края *II* получают большое обжатие. Внешние силы создают схему основных напряжений всестороннего сжатия: по вертикали от усилий осадки в горизонтальной плоскости от сопротивлений трения. Если бы участки *I* и *II* могли деформироваться независимо, то они получили бы разную продольную деформацию (вытяжку). Но участки *I* и *II* представляют одно целое и целостность тела не позволяет получить естественную вытяжку участков *I* и *II*. Слабо обжимаемый участок *I* сдерживает вытяжку сильно обжимаемых участков *II*, а они в свою очередь принудительно увеличивают вытяжку участка *I*. В результате длина всех участков получается одинаковой (*I* на рис. 9.1). Взаимодействие различно обжимаемых участков вызовет появление дополнительных напряжений растяжения в участке *I* и сжатия в участках *II* в направлении прокатки.

Закон дополнительных напряжений, сформулированный С. И. Губкиным, на основании которого определяется знак дополнительных напряжений, гласит: «В слоях и элементах деформируемого тела, стремящихся в данном направлении к большему изменению размеров, возникают дополнительные напряжения, знак которых отвечает уменьшению размеров в рассматриваемом направлении. В слоях и элементах, стремящихся к меньшему изменению размеров, возникают дополнительные напряжения, знак которых отвечает увеличению размера».

Основные напряжения, суммируясь с дополнительными, составляют результирующие рабочие напряжения. Распределение рабочих напряжений в различных частях неравномерно деформируемого тела отличается от

распределения основных напряжений.

Схема напряженного состояния в отдельных частях тела может отличаться от схемы напряженного состояния, обусловленной внешними силами. Так, если в участке *I* (рис. 9.1) в направлении прокатки дополнительные напряжения растяжения превысят основные напряжения сжатия, обусловленные силами трения, схема напряженного состояния в этом участке окажется разноименной.

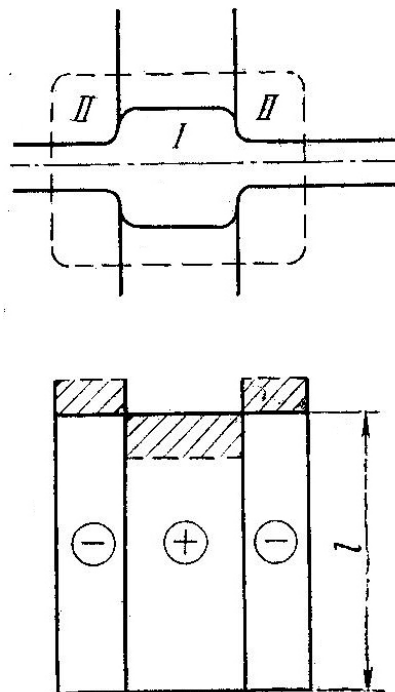


Рис.9.1. Схема прокатки крестообразного профиля из прямоугольной заготовки

Принудительная вытяжка участка *I* вызовет перетекание металла из сильно обжимаемых участков *II* в участок *I* и его утяжку по высоте, так как обычно перетекания бывает недостаточно для компенсации принудительной утяжки участка *I*. При сильно выраженной неравномерности обжатия металл участка *I* может отстать от валков (рис. 9.2,а). Принудительное сдерживание вытяжки участков *II* вызовет вынужденное их уширение: металл, не имея возможности деформироваться в продольном направлении в соответствии с обжатием, устремляется в стороны (рис. 9.2,а).

Дополнительные напряжения растяжения в участке *I* при сильно выраженной неравномерности обжатия могут вызвать, помимо утяжки, разрывы, поперечные трещины; в участках *II* сдерживание вытяжки может вызвать, помимо вынужденного уширения, гофр (рис. 9.2,б).

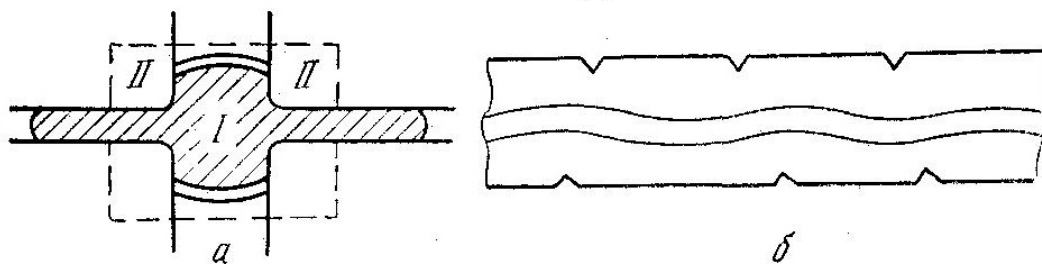


Рис.9.2. Утяжка, вынужденное уширение, гофры и разрывы при неравномерном обжатии при прокатке

Силы, создаваемые дополнительными напряжениями, взаимно уравниваются, поэтому величина дополнительных напряжений зависит от площади сечения участка, на который они действуют: чем меньше площадь сечения участка, тем больше напряжение. Степень развития утяжки и разрывов, характерных для слабо обжимаемых участков, или вынужденного уширения и гофра, характерных для сильно обжимаемых, зависит от соотношения площадей сечения этих участков.

Неравномерность деформации возникает и тогда, когда инструмент или заготовка не имеют оси симметрии, например, в валках переменного диаметра.

Неравномерность деформации приводит к снижению пластичности тела в результате действия дополнительных напряжений. Так как дополнительные напряжения создают взаимно уравнивающиеся силы, в неравномерно деформируемом теле могут быть напряжения растяжения. Растягивающие напряжения, снижая пластичность, могут привести к разрушениям (см. рис. 9.1 и 9.2). Вероятность разрушений тем больше, чем резче выражена неравномерность деформации, меньше площадь сечения слабо обжимаемых частей и меньше пластичность деформируемого тела.

При неравномерной деформации повышаются усилие и расход работы в связи с неравномерным распределением напряжений и перетеканием металла из сильно обжимаемых частей в слабо обжимаемые.

Если температура в момент неравномерной деформации была недостаточно высокой, то дополнительные напряжения после деформации могут вызвать в теле остаточные напряжения.

Влияние внешнего трения на неравномерность деформации.

Внешнее трение затрудняет скольжение деформируемого тела по инструменту. Действие его распространяется неодинаково по объему тела, оно наиболее сильно вблизи поверхности контакта и минимально внутри тела. Это приводит к неравномерности деформации. Например, при осадке образец принимает бочкообразную форму из-за действия сил трения. В результате их действия вблизи контактной поверхности образуется зона

затрудненной деформации, распространяющаяся на некоторую глубину и имеющая форму конуса.

Максимальная степень деформации наблюдается в центре образца. Наименьшая – в зонах затрудненной деформации, средняя – в боковых (бочкообразных) частях заготовки.

При большом отношении высоты заготовки к его диаметру образуется двойная бочкообразность с цилиндрическим участком между двумя бочками. Действие сил трения затухает в пределах двух бочкообразных утолщений и в средней части по высоте имеется линейная схема сжатия.

Неравномерность деформации в результате трения приводит также к появлению дополнительных напряжений и может привести к изменению схемы напряженного состояния в отдельных частях тела. Так при ковке с момента образования бочкообразности боковые поверхности частично выходят из зоны непосредственного обжатия и начинают испытывать дополнительные напряжения растяжения. А во внутренней зоне появляются дополнительные напряжения сжатия. Этим объясняется появление трещин по образующим цилиндра.

Неравномерность деформации, обусловленная внешним трением может быть несимметричной. Так при осадке образца между плитами с различным качеством отделки поверхности цилиндрический образец примет форму близкую к трапеции в осевом сечении: основание вблизи полированной поверхности будет шире, чем вблизи шероховатой.

Влияние неоднородности свойств на неравномерность деформации.

Неоднородность свойств может быть макроскопической (неравномерный прогрев, соединение разных металлов в одной слитке) или микроскопической (неоднородность свойств кристаллов).

При неравномерном нагреве нагретые слои как более мягкие деформируются в большей степени, чем холодные. Это приводит к появлению дополнительных напряжений сжатия в наружных слоях и растяжения во внутренних. При большом перепаде температур по сечению слитка, большой степени деформации и малой пластичности металла дополнительные напряжения растяжения могут вызвать разрывы внутренних слоев.

При деформации тела, составленного из металлов с разными механическими свойствами, в мягких слоях появляются дополнительные напряжения сжатия, а в твердых – растяжения. Если твердые слои имеют пониженную пластичность, то в них произойдут разрывы.

При микроскопической неоднородности дополнительные напряжения возникают не во всем теле, а в пределах группы зерен (доп. напряжения 2 рода), или отдельных зерен (3 рода).

Анизотропия механических свойств кристаллов приводит к неравномерной деформации, даже если другие причины для этого отсутствуют.

10 НАПРЯЖЕНИЯ

Под основными понимают напряжения, возникающие в упруго деформируемом теле. Под рабочими напряжениями понимают напряжения, фактически действующие в пластически деформируемом теле в данный момент времени. Распределение рабочих напряжений в упруго деформируемом теле зависит от формы тела, распределения внешних нагрузок и т. д. Распределение рабочих напряжений в пластически деформируемом теле зависит от тех же причин, а также от условия получения необратимого изменения формы и размеров отдельных слоев и элементов тела с сохранением его целостности.

Поскольку реальным процессам обработки металлов давлением свойственно неравномерное распределение напряжений и деформаций по объему, отдельные слои и элементы тела стремятся получить различное изменение размеров, чему препятствует целостность металла. Слои, стремящиеся к большему изменению размеров, будут передавать слоям, стремящимся к меньшему изменению размеров, растягивающие силы, которые увеличивают размеры тела. Слои, стремящиеся к меньшему изменению размеров, будут передавать слоям, стремящимся к большему изменению размеров, сжимающие силы, которые уменьшают изменение размеров. Таким образом, в слоях, стремящихся получить максимальную вытяжку, возникают дополнительные силы сжатия, а в слоях, стремящихся получить минимальную вытяжку,

□ ДОПОЛН

Дополнительные сжимающие и растягивающие силы должны взаимно уравновешиваться, так как действие одной из них является противодействием по отношению к другой. Эти внутренние взаимно уравновешивающиеся силы определяют величину дополнительных напряжений.

Различают три рода дополнительных напряжений:

- напряжения 1 рода – напряжения, взаимно уравновешивающиеся между большими объемами деформируемого тела;
- напряжения 2 рода – напряжения, взаимно уравновешивающиеся между отдельными зернами или группами зерен;
- напряжения 3 рода – напряжения, взаимно уравновешивающиеся в пределах одного зерна.

После прекращения действия нагрузки, вызывающей пластическую деформацию, снимаются только основные напряжения, определяющие величину упругой деформации. Дополнительные напряжения после окончания деформации остаются в теле и называются остаточными (внутренними) напряжениями.

В качестве примера возникновения остаточных напряжений рассмотрим прокатку полосы в выпуклых (бочкообразных) валках (рис. 10.1). Внутренние взаимно уравновешивающиеся силы создают дополнительные (остаточные) напряжения растяжения в крайних (боковых) слоях полосы и сжатия в центральных слоях.

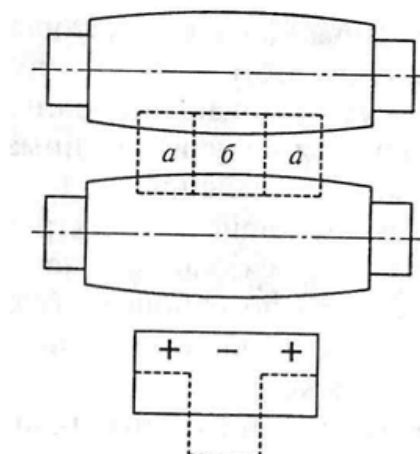


Рисунок 10.1 - Прокатка полосы в бочкообразных валках: *a* – боковые слои полосы; *б* – средние слои полосы

Дополнительные напряжения приводят к следующим последствиям:

- повышение сопротивления деформированию;
- изменение распределения напряжений;
- понижение технологических свойств металла (появление рванин и трещин за счет появления растягивающих напряжений).

Остаточные напряжения, как и дополнительные, разделяют на три рода:

- 1^{го} рода – напряжения, уравнивающиеся в больших объемах тела (рис. 10.2, *a*);
- 2^{го} рода – напряжения, уравнивающиеся в объемах, соизмеримых с размерами зерен или групп зерен (рис. 10.2, *б*);
- 3^{го} рода – напряжения, уравнивающиеся в объемах, соизмеримых с размерами кристаллической ячейки (рис. 10.2, *в*).

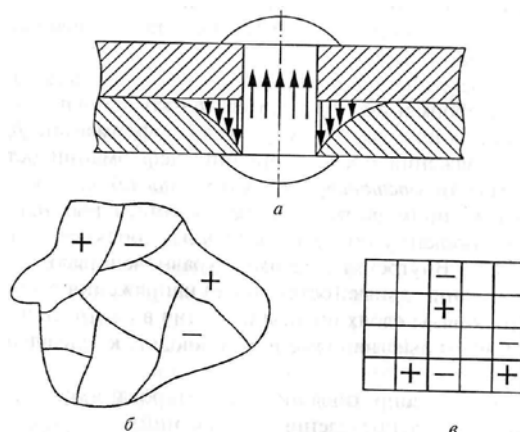


Рисунок 10.2 – Остаточные напряжения: *a* – 1 рода; *б* – 2 рода, *в* – 3 рода

Энергия остаточных напряжений 1 рода составляет десятые доли процента остаточной энергии деформации. Энергия напряжений 2 рода составляет примерно 1 % остаточной энергии деформации. Энергия напряжений 3 рода составляет 99 % остаточной энергии деформации.

Величина остаточных напряжений зависит от следующих факторов:

- структура металла. Чем неоднороднее структура, тем выше остаточные напряжения 2 рода. Для обеспечения однородной структуры следует выбирать температуру деформирования, отличную от температурного интервала фазовых превращений;
- сопротивление деформированию. Чем выше сопротивление деформированию, тем выше остаточные напряжения;
- форма тела. Форма тела влияет на распределение напряжений, следовательно, на величину остаточных напряжений;
- степень деформации. Влияние степени деформации схематически показано на рис. 10.3;
- природа тела. Тела обладают неодинаковым сопротивлением деформированию. Чем выше сопротивление деформированию, тем выше остаточные напряжения;
- условия и вид обработки давлением. Внешнее трение, смазка и другие факторы влияют на условия и вид внутренних напряжений. Чем выше коэффициент трения, тем больше остаточные напряжения;
- скорость деформирования. Скорость деформирования повышает неравномерность распределения напряжений и остаточные напряжения. При этом необходимо учитывать влияние теплового эффекта;
- температура деформирования. Если обозначить: T – температура деформирования; σ_T – величина остаточных напряжений при температуре T ; E_T – модуль нормальной упругости при температуре T ; T_0 – температура тела после охлаждения; σ_0 – остаточные напряжения при температуре T_0 ; E_0 – модуль нормальной упругости при температуре T_0 , то можно записать:

$$\sigma_0 = \sigma_T \frac{E_0}{E_T}. \quad (47)$$

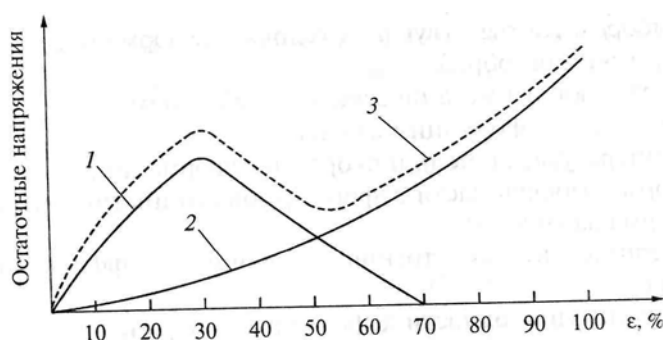


Рис. 10.3. Схема влияния степени деформации на величину остаточных напряжений: 1 – остаточные напряжения 1 рода; 2 – остаточные напряжения 2 и 3 родов; 3 – суммарные остаточные напряжения

Остаточные напряжения с течением времени (в особенности при повышенных температурах) постепенно снижаются. Время снятия остаточных напряжений при комнатной температуре очень продолжительно.

Остаточные напряжения могут появиться не только в результате обработки давлением, но и, например, при неравномерном нагреве, охлаждении, при закалке, т. е. во всех процессах, сопровождающихся изменением межатомных расстояний и стремлением отдельных частей объема к различному изменению размеров при условии целостности тела.

Остаточные напряжения могут играть и положительную роль. Например, полезными являются сжимающие напряжения в поверхностных слоях деталей машин. Они повышают сопротивление усталости и специально создаются путем наклепа роликами, дробеструйной обработкой, химико-термическими методами и т.д.

Предотвращение и уменьшение остаточных напряжений, возникающих в процессе обработки давлением, можно осуществлять:

- выбором соответствующих условий деформации;
- термической обработкой;
- последующим механическим воздействием.

Остаточные (внутренние) напряжения уравниваются внутри тела и присутствуют в нем без приложения внешней нагрузки. Внутренние напряжения могут возникнуть в результате фазовых превращений при неравномерном нагреве или охлаждении. Остаточные напряжения в большинстве случаев нежелательны, т.к. они ухудшают свойства металлов.

Если при эксплуатации изделия напряжения от внешней нагрузки совпадут по знаку с остаточными, то результирующие напряжения могут превысить допустимые. При неправильной технологии обработки давлением остаточные напряжения могут достигать значений, близких к пределу текучести и тогда незначительные нагрузки могут привести к разрушению изделия.

Остаточные напряжения с течением времени частично снимаются, что может привести к изменению размеров тела и короблению. Остаточные напряжения снижают коррозионную стойкость металла. Это приводит к местному разъеданию, порче поверхности и концентрации напряжений вблизи поврежденных мест.

Остаточные напряжения определяют механическим и рентгенографическим методами.

Методы устранения остаточных напряжений.

Основной метод – предотвращение их появления правильным режимом обработки, при котором неравномерность сводится к минимуму, а дополнительные напряжения снимаются в процессе деформации и не приводят к появлению остаточных напряжений.

Для достижения этого всю неравномерную деформацию необходимо осуществлять в начальной стадии обработки, особенно при горячей ОМД. В этих условиях облегчается протекание металла из сильнообжимаемых частей в слабообжимаемые, пластичность металла высокая. Дополнительные напряжения не приводят к разрушениям и постепенно уменьшаются в процессе деформации в результате рекристаллизации. Температура должна быть одинаковой, коэффициент трения минимальный, температура не должна соответствовать температуре межфазового перехода.

Иногда дополнительно создают неравномерность деформации, чтобы она компенсировала другие виды напряжений. Например, при горячей прокатке биметаллической катанки (сталь-медь) для уменьшения разницы прочностных свойств слоев подстуживают медную оболочку. И неравномерность деформации, обусловленная разницей физических свойств меди и стали, устраняется разницей температур.

Если нельзя избежать появления остаточных напряжений (например, при холодной ОМД), то их можно снять дополнительной обработкой. Обычно это – термообработка после ОМД. Напряжения 1-го и 2-го рода обычно полностью снимаются при рекристаллизации.

Остаточные напряжения могут быть сняты и механическим способом: поверхностной обработкой давлением (обкаткой, обдувкой стальной дробью, правкой листов с помощью правильных роликов).

11 МЕХАНИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДЕФОРМАЦИИ

Для анализа технических процессов ОМД Губкин С.И. ввел понятие механических схем деформации. Механической схемой деформации данного процесса называют совокупность схемы главных напряжений и схемы главных деформаций.

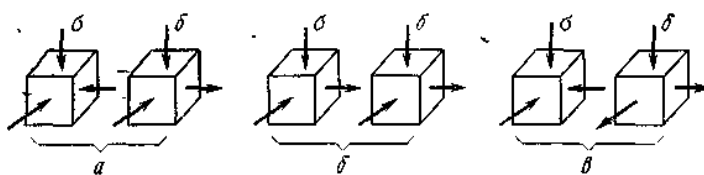


Рис. 11.1 Механические схемы деформации при прессовании (а), волочении (б) и осадке (в)

Рассмотрим механические схемы деформаций некоторых процессов обработки металлов давлением.

При прессовании (выдавливании) металл находится в состоянии всестороннего сжатия (главные напряжения – сжимающие). В направлении оси контейнера происходит деформация удлинения, в направлении двух других осей, перпендикулярных первой, – деформации сжатия (рис. 11.1, а).

При волочении (рис. 11.1,б) схема напряженного состояния разноименная: по оси прутка действует напряжение растяжения, по двум другим осям – напряжения сжатия (давление волоки). Схема деформации в данном случае аналогична схеме деформации при прессовании.

При осадке из-за контактного трения схема напряженного состояния аналогична схеме при прессовании – всестороннее сжатие, схема деформации состоит из одной деформации сжатия и двух деформаций удлинения (рис. 11.1,в).

Следует отметить, что при одинаковой схеме напряженного состояния схемы деформации могут быть различны. С другой стороны, одинаковые схемы деформации могут быть обусловлены различными схемами напряжений.

Установлено, что напряженное состояние характеризуется одной из девяти схем, а деформированное – одной из трех.

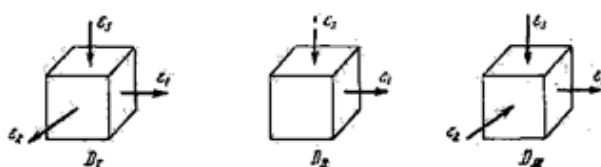


Рис. 11.2 Схемы напряженного состояний: Л – линейные, П – плоские, О – объемные

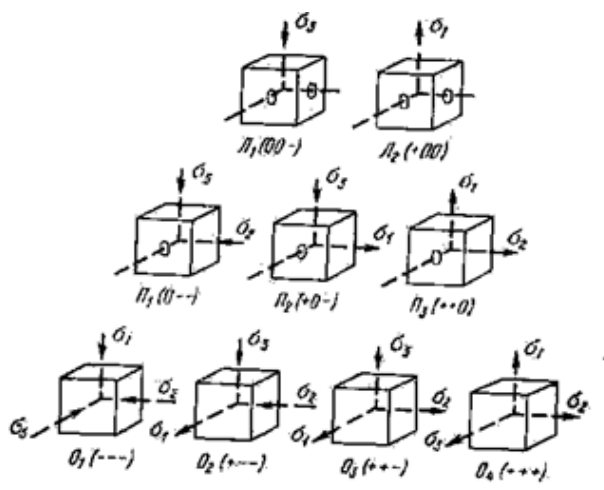


Рис.11.3 Схемы деформированного состояния

Каждая линейная схема напряженного состояния может иметь только одну схему деформации. Так, линейная схема с напряжением растяжения имеет одну деформацию удлинения и две деформации сжатия, а линейная схема с напряжением сжатия имеет схему деформации с одной деформацией сжатия и с двумя деформациями удлинения

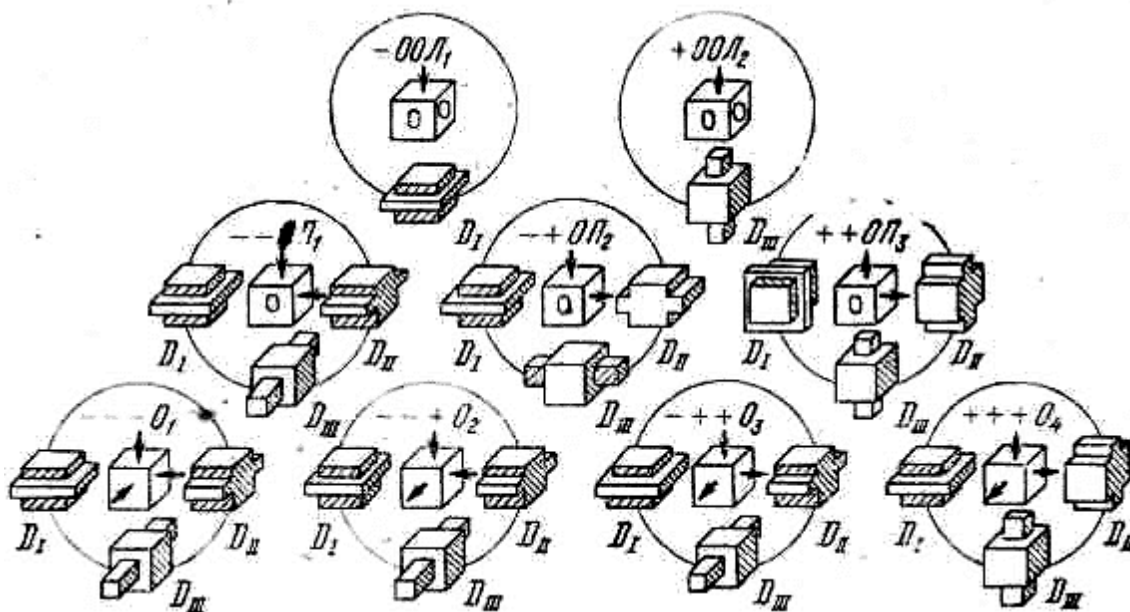


Рис. 11.4. Возможные сочетания схем напряженного состояния и схем деформации

Каждая из четырех объемных и трех плоских схем напряженного состояния может сочетаться со всеми тремя схемами деформаций.

Таким образом, число возможных механических схем деформации равно $2+(4+3)3=23$. На рис. 11.4 представлены возможные сочетания схем напряженного состояния со схемами деформации.

Следует обратить внимание на то, что по известной схеме деформации невозможно определить схему напряженного состояния, даже если известна, кроме схем, и величина составляющих деформаций по оси. Например, если, известно, что проволока круглого сечения получена из заготовки большего сечения и меньшей длины, то можно утверждать, что в процессе обработки схема деформации имеет деформацию удлинения по оси проволоки и деформации сжатия по направлениям, перпендикулярным этой оси. Можно вычислить абсолютные и относительные конечные деформации, однако ничего определенного нельзя сказать о схеме напряженного состояния в процессе получения проволоки. Она могла быть получена различными методами обработки давлением, в частности прессованием, ковкой, волочением, которые имеют разные схемы напряженного состояния.

По схеме напряженного состояния и величине главных нормальных напряжений можно однозначно определить схему деформаций и, следовательно, механическую схему деформации.

12 ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Пластичностью называют свойство металла под действием сил изменять свою форму и размеры без разрушения. Пластичность представляет собой сложную характеристику металла и зависит от целого ряда факторов.

Основными факторами, определяющими пластичность металла при обработке давлением, являются:

- химический состав и структура металла;
- температура деформации;
- скорость деформации;
- схема напряженного состояния.

12.1 Влияние различных факторов на пластичность металла

Влияние химического состава.

Чистые металлы обладают более высокой пластичностью, чем их сплавы. Например, медь пластичнее ее сплава с оловом (бронзы). Сплавы, образующие твердые растворы, обычно более пластичны, чем сплавы, образующие химические соединения и механические смеси. Большей пластичностью обладают металлы, у которых больше разница между пределами прочности и текучести.

Компоненты сплава также влияют на его пластичность. С повышением содержания углерода в стали пластичность уменьшается. При содержании углерода свыше 1,5% сталь с трудом поддается ковке.

Кремний понижает пластичность стали. Поэтому кипящая малоуглеродистая сталь (08кп, 10кп) с малым содержанием кремния применяется при изготовлении деталей холодной штамповкой глубокой вытяжкой.

В легированных сталях хром и вольфрам уменьшают, а никель и ванадий повышают пластичность стали.

Сера, соединяясь с железом, образует сульфид железа FeS , который в виде эвтектики располагается по границам зерен и при нагревании до 1000° расплавляется. В результате связь между зернами нарушается и сталь становится хрупкой. Такое явление называется *красноломкостью*.

Марганец, образуя тугоплавкое соединение MnS , нейтрализует вредное действие серы.

Фосфор увеличивает пределы прочности и текучести, но уменьшает, особенно при низких температурах, пластичность и вязкость сталей, вызывая их *хладноломкость*.

Пластичность литого крупнозернистого металла ниже, чем деформированного, имеющего мелкозернистую структуру. Снижают пластичность поры, газовые пузыри, неметаллические включения, микро- и макротрещины.

Влияние температуры.

Качественная зависимость пластичности от температуры представлена на рис.

Влияние температуры неоднозначно. Малоуглеродистые и среднеуглеродистые стали, с повышением температуры, становятся более пластичными (1). Высоколегированные стали имеют большую пластичность в холодном состоянии (2). Для шарикоподшипниковых сталей пластичность практически не зависит от температуры (3). Отдельные сплавы могут иметь интервал повышенной пластичности (4). Техническое железо в интервале 800...1000 °С характеризуется понижением пластических свойств (5). При температурах, близких к температуре плавления пластичность резко снижается из-за возможного перегрева и пережога.

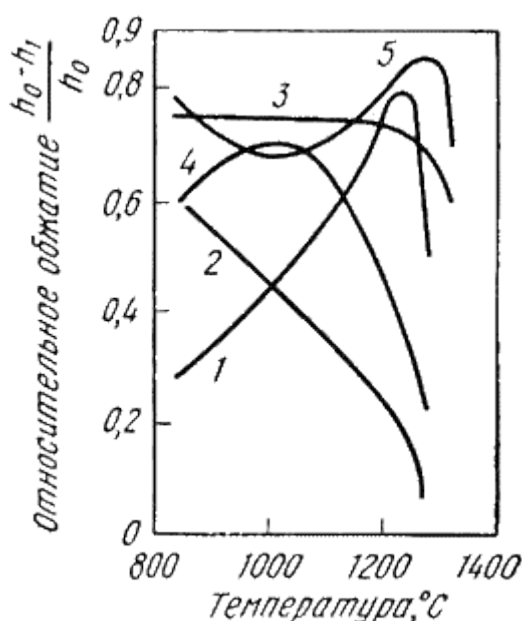


Рис. 12.1 Влияние температуры на пластичность сталей

Для углеродистых сталей в интервале температур 100–300°С, называемом *зоной синеломкости*, пластичность несколько уменьшается, а прочность возрастает. Это явление объясняется выпадением мельчайших частиц карбидов по плоскостям скольжения при деформации. Пластичность также несколько снижается в области фазовых превращений.

Резкое снижение пластичности при высоких температурах связано с чрезмерным ростом зерен. Это явление называется *перегревом*. Структуру перегретой стали в большинстве случаев можно исправить отжигом. При нагреве стали до температуры, близкой к температуре плавления, происходит образование оксидов по границам зерен и расплавление легкоплавких межзеренных прослоек, что приводит к появлению трещин и потере пластичности. Это явление называется *пережогом*. Оно не устраняется

термической обработкой, и пережженный металл отправляется на переплавку.

Влияние скорости деформации.

Скорость деформации – это изменение степени деформации ε в единицу времени $\frac{d\varepsilon}{dt}$. В общем случае с увеличением скорости деформации пластичность падает. Особенно резко уменьшается пластичность некоторых высоколегированных сталей, магниевых и медных сплавов. Это можно объяснить при обработке нагретого металла влиянием двух противоположных процессов: упрочнения при деформации и разупрочнения вследствие рекристаллизации. При больших скоростях деформации разупрочнение может отставать от упрочнения. Однако при очень больших скоростях деформации пластичность металла вновь возрастает (штамповка взрывом, на высокоскоростных молотах). Это объясняется тем, что теплота, в которую переходит работа деформации, не успевает рассеяться и приводит к разогреву деформируемого металла, и как следствие, к повышению пластичности.

Влияние напряженного состояния.

Схема главных напряжений позволяет судить о пластичности металла. Чем большую роль играют напряжения сжатия, тем выше пластичность металла в процессе его обработки. Поэтому, например, пластичность металла при прессовании выше, чем при волочении. Повысить сжимающие напряжения при обработке давлением можно, оказывая боковое давление на металл жесткими стенками инструмента.

Схема главных деформаций дает представление о характере формирования волокна и зерен. Максимальная главная деформация определяет текстуру деформации, предопределяет физико-механические свойства металла при обработке давлением.

12.2 Методы оценки пластичности

Для определения пластичности металлов и сплавов широко применяется стандартное испытание на растяжение по ГОСТ 1497-84 (рис. 12.2), в процессе которого образец деформируется плавно возрастающей нагрузкой до разрыва. При этом, образец удлиняется, а его поперечное сечение уменьшается.

Пластичность характеризуется:

- относительным удлинением:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100\% , \quad (48)$$

- относительным сужением:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100\% \quad (49)$$

где l_0 и l_k – начальная и конечная длина образца;
 F_0 – начальная площадь поперечного сечения образца;
 F_k – площадь поперечного сечения в месте разрыва.

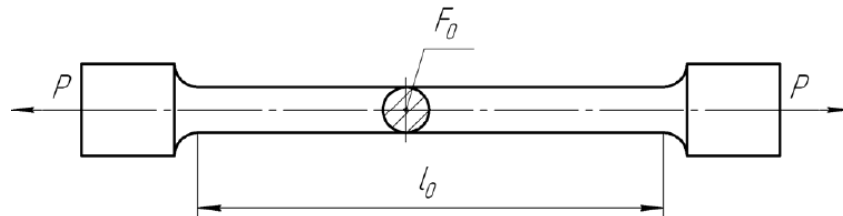


Рис. 12.2. Схема испытания на растяжение

Стандартные показатели пластичности δ и ψ не учитывают реальные условия (схему напряженного состояния, температурно-скоростные факторы), при которых происходит пластическая деформация при различных видах и операциях обработки давлением. Для большей достоверности при оценке пластичности применяют технологические пробы, моделирующие условия деформации при конкретных процессах обработки давлением. Рассмотрим некоторые из них:

1. Проба на осадку. Применяется для определения способности металла в холодном состоянии принимать заданную по размерам и форме деформацию сжатия.

Испытаниям подвергают образцы, вырезанные из прутков, предназначенных для изготовления болтов, заклепок и т.п. Испытания проводят до появления трещины на боковой поверхности. Показатель пластичности (степень осадки): $\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$.

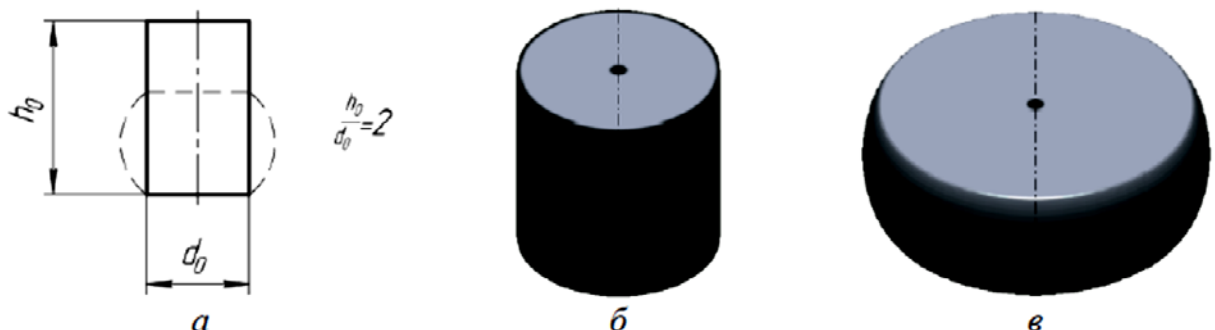


Рис. 12.3. Проба на осадку: а – схема испытания; б – образец до испытания; в – образец после испытания

2. Проба на расплющивание по ГОСТ 8818-73. Испытание заключается в расплющивании образца вдоль его оси в холодном или горячем состоянии до образования головки заклепки или расплющивании головки заклепки.

Изделия считаются годными, если на поверхности образцов, подвергнутых испытанию, не наблюдается трещин и надрывов.

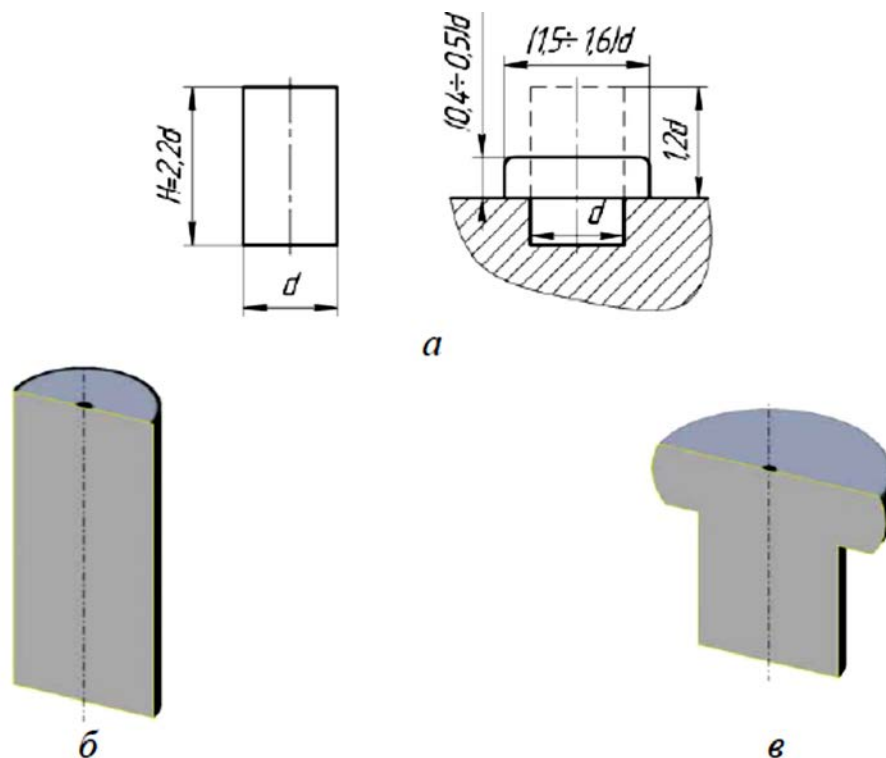


Рис. 12.4. Проба на расплющивание: а – схема испытания; б – образец до испытания; в – образец после испытания

3. Испытание на выдавливание по ГОСТ 10510-80 (Проба Эриксона). Применяется для определения способности листового металла подвергаться холодной штамповке. Испытания проводят до появления 1-ой трещины в металле. Показатель пластичности – глубина лунки.

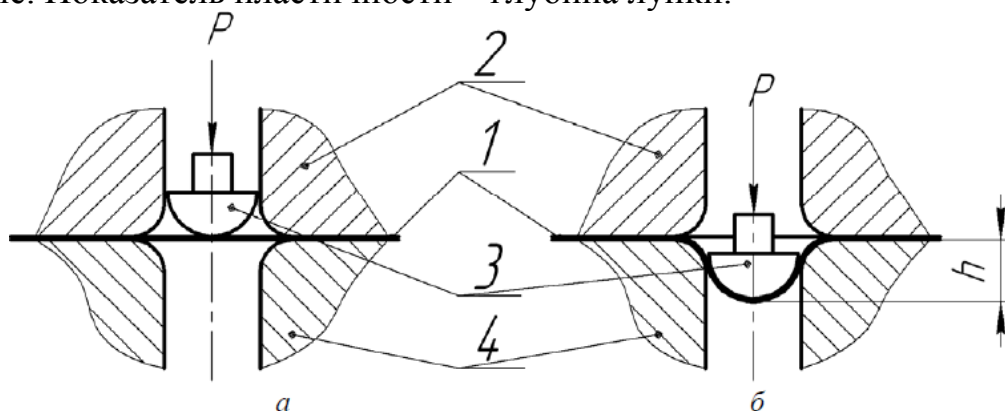


Рис. 12.5. Схема испытания на выдавливание:
1 – образец; 2 – матрица; 3 – прижимное кольцо; 4 - пуансон

4. Проба на изгиб. Служит для определения способности листового металла принимать заданный по размерам и форме изгиб. Для осуществления пробы на изгиб применяют прессы или тиски.

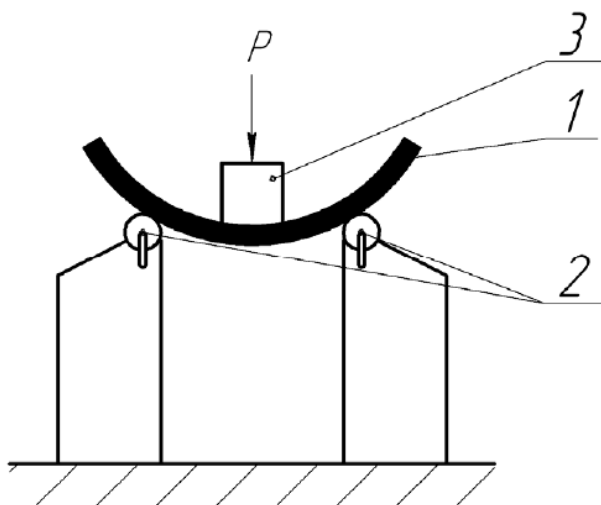


Рис. 12.6. Проба на изгиб: 1 – образец; 2 – валки; 3 – пуансон

5. Испытание на перегиб листового металла и проволоки. Применяется для определения способности металла выдерживать повторный загиб и разгиб. Скорость испытания – 60 перегибов в минуту до разрушения образца.

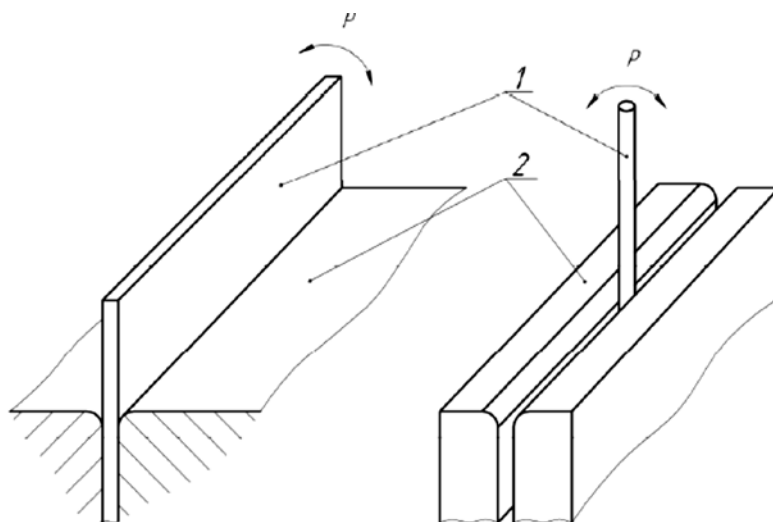


Рис. 12.7. Схема испытания на перегиб: 1 – образец; 2 – валки

Технологические пробы позволяют отобрать материал, наиболее полно отвечающий заданным технологическим условиям обработки. Если после испытания на поверхности образца отсутствуют внешние дефекты в виде трещин, надрывов, расслоений и т.д., то материал считается выдержавшим испытание. Показатель пластичности – число перегибов до разрушения.

13 СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПЛАСТИЧЕСКОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ

Под сопротивлением деформации материала следует понимать интенсивность напряжений, отвечающих данным условиям его деформирования.

На сопротивление деформации металлов и сплавов оказывают влияние исходная структура, а также характер развития деформации во времени (т.е. предыстория нагружения), но наиболее сильное влияние оказывают термомеханические параметры: степень, скорость и температура деформации. Эта зависимость в силу разных причин, различается не только количественно, но и качественно для разных металлов и особенно сплавов. Эти параметры в процессах горячей ОМД варьируются в широких пределах, поэтому их влияние на сопротивление деформации для расчета усилий в этих процессах исследовалось в первую очередь.

Вопросам экспериментального исследования сопротивления деформации различных металлов и сплавов посвящено значительное число работ, но основная их часть посвящена сплавам на основе железа, а цветные металлы и сплавы исследованы значительно меньше, хотя их число значительно и поведение при пластическом деформировании отличается большим разнообразием.

Принципиально сопротивление деформации для изотропных поликристаллических тел можно определить при любой схеме напряженного состояния. Однако при сложных схемах напряженного состояния узнать экспериментально все компоненты тензора напряжений, необходимые для подсчета сопротивления деформации, согласно выражению

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 - (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}, \text{ практически невозможно.}$$

В связи с этим стремятся определять сопротивление деформации при простейших схемах напряженного состояния, в которых имеется только одна составляющая напряжений (нормальная или касательная).

Согласно данному уравнению, в этом случае сопротивление деформации численно равно (или пропорционально) этой единственной компоненте напряжений. К таким схемам относятся линейное растяжение, линейное сжатие и чистый сдвиг.

Схема чистого (линейного) растяжения хорошо реализуется при растяжении достаточно длинных образцов ($\ell_0 > 5d_0$) до момента образования шейки. После образования шейки, с одной стороны, нарушается равномерность распределения деформаций и напряжений в образце (деформация локализуется практически полностью в шейке), с другой стороны, в шейке возникает схема трехстороннего неравномерного растяжения. Обычно образование шейки начинается при деформациях, не превышающих 18-20%, что является существенным недостатком метода растяжения.

Схема чистого сжатия отвечает осадке достаточно высоких образцов. Однако при отношениях $h/d > 20$ осадка практически невозможна из-за продольной устойчивости таких образцов, при малых же отношениях начинают сказываться подпирающие силы и силы контактного трения, приводящие к неравномерной деформации (бочкообразованию) и нарушающие схему линейного сжатия. Исходя из этих соображений и учитывая, что отношение h/d в процессе осадки изменяется (уменьшается), его ограничивают пределами от 1,25-1,5 до 0,6-0,8, причем верхние значения относятся к исходному состоянию образцов, нижние – к конечному. В этом случае влиянием подпирающих сил, а также трением и бочкообразованием, как правило, пренебрегают, считая напряженное состояние в образце равномерным и линейным. Тогда сопротивление деформированию при данной степени, скорости и температуре деформации равно среднему контактному напряжению.

Схема чистого сдвига реализуется при испытаниях на кручение достаточно длинных образцов. Для обеспечения равномерного распределения напряжений по сечению образцы рекомендуется делать полыми с возможно более тонкой стенкой. Из-за трудности использования результатов испытаний на кручение для пересчета в другие схемы деформированного состояния и в связи с другими недостатками (нарушение схемы чистого сдвига при больших пластических деформациях вследствие скручивания образцов, невозможность получения больших скоростей деформации на существующих установках и др.) данный метод не нашел широкого распространения.

Кроме того применяют методы экспериментального определения сопротивления деформации при некоторых сложных схемах напряженного состояния. К ним следует отнести метод базисных давлений. Суть метода состоит в том, что экспериментально определяется один из компонентов тензора напряжений, а именно, среднее контактное напряжение при некоторых эталонных условиях, обеспечивающих постоянное соотношение всех компонентов тензоров напряжений и деформаций в деформируемом объеме. Такими эталонными условиями являются $l/h_{cp} \approx 1,0$ и $b_0/h_0 \geq 4,0$, что отвечает условиям плоской деформации, минимальному влиянию внешних зон и контактного трения и равномерному распределению напряжений и деформаций по высоте очага деформации. Характеристикой сопротивления деформации в этом случае служит среднее давление. Недостатком такого метода является непригодность этой характеристики для расчета усилий при других процессах. Это связано со спецификой процесса прокатки – характер распределения напряжений, деформаций и скоростей в деформируемом объеме определяется формой инструмента и образца, условиями трения, влиянием внешних зон и т. д.

Иногда сопротивление деформации методом прокатки определяют не при эталонных, а при произвольных условиях, например путем замера усилий на промышленных прокатных станах и пересчета средних контактных напряжений в истинное сопротивление деформации с помощью

коэффициентов подпора. В связи с относительно низкой точностью определения этих коэффициентов для разных схем нагружения использование таких данных ограничено только процессами прокатки.

На практике для определения сопротивления деформации используют все перечисленные методы. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки и применяется в зависимости от поставленной задачи и наличия необходимого оборудования.

Наибольшее распространение при исследовании сопротивления деформации в широком диапазоне варьирования термомеханических параметров получили благодаря простоте и доступности методы испытания на растяжение и сжатие, которые принципиально являются равнозначными. Преимуществом испытаний на растяжение и сжатие является также возможность получения кривой упрочнения всего на одном образце.

Часто за характеристику сопротивления деформации принимают предел текучести σ_T или прочности σ_B при растяжении. Ясно, что эти величины характеризуют сопротивление деформации лишь при частных значениях деформации; первая отвечает началу пластического течения, вторая – началу образования шейки. Предел прочности, кроме того, будучи отнесенным к исходной площади сечения образца, является величиной условной.

Метод термомеханических коэффициентов, предложенный В.И. Зюзиным для определения: сопротивления деформации различных металлов и сплавов при горячей прокатке, подробно рассмотрен во многих работах.

Этот метод дает возможность расчленить многозначную функциональную зависимость сопротивления деформации $\sigma(t, \varepsilon, u)$ на ряд зависимостей между тремя переменными: $k_t(t)$, $k_\varepsilon(\varepsilon)$ и $k_u(u)$, представляющими собой отношения:

$$k_t = \frac{\sigma_{ti}}{\sigma_{o.d.}} ; k_\varepsilon = \frac{\sigma_{ei}}{\sigma_{o.d.}} ; k_u = \frac{\sigma_{ui}}{\sigma_{o.d.}}, \quad (50)$$

где k_t , k_ε , k_u – соответственно температурный, степенной и скоростной коэффициенты;

σ_{ti} , σ_{ei} , σ_{ui} – соответственно функции сопротивления деформации в зависимости от температуры, степени и скорости деформации;

$\sigma_{o.d.}$ – среднее или базисное значение σ , принятое условно при постоянных значениях термомеханических параметров (например, при $t = 1000^\circ\text{C}$, $u = 10 \text{ с}^{-1}$, $\varepsilon = 0,1$).

Расчетное значение сопротивления деформации σ (в кгс/мм²), в зависимости от различных значений температуры, степени и скорости деформации определяется по формуле $\sigma = \sigma_{o.d.} k_t k_\varepsilon k_u$. В дальнейшем необходимо вспомнить, что 1Н=9,80665 кгс.

Полученное значение сопротивления деформации можно использовать для определения усилия деформирования и других энергосиловых параметров процессов.

14 ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЯ

Простое разрушение — это разделение тела на две или более частей, происходящее при приложении статического (т.е. постоянного или медленно изменяющегося во времени) напряжения при температуре, сравнительно низкой по сравнению с температурой плавления материала. При этом приложенные напряжения могут быть растягивающими, сжимающими или сдвиговыми.

Разрушение конструкционных материалов может происходить по одному из двух путей: оно может быть пластичным или хрупким. Эта классификация основана на том, могут ли в материале создаваться пластические деформации. Для пластических материалов характерны большие пластические деформации, т.е. материалы поглощают большую энергию деформирования до наступления разрушения. При хрупком разрушении, напротив, пластические деформации либо отсутствуют, либо они очень малы и поглощения энергии до разрушения не происходит.

Любой процесс разрушения происходит в два этапа: вначале образуется трещина, и затем она распространяется. Характер разрушения в очень сильной степени зависит от механизма распространения трещины. Для пластичных материалов характерно то, что впереди растущей трещины и вокруг нее развивается область пластических деформаций. При этом процесс распространения трещины происходит относительно медленно. Такие трещины часто характеризуют термином «стабильные». В этом случае материал сопротивляется дальнейшему развитию трещины, если только напряжение не увеличивается. Кроме того, визуально наблюдаются крупномасштабные деформации на поверхности разрушения в виде полос кручения и раздира. В случае же хрупкого разрушения, напротив, трещина распространяется очень быстро без каких-либо заметных пластических деформаций. Трещину в этом случае характеризуют как неустойчивую, а развитие трещины после того, как она возникла, происходит самопроизвольно без увеличения приложенного напряжения.

14.1 Виды разрушения

Пластичное разрушение.

Характер поверхности, по которой произошло пластическое разрушение, имеет свои особенности как на макро-, так и на микроуровне. Все очень пластичные материалы, например, чистое золото или свинец при

комнатной температуре, а также другие металлы, полимеры и неорганические стекла при повышенных температурах при наступлении разрыва образуют суживающуюся шейку, так что уменьшение площади поперечного сечения составляет практически 100%.

При разрушении пластичных металлов образуется лишь умеренно суживающаяся шейка. При этом процесс разрушения обычно осуществляется в несколько стадий. Вначале после того, как появляется шейка, возникают небольшие каверны, или микропустоты внутри поперечного сечения. Затем, по мере развития деформаций, эти микропустоты увеличиваются и сливаются друг с другом так, что образуется эллиптическая трещина с длинной осью, ориентированной перпендикулярно направлению действия напряжения. Трещина продолжает расти в направлении, параллельном своей главной оси путем коалесценции микропустот. И на конечной стадии наступает разрушение вследствие быстрого распространения трещины вокруг наружного периметра шейки путем сдвиговых деформаций, происходящих под углом 45° по направлению к оси растяжения. Это тот угол, под которым касательные напряжения максимальны.

Хрупкое разрушение.

Хрупкое разрушение происходит в отсутствие заметных деформаций путем быстрого распространения трещины. Направление развития трещины почти строго перпендикулярно направлению приложения нагрузки, а поверхность разрыва в этом случае получается сравнительно гладкой.

Характер поверхности разрыва, образующийся при хрупком разрушении, весьма специфичен именно для этого вида разрушения. При этом какие-либо заметные следы пластических деформаций отсутствуют. Так, например, при разрушении образцов из некоторых сталей вблизи центра сечения, по которому произошел разрыв, заметна серия V-образных меток, которые направлены к месту зарождения трещины. Лишь при хрупком разрушении на поверхности разрыва образуются гребни, которые расходятся от места зарождения трещины подобно вееру. Довольно часто оба этих типа отметин бывает сложно обнаружить невооруженным глазом. При разрушении очень жестких мелкозернистых металлов вообще отсутствует сколько-нибудь различимая картина излома. Поверхности разрушения аморфных материалов, таких как керамические стекла, выглядят блестящими и гладкими.

Для большинства хрупких кристаллических материалов распространение трещины происходит путем последовательного и повторяющегося разрыва атомных связей вдоль определенных кристаллографических плоскостей. Такой процесс называется расщеплением («cleavage»). О разрушении такого типа говорят как о трансзернистом (или транскристаллитном), поскольку в этом случае трещина проходит через зерна. На макроскопическом уровне поверхность разрушения может иметь зернистую или фасеточную текстуру.

При разрушении некоторых сплавов трещина походит по границам зерен. Такой тип разрушения называют межзернистым. Разрушение

описанного типа может происходить как следствие процессов, приводящих к ослаблению или устранению хрупкости в областях между зёрнами.

14.2 Влияние различных факторов на характер разрушения

На характер разрушения металла (вязкий или хрупкий) влияют химический состав, тип кристаллической решетки, фазовый состав и размер структурных составляющих, а также условия нагружения. В зависимости от условий нагружения различают усталостное разрушение (которое в свою очередь подразделяют на собственно усталостное, малоцикловое, термически усталостное разрушение и т. д.); разрушение при ползучести; динамическое разрушение; разрушение при статической кратковременной, статической длительной и статически повторной нагрузках и т. п. Количественно условия нагружения характеризуются скоростью приложения и величиной внешней нагрузки, накопленной потенциальной энергией, температурой, химическим составом и динамическими характеристиками газовой или жидкой внешней среды, характеристиками радиационного облучения и т. п.

15 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Усилия, напряжения и деформации при обработке давлением в ряде случаев могут быть определены экспериментально в производственных условиях при изготовлении изделий и полуфабрикатов на промышленных агрегатах. Однако постановка этих экспериментов часто сопряжена с большими затратами материалов и простоями оборудования. Некоторые вопросы экспериментально вообще невозможно изучить в производственных условиях, например распределение напряжений по объему тела. При разработке принципиально новых технологических процессов обработки давлением также невозможна постановка экспериментов в производственных условиях.

Поэтому обычно тот или иной вопрос предварительно экспериментально исследуется в лабораторных условиях на образцах (моделях) в широком диапазоне изменения различных факторов. Полученные в лабораторных условиях данные пересчитывают с модели на натуру. Затем в производственных условиях проводят поверочные эксперименты в ограниченном числе. Такой путь экспериментального исследования применяют не только при определении усилий, напряжений и формоизменения, но и при исследовании влияния условий деформации на изменение свойств и структуры металла. Последнее особенно важно при разработке технологических процессов обработки давлением новых сплавов. Для того чтобы закономерности и количественные данные, полученные в

лабораторных условиях, можно было бы распространить на производственные условия, необходимо соблюдать подобие обоих процессов. Кирпичев В. Л. в 1874 г. сформулировал закон подобия для упругой деформации металлов. Согласно этому закону, работы деформации геометрически подобных тел, изготовленных из одного и того же материала, пропорциональны объемам, а усилия пропорциональны сходственным площадям; при этом удельные усилия равны. Ф. Кик в 1879 г. предложил распространить этот закон и на пластическую деформацию. Однако в условиях пластической деформации, особенно при высоких температурах, закон подобия Кирпичева Кика нельзя применить безоговорочно из-за невозможности обеспечения полного подобия процессов. Согласно закону подобия деформируемые тела должны быть геометрически подобны и физически одинаковы.

1. Геометрическое подобие будет соблюдено, если отношения сходственных линейных размеров (длина l , ширина b , высота h) модели (с индексом «м») и натуры (с индексом «н») будут одинаковы:

$$\frac{l_i}{l_n} = \frac{b_i}{b_n} = \frac{h_i}{h_n} = n, \quad (51)$$

где n — масштаб моделирования.

Соответственно, отношения сходственных площадей будут пропорциональны квадрату масштаба моделирования, а отношения объемов — кубу.

Для соблюдения геометрического подобия в процессе деформации необходимо, чтобы степени деформации модели и натуры были равны:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n. \quad (52)$$

Инструменты для деформирования модели и натуры должны быть также геометрически подобны и отношение их линейных размеров должно быть равно масштабу моделирования.

2. Для соблюдения условий физического подобия необходимо, чтобы физические свойства модели и натуры (химический состав, фазовое состояние, микро- и макроструктура) в исходном состоянии, и в каждый момент деформации были одинаковыми. Должны быть равны и коэффициенты трения на контактных поверхностях. При упругой деформации эти усилия выполняются. При горячей деформации это сделать почти невозможно. Для обеспечения одинаковой температуры модели и натуры в процессе деформации при одинаковой исходной необходимо скорость деформирования модели увеличить в n раз, так как модель охлаждается быстрее вследствие большего в n раз отношения поверхности к объему. Следовательно, для соблюдения теплового подобия (равенства температур) необходимо, чтобы

$$v_i = n \cdot v_n.$$

Тогда отношение скоростей деформации модели и натуры будет равно квадрату масштаба моделирования:

$$\frac{\omega_i}{\omega_i} = \frac{\omega_i \cdot h_i}{\omega_i \cdot h_i} = n^2; \quad (53)$$

$$\omega_i = n^2 \omega_i.$$

Продолжительность деформирования модели τ_m должна быть в n^2 раз меньше продолжительности деформирования натуры:

$$\tau_i = \frac{\Delta h_i}{\omega_i} = \frac{\Delta h_i}{n n \omega_i} = \frac{\tau_i}{n^2}. \quad (54)$$

Для соблюдения одинаковых условий трения, помимо одинаковых материалов инструмента» качества обработки его поверхности, смазки и температуры, необходимо обеспечить одинаковую скорость скольжения металла по инструменту. Последнее возможно только при одинаковых скоростях деформирования модели и натуры: $\omega_i = \omega_i$. Скорость деформации модели должна быть в n раз больше скорости деформации натуры: $\omega_i = n \omega_i$. Продолжительность деформации модели $\tau_i = \tau_i n$.

Для соблюдения одинаковых условий протекания процессов упрочнения и разупрочнения при одинаковых степенях деформации, необходима одинаковая скорость деформации: $\omega_i = \omega_i$. Тогда скорость деформирования модели должна быть в n раз меньше скорости деформирования натуры: $\omega_i = \omega_i / n$. Продолжительность деформирования натуры и модели должна быть одинакова: $\tau_i = \tau_i$. То есть, для обеспечения подобия теплового, по условиям трения и по условиям упрочнения и разупрочнения необходимо различное отношение скоростей деформирования модели и натуры. Следовательно, единый скоростной критерий подобия при горячей обработке металлов давлением отсутствует. При холодной обработке давлением ввиду незначительного изменения температуры металла из-за выхода тепла и незначительного влияния скорости деформации на сопротивление деформации моделирование осуществляется с достаточной для практики точностью. Необходимость лабораторных исследований процессов горячей обработки металлов давлением привела к разработке методов приближенного моделирования этих процессов. Применяет «коэффициенты несоответствия», характеризующие отличия действительных условий эксперимента от условий подобия. Они могут быть определены опытным путем.

Для решения каких-то производственных задач с привлечением вычислительной техники прибегают к математическому моделированию процесса.

1 этап. Разработка механического задания.

2 этап. Составление математического описания – модели объекта системы контроля управления объекта; На стадии математического

моделирования широко используются математические методы: дифференциальные, интегральные и алгебраические уравнения и системы уравнений; статическую динамику; теории; анализ.

3 этап. Алгоритмизация решаемой задачи. Получают дополнительное представление о том, как, в какой последовательности и в результате какого числа операций можно получить решение задачи, поставленной технологическим заданием.

4 этап. Лабораторные испытания аппарата на цифровой динамической модели объекта. На стадии лабораторного проектирования к работе желательно привлекать производственный персонал тех цехов, где это будет использоваться. Примеры использования ЭВМ и систем: нагрев металла в нагревательных колодцах, методических печах, учёт прокатываемого металла, взвешивание, регулирование натяжения и т.д.

16 ТЕОРИЯ ПРОКАТКИ

16.1 Определение процесса прокатки. Продольная прокатка

Прокаткой называется процесс деформации металла путем обжатия исходной заготовки между вращающимися валками с целью уменьшения поперечного сечения заготовки и придания ей заданной формы.

Прокатка – это один из наиболее распространенных видов обработки металлов давлением, которому подвергается приблизительно 80% выплавляемого металла. Широкое применение прокатки объясняется рядом ее преимуществ по сравнению с другими видами обработки давлением (прессованием, волочением), а также высокой производительностью этого процесса и меньшей стоимостью получаемых изделий.

Прокатка является эффективным инструментом для формирования структуры, обеспечивающей повышение эксплуатационных свойств изделий. Поэтому существует много схем термомеханической обработки, включающих прокатку.

В настоящее время широко внедряется совмещение обработки давлением с литейным производством. Примером может служить высокопроизводительный способ непрерывного литья и прокатки стали и сплавов.

Знание основ прокатки позволяет экономистам, специализирующимся в металлургии, активно влиять на технологический процесс прокатки с целью повышения технико-экономических показателей работы прокатных цехов.

Различают три основных вида прокатки: продольная, поперечная и поперечно-винтовая (косая). При продольной прокатке (рис. 16.1), являющейся наиболее распространенной, заготовка 2 деформируется между вращающимися в разные стороны валками 1, зазор между которыми меньше, чем исходная толщина заготовки. Процесс прокатки считают простым, или

симметричным, если его осуществляют в гладких некалиброванных валках с параллельными осями, расположенными в одной плоскости. Оба валка являются приводными, имеют равные диаметры и вращаются в разные стороны с одной окружной скоростью.

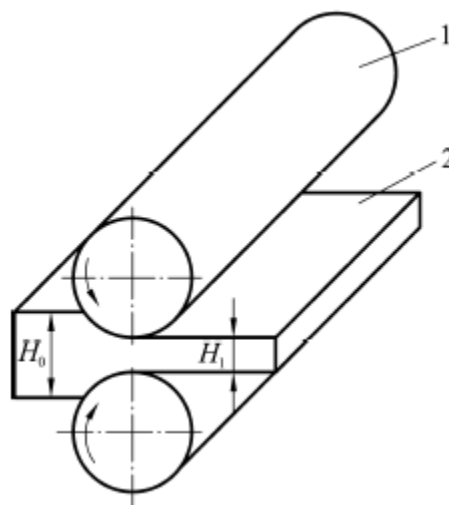


Рис. 16.1. Схема процесса продольной прокатки

Состояние поверхности обоих валков одинаковое, т.е. одинаковы коэффициенты и силы трения на них. Наконец, предполагается, что прокатке подвергают полосу прямоугольного сечения с однородными физико-механическими свойствами по всему объему и на нее действуют силы только со стороны валков.

16.2 Геометрия очага деформации при прокатке

При продольной прокатке одновременно пластической деформации подвергается не весь объем обрабатываемого металла, а только его небольшая часть, находящаяся вблизи валков. Поэтому объем прокатываемого металла, заключенный между плоскостью входа AA1 металла в валки и плоскостью выхода BB1 металла из валков, называется геометрическим очагом деформации (рис. 16.2). Дуга АВ, по которой деформируемый металл контактирует с валками, называется дугой захвата, а центральный угол α , соответствующий дуге захвата, — углом захвата. Проекция очага деформации на горизонтальную ось — это длина очага деформации l .

При прокатке исходная полоса толщиной H_0 обжимается валками до толщины H_1 на величину абсолютного обжатия:

$$\Delta H = H_0 - H_1. \quad (55)$$

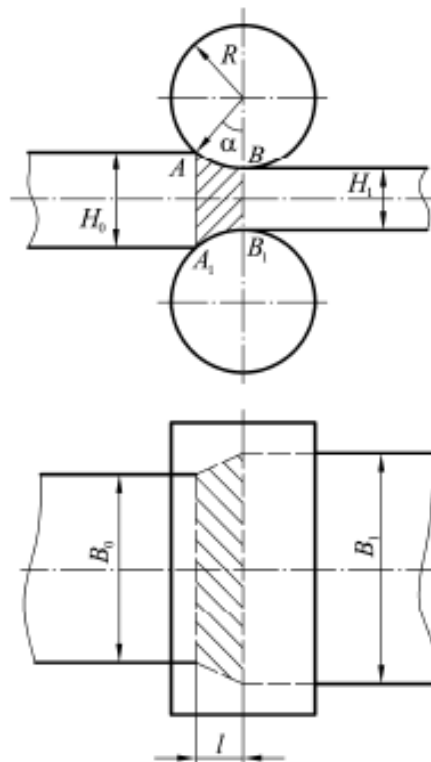


Рис. 16.2. Геометрия очага деформации при прокатке

Поскольку действует условие несжимаемости металла, происходит увеличение длины и ширины полосы. Таким образом, форму геометрического очага деформации при прокатке характеризуют углом захвата α , высотами сечения H_0 и H_1 , длиной очага деформации l , а также начальной и конечной шириной полосы B_0 и B_1 . Для нахождения α и l используют формулы:

$$\cos \alpha = 1 - \frac{\Delta H}{D}, \quad (56)$$

$$l \approx \sqrt{R \Delta H}, \quad (57)$$

где R , D – соответственно, радиус и диаметр валков.

16.3 Условие захвата металла валками

Захват металла вращающимися валками, сопровождающийся изменением размеров прокатываемой полосы, обеспечивается наличием контактного трения между полосой и рабочей поверхностью валков. Условие захвата металла валками обычно рассматривают для двух периодов прокатки: неустановившегося и установившегося. Первый период включает захват полосы валками (или принудительную подачу ее в щель между валками) и заполнение области деформирования до момента образования некоторой длины переднего конца полосы за пределами области деформирования. По

мере заполнения щели между валками условия деформирования металла непрерывно изменяются, что дало основание назвать данный период прокатки неустановившимся. Рассмотрим подробнее этот период (рис. 16.3).

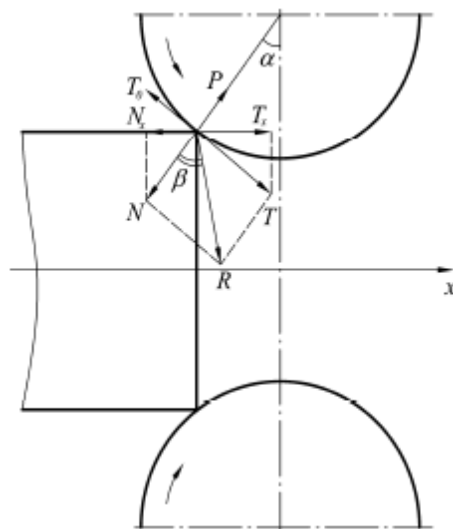


Рис. 16.3. Схема неустановившегося периода прокатки

При соприкосновении полосы с вращающимися валками между ними возникает взаимодействие. Валки действуют на полосу нормальной силой N , стремясь оттолкнуть металл, и силой трения T , втягивающей его в зазор между валками. В свою очередь, полоса давит на валки силой P и тормозит их вращение силой T_0 . Для определения захватывающей способности валков сопоставляют действие сил N и T в направлении прокатки, т.е. сравнивают горизонтальные проекции этих сил:

$$T_x = T \cdot \cos \alpha; \quad (58)$$

$$N_x = N \cdot \sin \alpha. \quad (59)$$

При этом возможны три случая. При $T_x > N_x$ будет происходить захват; при $T_x = N_x$ наблюдается состояние равновесия, т.е. валки будут вращаться, а полоса останется неподвижной (валки «буксуют» по полосе). Наконец, если $T_x < N_x$, то полоса отбрасывается от валков. С учетом выражений условие захвата можно записать следующим образом:

$$\frac{T \cdot \cos \alpha}{N \cdot \sin \alpha} > 1. \quad (60)$$

Если принять, что трение в рассматриваемом случае подчиняется закону Амонтона-Кулона, т.е.

$$T = \mu \cdot N, \quad (61)$$

где μ – коэффициент трения, то будет справедливой запись: $\mu > \operatorname{tg} \alpha$.

Так как при малых углах $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$, то условие захвата можно преобразовать так:

$$\mu > \alpha. \quad (62)$$

Если взять равнодействующую сил T и N , обозначив ее через R (рис. 16.3), то условие захвата примет вид:

$$\beta > \alpha, \quad (63)$$

где β – угол трения, образуемый силами N и R .

Второй период прокатки начинается с момента выхода переднего конца полосы через сечение выхода, а заканчивается при достижении задним концом сечения выхода. На протяжении всего времени протекания второго периода параметры очага деформации остаются неизменными, поэтому второй период процесса прокатки называют установившимся. Если принять, что в установившемся периоде прокатки нормальные контактные напряжения распределены по длине области деформирования равномерно, то результирующая сила действия валков на металл будет проходить через середину дуги захвата (рис. 16.4).

Повторяя предыдущие рассуждения, получим условие захват для установившегося периода прокатки:

$$\beta > \alpha/2. \quad (64)$$

Сравнивая выражения, можно заключить, что в установившемся периоде прокатки захват металла валками, по сравнению с неустановившимся периодом, облегчен вдвое.

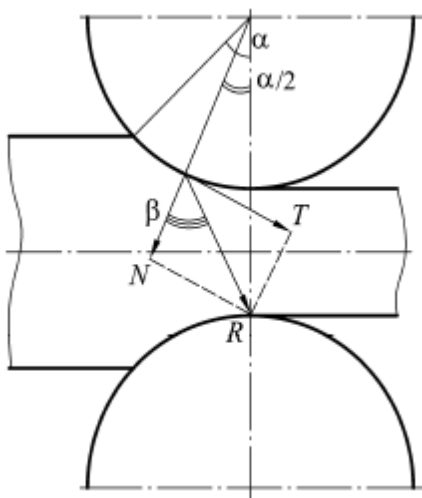


Рис. 16.4. Схема установившегося периода прокатки

Обычно чем больше угол захвата, тем больший объем металла деформируется за один проход и тем выше производительность процесса прокатки. Улучшению захвата металла валками способствуют следующие факторы: повышение коэффициента трения, например, нанесением насечек на валках; снижение величины обжатия; увеличение диаметра валков при данном обжатии; использование вталкивающей силы, направленной на заготовку вдоль оси; устройство заходного клина (фрезерование переднего конца заготовки под углом) и т.д.

Необходимо отметить, что хотя использование смазки затрудняет захват металла, холодную прокатку листов обычно ведут со смазкой для получения высокого качества их поверхности. Углы захвата при холодной прокатке со смазкой составляют $3-4^\circ$, без смазки – $5-8^\circ$. При горячей прокатке на обжимных станах (блуждающих и слябингах) $\alpha = 18-34^\circ$.

16.4 Опережение и уширение

Установлено, что скорость выхода заготовки из валков V_h всегда больше, а скорость входа заготовки в валки V_n меньше окружной скорости валков V_o . Это явление называется опережением S :

$$S = \frac{V_h - V_o}{V_o} \quad (65)$$

Опережение возрастает с увеличением обжатия, диаметра валков, коэффициента трения и переднего натяжения полосы. Так как при прокатке наблюдается опережение и отставание, следовательно, в очаге деформации есть сечение, в котором скорости движения заготовки и валков равны. Это сечение называют критическим, а центральный угол, соответствующий ему, называют критическим углом (рис. 16.5).



Рис. 16.5. Изменение скорости металла и валков в очаге деформации при прокатке

Очаг деформации от входного сечения до критического называют зоной отставания, а от критического сечения до выходного сечения – зоной опережения.

Уширение – это приращение при прокатке ширины прокатываемого изделия. Эта величина возрастает с увеличением обжатия, диаметра валков, коэффициента трения и числа проходов. При прокатке листов уширение мало, и в расчетах им пренебрегают. При прокатке сортового металла, имеющего близкие размеры по ширине и высоте, его необходимо учитывать, так как в противном случае может происходить незаполнение калибра либо заклинивание из-за его переполнения.

16.5 Виды продольной прокатки и получаемая продукция

16.5.1 Классификация основной продукции, получаемой продольной прокаткой

Продольной прокаткой получают длинномерные изделия с разнообразной формой поперечного сечения (рис. 16.6).

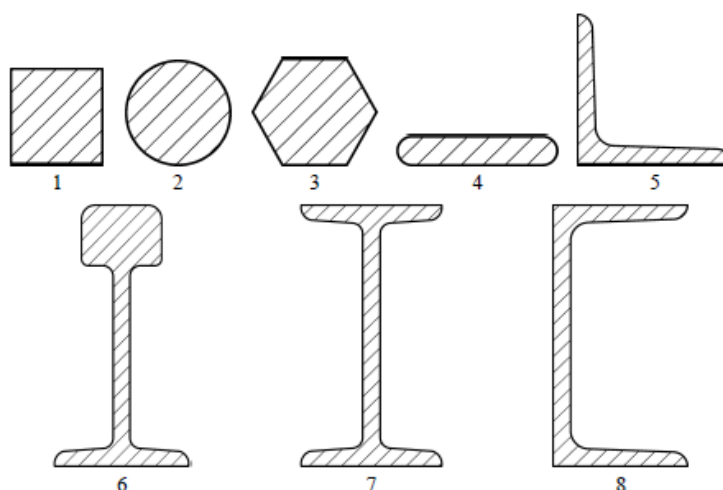


Рис. 16.6. Поперечные сечения некоторых видов проката:
1 – квадратное; 2 – круглое; 3 – шестигранное; 4 – плоское;
5 – угольник; 6 – рельс; 7 – двутавр; 8 – швеллер

Все эти изделия, перечень которых называется сортаментом, как правило, стандартизованы. Хотя сортамент прокатных изделий обширен, весь прокат можно разбить на четыре основных группы: сортовой, листовой, трубы, специальные виды проката (бандажи, колеса, периодические профили и пр.).

Наиболее разнообразной является группа сортового проката, который подразделяется на простые и фасонные профили. Прокат в виде круга,

квадрата, полос плоского сечения относится к простым профилям, а сложного поперечного сечения – к фасонным. В зависимости от назначения фасонные профили подразделяются на профили общего или массового потребления (угловой профиль, швеллеры, двутавровые балки, шестигранные профили и др.) и профили специального назначения (рельсы железнодорожные и трамвайные, профили сельскохозяйственного машиностроения, судостроения, электропромышленности и др.).

Весь сортовой прокат подразделяется на три группы: сталь крупносортовая, мелкосортовая и катанка диаметром от 5,5 до 9 мм. Для сортовой прокатки используют калиброванные валки, о конструкции которых будет сказано ниже.

Листовую прокатку проводят в гладких цилиндрических валках. В зависимости от способа производства и толщины листовой прокат подразделяют на три основные группы: горячекатаные тонкие листы толщиной 4 мм и более, горячекатаные тонкие листы толщиной менее 4 мм и холоднокатаные листы всех размеров. Листовой прокат из стали и цветных металлов используется в самых разнообразных отраслях промышленности. Поэтому листовую сталь часто подразделяют по назначению. Так, например, свариваемая корпусная сталь судостроения, горячекатаная толстолистовая конструкционная качественная углеродистая сталь толщиной от 4 до 14 мм и низколегированная сталь для котлостроения и сосудов, работающих под давлением, и др.

В соответствии с государственным стандартом трубы, изготавливаемые на прокатных станах, подразделяются на две группы: бесшовные и сварные (со швом). Помимо круглых труб, производят также профильные трубы и с переменными размерами сечения по длине.

16.5.2 Получение профилей переменного и периодического сечения

Разновидностью продольной прокатки является периодическая прокатка, которой получают профили переменного и периодического сечений. Использование таких профилей позволяет снизить массу деталей, элементов конструкций машин и механизмов. Периодические профили часто исключают необходимость проведения не только операций штамповки, но и сводят к минимуму обработку резанием. При использовании таких профилей в качестве заготовок для последующей штамповки поковок сложной формы обеспечивается заметная экономия металла (до 20–30 %), повышается производительность штамповки, снижается трудоемкость изготовления поковок и др.

Под профилями переменного сечения подразумевают полосы с плавно изменяющимся поперечным сечением. У периодических профилей изменение сечения по длине полосы периодически повторяется (рис. 16.7).

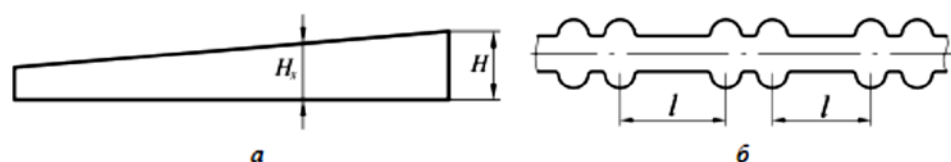


Рис. 16.7. Профили переменного (а) и периодического (б) сечения

Профили переменного сечения, например клиновидные, получают прокаткой в цилиндрических круглых валках как с изменяющимся межцентровым расстоянием A , так и с постоянным. В первом случае соответствующее изменение расстояния между осями валков приводит к изменению зазора между ними, определяющего толщину прокатанной полосы (рис. 16.8).

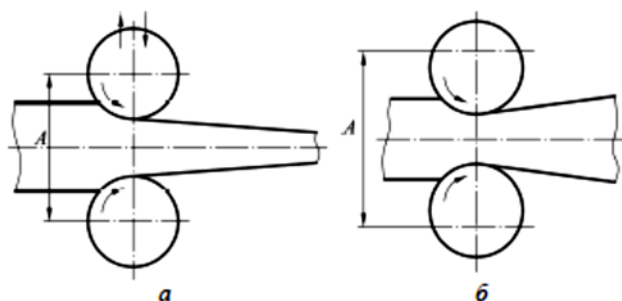


Рис. 16.8. Схема прокатки профилей переменного сечения с изменяющимся (а) и постоянным (б) межцентровым расстоянием A

Второй вариант процесса прокатки профилей переменного сечения реализуется при постоянном расстоянии между осями валков. Для облегчения изготовления валков и их замены часто используют бандажи или секторы (рис. 16.9).

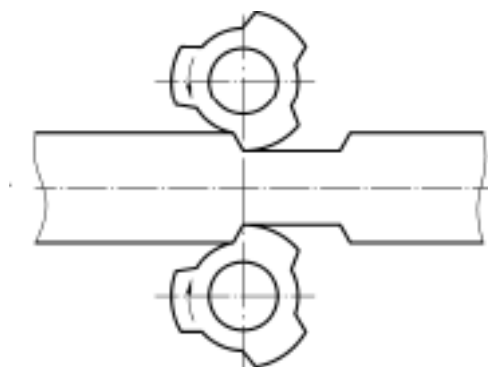


Рис. 16.9. Схема процесса прокатки профилей переменного сечения

Очень важен в производстве периодического проката правильный выбор механизма подачи полосы в валки в нужный момент прокатки. При случайной подаче металла в валки на концах каждой полосы появляются периоды неполной длины, что увеличивает потери металла при обрезке. Чтобы приблизить потери к оптимальному значению, необходимо осуществлять захват металла при положении валков, соответствующем началу периода. В тех случаях, когда период имеет большую протяженность, потери металла могут быть особенно велики.

16.6 Оборудование для прокатки

Прокатным станом называется комплекс машин и агрегатов, предназначенных для осуществления пластической деформации металла в валках (собственно прокатки), дальнейшей его переработки (правки, резки и пр.) и транспортирования.

В дальнейшем прокатным станом будем называть оборудование, предназначенное только для деформирования металла.

Прокатные станы классифицируются по трем основным признакам:

- по назначению или виду выпускаемой продукции;
- расположению валков в рабочей клетке;
- расположению рабочих клеток.

Классификация по назначению или виду выпускаемой продукции.

В соответствии с данной классификацией прокатные станы делятся на следующие группы:

- станы горячей прокатки (обжимные, заготовочные, рельсобалочные, крупносортовые, среднесортные, мелкосортные, проволочные, толстолистовые, среднелистовые, тонколистовые, широкополосные и штрипсовые, выпускающие штрипс-заготовку для труб в виде полосы шириной до 400 мм);
- станы холодной прокатки (листовые, жестепрокатные, станы для прокатки тонкой и тончайшей ленты);
- станы узкого назначения (колесопрокатные, бандажепрокатные, для прокатки полос и профилей переменного и периодического сечения и т.п.).

За основной параметр сортовых прокатных станов, характеризующий их размер, обычно принимают диаметр валков или шестерен шестеренной клетки. Если в стане несколько клеток, то параметром всего стана является размер валков или шестерен последней чистовой клетки, например, обозначение «блужинг 1300» указывает на то, что диаметр его валков составляет 1300 мм.

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

Например, обозначение «широкополосный стан 2500» указывает на то, что длина бочки валков равна 2500 мм, и на них (с учетом запаса) можно прокатывать листы и полосу шириной около 2300 мм.

Классификация по конструкции и расположению валков рабочей клетки.

Согласно данной классификации прокатные станы можно разделить на шесть групп (рис. 16.10): двухвалковые, трехвалковые, четырехвалковые, многовалковые, универсальные и клетки специальной конструкции.

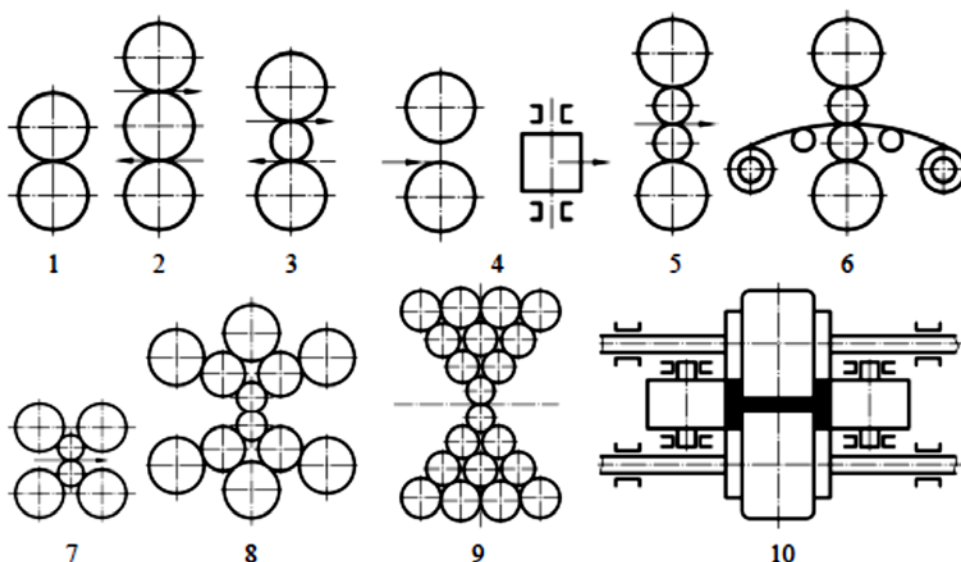


Рис. 16.10. Рабочие клетки с различным расположением валков:

1 – двухвалковая клетка; 2 – трехвалковая клетка сортовая; 3 – трехвалковая клетка Лаута листовая; 4 – универсальная двухвалковая клетка (слябинг); 5 – клетка четырехвалковая листовая нереверсивная; 6 – клетка четырехвалковая реверсивная для прокатки полосы в рулонах; 7 – клетка шестивалковая; 8 – клетка двенадцативалковая; 9 – клетка двадцативалковая для прокатки тонкой полосы; 10 – клетка универсальная для прокатки двутавровых балок с широкими параллельными полками

Двухвалковые клетки бывают нереверсивные и реверсивные. У первых оба вала приводные и имеют постоянное направление вращения. Обе клетки применяются в непрерывных станах, предназначенных, например, для прокатки заготовки, проволоки, тонких полос и т.д. В каждой клетке этих станов осуществляется только по одному пропуску металла в одном направлении.

Реверсивные клетки имеют два приводных вала с переменным направлением вращения, поэтому прокатываемый металл проходит через валки вперед и назад несколько раз. Клетки этого типа применяют в блюмингах, слябингах, толстолистовых станах и т.д.

Трехвалковые клетки – нереверсивные. Сортные клетки широко применяют, так как на их валках можно расположить больше калибров, чем на валках двухвалковых клеток. Металл движется в одну сторону между нижним и средним валками, а в обратную сторону – между средним и верхним.

Листовые трехвалковые клетки (клетки Лаута) применяют для прокатки толстых и средних листов в виде полос длиной 10–20 м. Средний валок неприводной и имеет меньший диаметр. При прокатке он прижимается то к верхнему, то к нижнему валкам и вращается ими за счет сил трения. Оба типа станов снабжаются подъемно-качающимися столами для подачи заготовок между разными парами валков.

В рабочей четырехвалковой клетки валки расположены один над другим: два рабочих валка меньшего диаметра (средние) и два опорных большего диаметра, назначение которых воспринимать давление при прокатке и уменьшать прогиб рабочих валков. Станы с такими клетями могут быть реверсивными и нереверсивными. Их используют при прокатке тонких и толстых листов и полос, броневых плит, а также рулонов.

Холодную прокатку рулонов ведут на непрерывных нереверсивных станах. В этом случае перед клетью устанавливают разматыватель рулонов, а позади моталку, создающую натяжение полосы и наматывающую ее на барабан. При холодной и горячей прокатке рулонов на одноклетевых реверсивных станах моталки устанавливают с обеих сторон клетки, и прокатка происходит то в одну, то в другую сторону. Иногда при горячей прокатке моталки устанавливают в печах перед клетью и позади нее.

Шестивалковые клетки с двумя рабочими и четырьмя опорными валками, ввиду жесткости самой рабочей клетки и меньшего прогиба опорных валков, служат для холодной прокатки тонких полос и узких лент в рулонах с точными допусками по толщине. Однако преимущества этого типа клеток по сравнению с четырехвалковыми незначительны, а так как их конструкция сложнее, то широкого распространения они не получили.

Двенадцати- и двадцативалковые клетки широко применяются в прокатном производстве. Благодаря использованию валков очень малого диаметра (10–50 мм) и большой жесткости всей рабочей клетки и валковой системы, на этих станах успешно осуществляют рулонную прокатку тонкой и тончайшей ленты толщиной 5–100 мкм и шириной 100–1 500 мм с допуском по толщине 1–5 мкм. Рабочие валки неприводные, так как имеют слишком малый диаметр; они опираются на приводные валки большего диаметра, а последние, в свою очередь, на опорные ролики. Эта схема обеспечивает большую прочность всей валковой системы и практически полное отсутствие прогиба рабочих валков.

Клетки с горизонтальными и вертикальными валками называются универсальными. Универсальные клетки (обычные) применяют главным образом как реверсивные двухвалковые (например, слябинги) или четырехвалковые (например, толстолистовые). На этих клетях обжати

металла осуществляется как горизонтальными, так и вертикальными валками. Последние обеспечивают создание ровных и гладких боковых граней листов и слябов. Вертикальные валки располагают, как правило, у одной стороны рабочей клетки.

В универсальных балочных клетях, в отличие от обычных, вертикальные валки – неприводные. Эти станы используют для прокатки высоких двутавровых балок с широкими полками.

Клетки специальной конструкции используют в станах узкого назначения: колесопрокатные, бандажепрокатные, кольцепрокатные, шаропрокатные, станы для прокатки профилей переменного и периодического сечения и др.

16.7 Описание технологических процессов некоторых видов прокатки

16.7.1 Производство блюмов и слябов

Крупные заготовки – блюмы и слябы – являются полупродуктом, предназначенным для дальнейшей прокатки. Блюмы – это заготовки квадратного сечения. Наибольшее сечение блюмов – 450×450 мм, наименьшее – 140×140 мм. В основном блюмы применяют в качестве исходных заготовок для сортовой прокатки. Заготовки прямоугольного сечения, у которых отношение ширины к толщине находится в пределах 3–12, называются слябами.

Наибольшие размеры слябов составляют 2000×350 мм, а наименьшие – 500×100 мм. Слябы служат заготовкой для прокатки листа, и их сортамент определяется характеристикой используемых листовых станов. Станы, предназначенные в основном для прокатки блюмов, называют блюмингами. На блюмингах прокатывают и слябы размерами от 500×100 до 1500×250 мм.

Станы, предназначенные только для прокатки слябов, называют слябингами.

Блюмы прокатывают из слитков массой 7–12 т. Для прокатки слябов на блюминге используют слитки массой до 20 т, а при прокатке слябов на слябинге масса исходных слитков достигает 40–45 т.

Для предприятий с общим металлургическим циклом блюминг является основным агрегатом, связывающим сталеплавильные цехи с заготовочными станами и определяющим производительность завода в целом.

Блюминги бывают одноклетьевые двухвалковые и многоклетьевые, реверсивные и непрерывные. Наибольшее распространение в качестве заготовочных станов для прокатки блюмов и слябов получили одноклетьевые двухвалковые реверсивные блюминги. В зависимости от диаметра валков

условно различают большие блюминги (1100–1400), средние (900–1000), малые блюминги или обжимные станы (800–900).

Принципиальная схема технологического процесса прокатки слитков на блюмингах и слябингах включает следующие основные операции: осмотр и зачистку слитков; загрузку слитков на нагрев; нагрев слитков; выдачу нагретых слитков; прокатку слитков; зачистку металла; резку и клеймение раскатов и охлаждение.

Прокатку блюмов и слябов осуществляют за несколько проходов, число которых зависит от размеров исходного слитка и конечных размеров блюма (сляба). Обычно слиток прокатывают до заданных размеров блюма за 11–15 проходов. При прокатке на блюминге приходится перемещать полосу (раскат) между проходами от калибра к калибру вдоль оси валков.

Работа современного блюминга полностью автоматизирована. Автоматизация управления нажимным устройством обеспечивает точное перемещение верхнего вала в соответствии с заданным режимом обжатия слитка по проходам. Автоматизация управления главным двигателем блюминга обеспечивает реверсирование валков, повышает скорость вращения двигателя после захвата металла валками и снижает скорость вращения при буксовании валков в момент захвата полосы, регулируется также скорость выхода металла из валков.

Слябинги, предназначенные только для прокатки слябов, распространены меньше блюмингов, так как для обычного сортамента проката на металлургических заводах требуются в качестве исходного полупродукта и блюмы, и слябы.

16.7.2 Производство труб на станах поперечно-винтовой прокатки

Прокаткой получают бесшовные и сварные трубы (со швом). Первый вид труб получают горячей или холодной прокаткой. При производстве горячекатаных труб выполняют две главные операции: прошивку заготовки в гильзу и раскатку гильзы в трубу.

Для операции прошивки используют в основном поперечно-винтовую прокатку, осуществляемую двумя или несколькими валками, вращающимися в одну сторону (рис. 16.11). Оси валков 1 в вертикальной плоскости наклонены друг к другу под углом 5–17°. Благодаря косому расположению валков заготовка 2 при прокатке получает одновременно вращательное и поступательное движения. Поэтому каждая точка деформируемой части заготовки совершает винтовое движение, а в центре ее создаются напряжения, близкие по схеме к всестороннему растяжению. Последнее способствует разрыхлению центральных слоев заготовки, что значительно снижает усилие ее прошивки конической оправкой 3.

Полученные прошивкой гильзы поступают на раскатку в трубы. Для проведения этой операции существуют станы четырех типов: автоматический, непрерывный, пилигримовый и трехвалковый.

После раскатки трубы подвергают отделке, в которую входят: отрезка концов, правка, термическая обработка, окраска или покрытие другими антикоррозионными материалами и др. Для проведения перечисленных операций в трубопрокатных цехах устанавливают соответствующее оборудование.

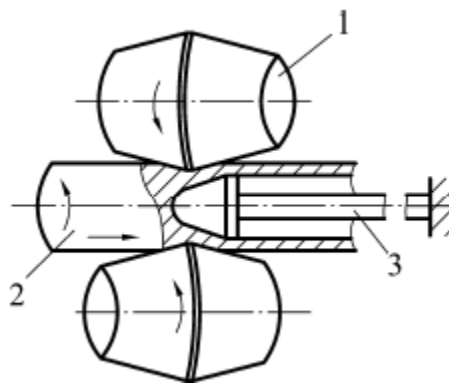


Рис. 16.11. Схема прошивки заготовки при поперечно-винтовой прокатке

16.7.3 Производство труб на станах холодной прокатки труб

Для различных машин и приборов требуются трубы с высоким качеством внутренней и внешней поверхностей, высокой точностью размеров стенки трубы и ее формы. Такие трубы можно получать только холодной обработкой: прокаткой в холодном состоянии и волочением. Данные способы позволяют изготавливать трубы диаметром 0,5–250 мм и более при толщине стенки 0,1–20 мм и выше. Исходным продуктом при этом являются горячекатаные трубы или трубы, получаемые прессованием.

Наибольшее распространение при производстве труб получили двухвалковые станы холодной прокатки труб с периодическим режимом работы клетки. Трубы (рис. 16.12) прокатывают на неподвижной конической оправке 1, установленной в калибре валковых сегментов 2, укрепленных на рабочих валках 3. Ручьи выполнены с переменным радиусом, меняющимся по окружности сегмента от радиуса трубной заготовки (начальный размер) до радиуса готовой трубы (конечный размер). Такие валки устанавливают в клетки на жесткой раме, совершающей возвратно-поступательное движение на расстояние $L_{\text{кл}}$ по рельсам на катках. При рабочем ходе клеть с валками перемещается из положения I в положение II. Сегменты разворачиваются, радиус калибра между ними уменьшается, что обеспечивает обжатие заготовки по диаметру и толщине стенки. Периодическая подача трубы (обычно на 6–12 мм) в калибр, когда зазор между валками позволяет

выполнить эту операцию, и ее поворот на 60° по окончании данного цикла прокатки производят специальными кулачковыми механизмами. По возвращении клетки в первоначальное положение цикл повторяется.

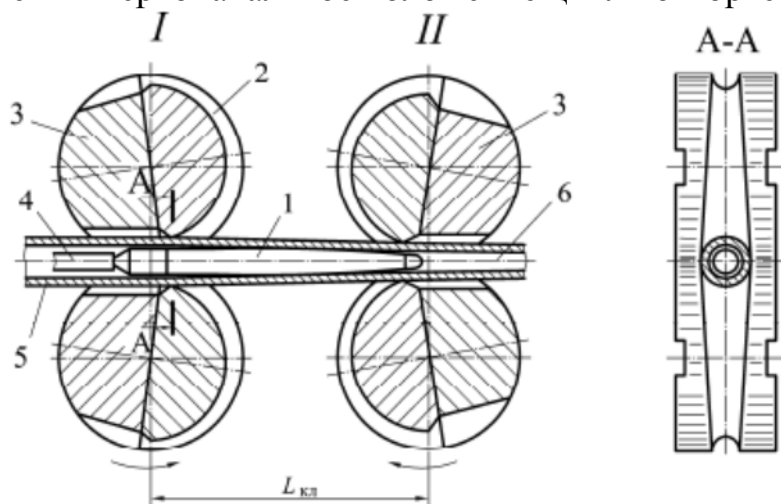


Рис. 16.12. Схема прокатки труб на стане ХПТ: 1 – оправка; 2 – калибр; 3 – валок; 4 – стержень; 5 – заготовка; 6 – труба

16.7.4 Производство сварных труб

Удельный вес сварных труб в общем производстве труб непрерывно возрастает, что объясняется высокой технологичностью и экономической целесообразностью получения сварных труб при высоком их качестве. Сварные трубы изготавливают печной сваркой и электросваркой. Печной сваркой изготавливают трубы диаметром от 10 до 114 мм при толщине стенки 2–5 мм.

Этот способ производства водогазопроводных труб является наиболее производительным. Трубосварочные станы обычно имеют 6–12 формовочно-сварочных двухвалковых клеток. После сварки трубы обрабатывают на многоклетевых редуционных и калибровочных станах.

Исходным продуктом при печной сварке труб являются штрипсы (ленты из низкоуглеродистой стали, содержащие обычно до 0,18 % С). Штрипс в рулонах с разматывателя подается в печь, где нагревается до $1230 - 1320^\circ\text{C}$. По выходе из печи кромки штрипса обдувают воздухом, что повышает их температуру до $1390 - 1480^\circ\text{C}$. Затем штрипс попадает в формовочно-сварочный стан с чередующимися горизонтальными и вертикальными консольными валками, имеющими ручки. В первой вертикальной паре валков полоса сворачивается на угол $220 - 270^\circ\text{C}$. Перед последующей парой уже горизонтальных валков проводят вторичный продув кромок штрипса воздухом, что повышает их температуру до 1500°C . При этом сопло обеспечивает направление штрипса в сварочные валки, где кромки металла соединяются и свариваются. В следующих валках создается

усилие для протаскивания штрипса через печь и формовочные валки для дополнительного обжата, улучшающего качество сварного шва.

В промышленности применяют несколько способов производства труб, в которых шов выполняют электросваркой. Одним из наиболее распространенных является способ получения труб контактной сваркой сопротивлением. В этом случае изготавливают трубы диаметром от 0,15 до 20 мм. Исходным материалом здесь служит холоднокатаная лента в рулонах или полосы, а для труб больших диаметров – листовая заготовка.

Ленты и полосы свертываются в холодном состоянии в трубу в формовочных непрерывных двухвалковых станах дуо с числом клетей от 5 до 12 в зависимости от размера труб. Расположение валков в клетях обеспечивает последовательное формоизменение полосы в трубу (рис. 16.13).

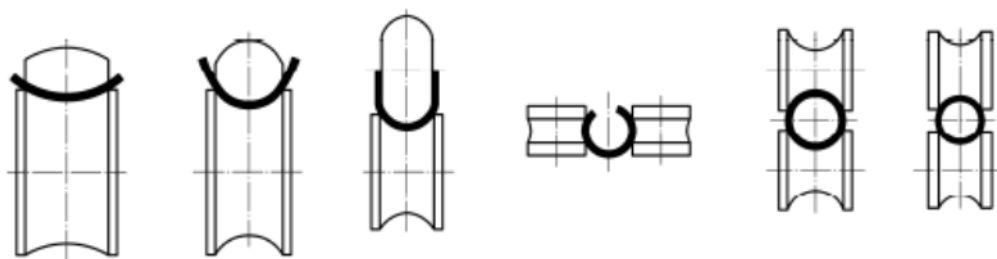


Рис. 16.13. Последовательность процесса свертывания трубы из полосы в шести валках стана

При выходе из последней клетки стана трубная заготовка поступает в электросварочный агрегат, где специальными роликовыми электродами кромки трубы плотно прижимаются друг к другу и одновременно свариваются. Кроме описанного способа, применяют также электродуговую сварку, электродуговую сварку и т.д. Для некоторых видов труб при дуговой сварке с целью защиты металла сварочного шва от окисления используют газы: аргон, гелий и т.д.

Рассмотренные выше процессы прокатки с целью получения ими основного объема катаной продукции следует считать основными. Описание остальных видов прокатки, таких, как прокатка бандажей, шаров, колес и других, можно найти в специальной литературе.

17 ПРЕССОВАНИЕ МЕТАЛЛА

17.1 Сущность процесса прессования

Прессование – это один из наиболее прогрессивных процессов обработки металлов давлением, позволяющий получать деформированные

изделия – профили, отличающиеся экономичностью и высокой эффективностью при использовании в конструкциях.

Рассмотрим сущность процесса прессования (рис. 17.1). Заготовка 1, нагретая до температуры прессования, помещается в контейнер 2. С выходной стороны контейнера в матрицедержателе 3 размещается матрица 5, формирующая контур изделия 4. Через пресс-штемпель 7 и пресс-шайбу 6 на заготовку передается давление от главного цилиндра пресса. Под действием высокого давления металл истекает в рабочий канал матрицы, формирующий заданное изделие. Описанная схема относится к процессу прямого прессования. Кроме прямого, существуют еще такие виды прессования, как обратное, совмещенное, с боковым истечением, полунепрерывное, непрерывное и др.

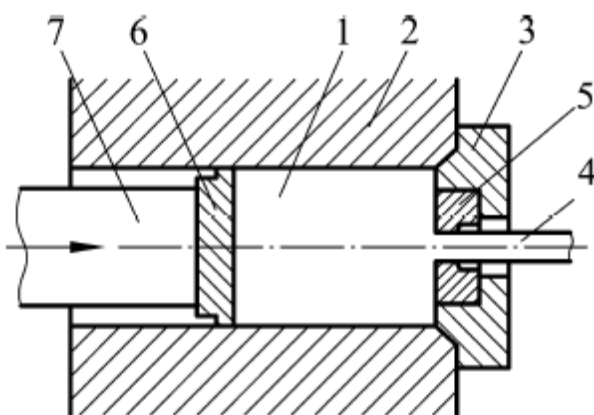


Рис. 17.1. Схема процесса прямого прессования

Широкое развитие прессования объясняется благоприятной схемой напряженного состояния деформируемого металла – всесторонним неравномерным сжатием. В настоящее время прессованием получают несколько десятков тысяч наименований пресс-изделий из различных металлов и сплавов на прессах с номинальным усилием до 200 МН. При этом процесс ведут в широком интервале температур, выбор которых определяется главным образом величиной сопротивления деформации.

Горячее прессование более распространено, чем холодное. Однако область применения последнего расширяется для металлов и сплавов, имеющих невысокое сопротивление деформации, с ростом производства высокопрочных инструментальных сталей и в результате создания высокопроизводительного специализированного оборудования. Прессование организовано как периодически повторяющийся процесс, однако в настоящее время нашли промышленное применение способы прессования в непрерывном и полунепрерывном режимах.

17.2 Преимущества и недостатки прессования

По сравнению с конкурирующими процессами, которыми в данном случае являются горячая сортовая прокатка и прокатка труб, прессование имеет определенные преимущества.

Если при прокатке на многих участках пластической зоны возникают большие растягивающие напряжения, понижающие пластичность обрабатываемого металла, то при прессовании реализуется схема неравномерного всестороннего сжатия, позволяющая изготавливать различные пресс-изделия, вообще не получаемые прокаткой или получаемые, но за большое число проходов. Область применения прессования особенно расширяется, когда степени деформации за переход превышают 75 %, а коэффициент вытяжки имеет значение более 100.

Прессованием можно получать изделия практически любых форм, а прокаткой – профили и трубы сравнительно простых конфигураций поперечного сечения.

При прессовании быстрее осуществляется перевод процесса получения одного типоразмера пресс-изделия на другой – достаточно только заменить матрицу.

Пресс-изделия точнее по размерам, что обусловлено замкнутостью калибра матрицы. Точность изделия определяется качеством изготовления матрицы, ее материалом и видом термообработки.

Меньшие затраты на переналадку оборудования при прессовании позволяют рекомендовать его для производства любой серийности.

Высокие степени деформации при прессовании, как правило, обеспечивают высокий уровень свойств изделий.

Наряду с перечисленными преимуществами, прессование имеет следующие недостатки:

- необходимость низких скоростей прессования, требующихся для получения бездефектной продукции из ряда металлов и сплавов;
- 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;
- ограничение длины заготовки, обусловленное прочностью пресс-штемпелей, силовыми возможностями пресса и устойчивостью заготовки при распрессовке;
- повышенную неравномерность деформации, влияющую на неравномерность распределения свойств в изделии по различным направлениям;
- сравнительно низкую стойкость инструмента и его высокую удельную стоимость из-за тяжелых условий нагружения, а также необходимости использования для его изготовления дорогих легированных сталей.

Сопоставление преимуществ и недостатков процесса позволяет прийти к выводу о том, что наиболее целесообразно применять прессование при производстве толстостенных и тонкостенных профилей и труб сложной формы, прессуемых с высокими скоростями истечения; при обработке труднодеформируемых и малопластичных металлов и сплавов; при получении полуфабрикатов сложной геометрии, повышенной точности размеров, а также для производства тонкой проволоки из металлов и сплавов, не подвергающихся волочению. Кроме того, прессование, в отличие от прокатки, рентабельно в среднем и мелкосерийном производстве.

17.3 Способы прессования

Существует достаточно большое количество схем прессования, но основными из них следует считать прямое и обратное.

При прямом прессовании направление выдавливания изделий совпадает с направлением движения пресс-штемпеля (см. рис. 17.1). Этот способ прессования наиболее распространен и позволяет получать сплошные и полые изделия в широком диапазоне размеров, вплоть до размеров изделия, близких к размеру контейнера. Особенность способа – обязательное перемещение металла заготовки относительно неподвижного контейнера.

Прямое прессование дает возможность получать изделия с высоким качеством поверхности, поскольку при прессовании этим способом у матрицы образуется большая по высоте упругая зона металла, практически исключая попадание дефектов из зоны контакта заготовки с контейнером на поверхность изделия.

В результате сил трения на поверхности заготовки появляются высокие сдвиговые деформации, способствующие обновлению слоев металла, формирующих периферийные зоны профиля.

Однако при прямом прессовании необходимы высокие затраты энергии на преодоление трения металла о поверхность инструмента. В отдельных случаях доля усилия, затрачиваемая на это, может достигнуть 40–60 % от полного усилия прессования. Кроме того, большая неравномерность деформации на протяжении всего процесса приводит к неравномерности структуры и механических свойств пресс-изделий. Низкий выход годного из-за большого пресс-остатка и большой обрезки слабodeформированной части выходного конца пресс-изделия также является недостатком прямого прессования.

При обратном прессовании истечение металла в матрицу происходит в направлении, противоположном движению пресс-штемпеля. На рис. 17.2 приведена одна из схем обратного прессования: металл 1 выдавливается из неподвижного контейнера 2, закрытого заглушкой, пресс-шайбой 3 через матрицу 4. Передача усилия от приводного гидроцилиндра осуществляется на полый матрицедержатель 5.

При обратном прессовании слиток не перемещается относительно контейнера и общее усилие прессования снижается из-за отсутствия затрат энергии на преодоление сил трения между контейнером и прессуемым металлом.

К достоинствам обратного прессования можно отнести снижение усилия прессования, позволяющее увеличивать коэффициент вытяжки и уменьшать температуру прессования, и повышение скорости истечения металла из-за большой равномерности его течения по сечению очага деформации, а следовательно, и увеличение производительности процесса. Этот способ дает возможность формировать, вследствие монотонного характера истечения металла, равномерную структуру и механические свойства пресс-изделий.

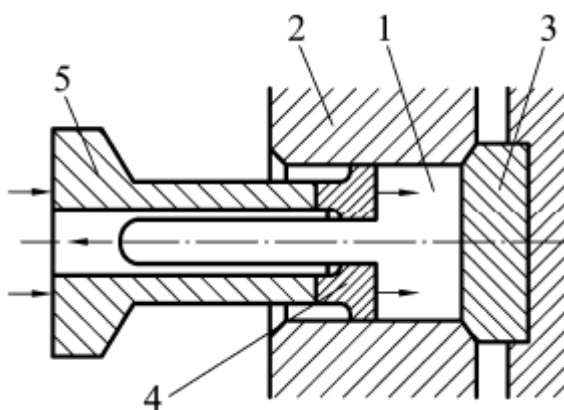


Рис. 17.2. Схема процесса обратного прессования

Обратное прессование характеризуется ростом выхода годного за счет уменьшения толщины пресс-остатка и снижения глубины распространения пресс-утяжины в изделие, а также увеличением срока службы контейнера из-за неподвижного контакта с заготовкой.

Однако при этом виде прессования наблюдается 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.

Кроме того, для получения профилей с хорошим качеством поверхности необходимо применять заготовки с хорошим состоянием поверхности, что достигается предварительной обточкой, скальпированием заготовок или отливкой слитков в электромагнитном кристаллизаторе. И, наконец, при обратном прессовании ограничивается номенклатура пресс-изделий из-за недостаточной прочности удлиненного матричного узла, а также увеличивается стоимость гидропрессов и вспомогательного времени цикла.

17.4 Стадии прессования. Особенности течения металла

По характеру силовых и деформационных условий процесс прессования можно разбить на четыре последовательные стадии.

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

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

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

IV 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.

При прессовании обычно имеет место неравномерное течение металла, заключающееся в более интенсивном вытекании средних слоев заготовки по сравнению с наружными, что приводит к образованию в задней части прессованного изделия неплотности, называемой пресс-утяжиной. На характер течения металла, а следовательно, на пресс-утяжину влияют контактное трение, температура металла и контейнера, состояние поверхности контейнера и матрицы, длина заготовки, профиль матрицы, скорость и степень деформации, смазка.

Установлено, что при длине заготовки, превышающей ее диаметр, характер течения металла и вид очага деформации полностью зависят от контактного трения, перепада температуры и смазки. Таким образом, изменяя тепловой режим прессования и условия трения металла о стенки контейнера и матрицы, можно изменять характер его течения, а также влиять на равномерность механических свойств изделия.

18 ВОЛОЧЕНИЕ

18.1 Сущность процесса волочения

При волочении заготовку протягивают через отверстие инструмента, сечение которого меньше сечения протягиваемой заготовки (рис. 18.1). Сила P , прикладываемая к переднему заостренному концу проволоки, введенному

в волоку, называется силой волочения. Под действием указанной силы заготовка, протягиваясь через волоку, деформируется и принимает форму и размеры наименьшего сечения канала. В результате площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, а длина – увеличивается. Форма и размеры сечения изделия при волочении прутков, проволоки, профилей сплошного сечения и труб без утонения стенки определяются только конфигурацией и размерами калибрующей зоны канала волоку.

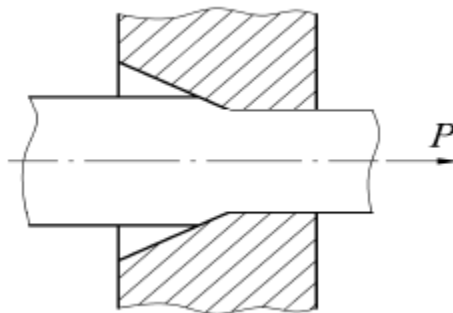


Рис. 18.1. Схема процесса волочения

Волочением обрабатывают самые различные материалы: стали, алюминий, медь, никель, титан и сплавы на их основе; тугоплавкие металлы и их сплавы, а также благородные металлы и сплавы на их основе.

Получаемые волочением полуфабрикаты представляют собой круглую проволоку диаметром 0,008–17 мм; проволоку квадратного, прямоугольного, шестиугольного и других сечений; прутки круглые, квадратные, шестигранные, трапециевидные и других форм; трубы круглые диаметром 0,3–500 мм со стенкой толщиной 0,05–25 мм, овальные, прямоугольные и др.

Кроме того, этим способом обработки давлением можно получить фасонные профили с различной формой поперечного сечения и самых разных размеров.

18.2 Основные характеристики процесса волочения

При волочении используют следующие показатели деформации: коэффициент вытяжки, относительное обжатие, относительное удлинение, интегральную (логарифмическую) деформацию.

Коэффициент вытяжки μ показывает, во сколько раз увеличилась длина или уменьшилась площадь поперечного сечения изделия за переход волочения:

$$\mu = \frac{L_1}{L_0} = \frac{F_0}{F_1}, \quad (66)$$

где L_0 , F_0 – соответственно, длина и площадь сечения заготовки до волочения;

L_1 , F_1 – после волочения.

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

$$\varepsilon = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \cdot 100 \%. \quad (67)$$

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

$$\lambda = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \cdot 100 \%. \quad (68)$$

Интегральная (логарифмическая) деформация – натуральный логарифм соотношения площадей поперечного сечения изделия до и после перехода волочения:

$$i = \ln \left(\frac{F_0}{F_1} \right). \quad (69)$$

Сила волочения P_B – это продольная сила, приложенная к протягиваемому металлу у выхода его из волоки. Если силу волочения отнести к площади поперечного сечения изделия на выходе из волоки F_K , то получим напряжение волочения k_B .

Напряжение волочения должно быть меньше сопротивления деформации металла в его состоянии после волочения σ_s . В противном случае пластическая деформация может происходить и после выхода металла из волоки. Это приведет к искажению формы поперечного сечения изделия после волочения, и в конечном счете может произойти его обрыв. Поэтому при волочении обязательно должно соблюдаться условие:

$$k_B = \frac{P_B}{F_K} < \sigma_s. \quad (70)$$

Условие волочения без обрывов записывается следующим образом:

$$K_3 = \frac{\sigma_s}{k_B} > 1, \quad (71)$$

где K_3 – коэффициент запаса.

На практике коэффициент запаса обычно меняется от 1,35 до 2,0 (иногда до 2,5). При этом, чем тоньше изделие и выше требования к качеству его поверхности и точности размеров, тем коэффициент запаса должен быть больше. Поэтому максимальной величины K_3 достигает в последнем

калибровочном проходе, в котором изделию придается окончательная форма и размеры.

На силу и напряжение волочения влияют многие факторы: 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 поперечного сечений изделия; противонатяжение; вибрация инструмента.

18.3 Инструмент для волочения

Для получения продукции волочения, называемой тянутыми изделиями, используются специализированное оборудование и инструмент.

Основной инструмент для волочения – это волоки разнообразной конструкции. При получении волочением полых изделий к волочильному инструменту относятся также оправки. Волока обычно включает обойму 1 и собственно волоку 2 (рис. 18.2).

Волочильный канал состоит из пяти зон: входной I, обжимающей II, переходной III, калибрующей IV и выходной V. Из этих пяти зон в контакте с деформируемым металлом в процессе волочения находятся только три: обжимающая, калибрующая и очень короткая переходная между ними. Поэтому на силу и напряжение волочения оказывает влияние продольный профиль только этих зон, который представляет собой ломаную линию из двух участков: наклонного к оси и параллельного ей, соединенных радиусным переходом. Совокупность этих зон часто называют деформационной зоной.

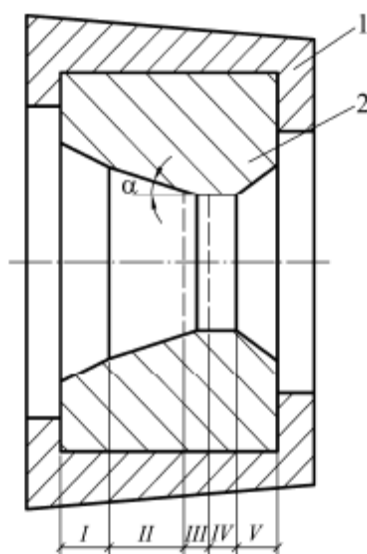


Рис. 18.2. Волока в обойме: I–V – зоны волоки

Следует также отметить, что в обжимающей зоне осуществляется основная деформация заготовки при волочении, а в калибрующей зоне сечению заготовки придаются окончательная форма и размеры.

Особенно заметно на силу и напряжение волочения влияет угол наклона образующей обжимающей зоны к оси канала волокна, или угол волокна α .

Существует зона оптимальных углов, при которых сила и напряжение волочения имеют минимальные значения. Увеличение α (сверх оптимальных значений) приводит к уменьшению контактной поверхности металла с волоком, что 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 значениях α меньше оптимальных увеличивается контактная поверхность металла с волоком, т.е. растет сила трения, но снижается степень деформации.

Наличие двух групп факторов, оказывающих противоположное влияние на силу волочения, и обуславливает существование зоны оптимальных углов, которая обычно находится в интервале от 5 до 18°.

Для изготовления волок используют три группы материалов: сталь, твердые сплавы и алмазы. Для стальных волок в зависимости от характеристики протягиваемого материала применяют стали трех групп: нелегированные марок У8-У12; хромомолибденовые марок Х12М; инструментальные разных марок: ШХ15, 40Х5Т и т.д.

При производстве проволоки из цветных металлов и сплавов в качестве волочильного инструмента применяют природные и синтетические алмазы.

19 СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА КОВКИ И ОСНОВНЫЕ ОПЕРАЦИИ

19.1 Назначениековки

При ковке деформация металла осуществляется многократным и прерывистым воздействием универсального инструмента – бойков, один из которых (верхний) крепится к подвижному органу кузнечной машины (бабе молота или ползуну прессы), а второй (нижний) закрепляется на шаботе молота или столе прессы. В связи с этим бойки называют закрепляемым инструментом. Верхний боек совершает возвратно-поступательные перемещения, нижний – большей частью неподвижен. Для разделения элементов поковки и выполнения поволоков сложной конфигурации используют также вспомогательный инструмент (топоры, обжимки, раскатки, прошивки и т.п.), на который при ковке тоже воздействуют бойками. При ковке течение металла происходит в направлениях, не

ограниченных поверхностями инструмента. Ковка применяется в мелкосерийном, а также в индивидуальном производстве.

Этим способом получают поковки весом от нескольких килограмм до 300т и более, например, валы гидрогенераторов, турбинные диски и др.

Величина деформации при ковке может быть выражена либо относительным изменением площадей поперечного сечения:

$$\varepsilon = \frac{F_0 - F_1}{F_1} 100\%, \quad (72)$$

либо коэффициентом уковки

$$y = \frac{F_0}{F_1}, \quad (73)$$

где F_0 – большая площадь поперечного сечения;

F_1 – меньшая площадь поперечного сечения.

Коэффициент уковки всегда больше единицы. Уковка показывает, во сколько раз изменилось поперечное сечение заготовки в процессековки, т.е. характеризует степень прокованности металла (распределение деформации по объему), так как чем больше изменено поперечное сечение металла, тем он лучше прокован и, следовательно, выше его механические свойства.

19.2 Основные операцииковки

Процессковки можно разделить на элементарные операции. Рассмотрим основные из них.

Билетировка слитка – операция обжатия ребер заготовки для придания ей формы тела вращения. При этом одновременно со снятием конусности слитка разрушается литая дендритная структура и устраняются другие дефекты литого металла.

Осадка – процесс уменьшения высоты заготовки с одновременным увеличением площади поперечного сечения (рис. 19.1).

При этом процессе на боковой поверхности цилиндрической заготовки в результате воздействия на контактную поверхность сил трения наблюдается бочкообразование, которое тем больше, чем больше коэффициент трения μ на контактной поверхности. При $\mu = 0$ бочкообразования нет, т.е. цилиндр при осадке превращался бы в цилиндр на протяжении всего процесса деформации, а распределение деформаций в заготовке было бы равномерным. Однако из-за того, что при горячей деформации $\mu = 0,3-0,4$, а также благодаря подстуживающему действию инструмента в заготовке при осадке можно выделить три зоны (рис. 19.1, б). Зоны затрудненной деформации I расположены с торцевых частей заготовки. В центральной части поковки находится иксообразная зона интенсивной деформации II. Частицы металла в этой зоне деформируются значительно больше, чем в зоне I. Между боковой поверхностью заготовки и зоной интенсивной деформации выделяется зона промежуточных деформаций III с

растягивающими напряжениями. Такое распределение деформаций ведет к анизотропии свойств получаемых поковок.

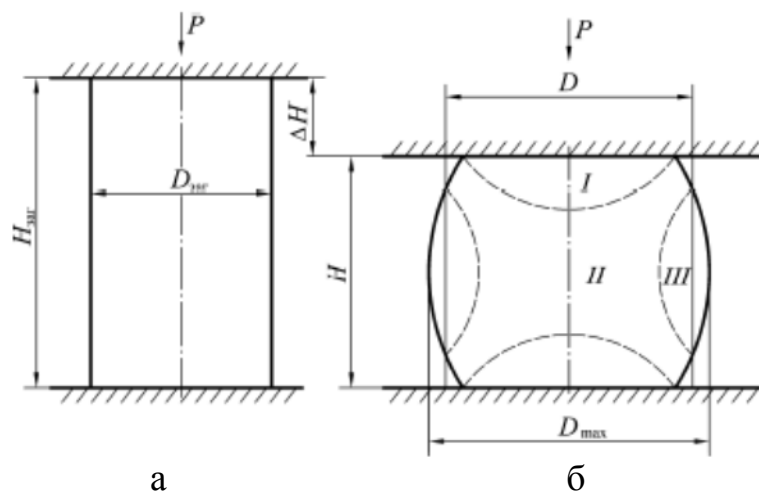


Рис. 19.1. Заготовка до (а) и после (б) осадки: I – зона затрудненной деформации; II – зона интенсивной деформации; III – зона промежуточных деформаций

Высадка – это осадка части заготовки (рис. 19.2).

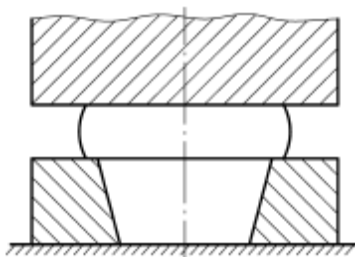


Рис. 19.2. Схема высадки

Прошивка – получение полостей в заготовке за счет вытеснения материала. Она применяется при изготовлении поковок с осевым отверстием. Одна из разновидностей прошивки, выполняемой сплошным прошивнем и надставками, представлена на рис. 19.3. Осаженный слиток располагают на нижнем бойке, по центру устанавливают прошивень, слегка вдавливают его в металл заготовки, а затем поднимают. В углубление для снижения трения и предотвращения приваривания прошивня насыпают графит или толченый уголь. После этого в углубление вновь устанавливают прошивень и вдавливают его в заготовку. Затем для дальнейшего заглубления прошивня используют короткие цилиндрические надставки. Когда толщина перемычки под прошивнем составит 0,1–0,2 высоты поковки, ее кантуют, вынимают

надставки и прорезным прошивнем пробивают отверстие, одновременно удаляя первый прошивень.

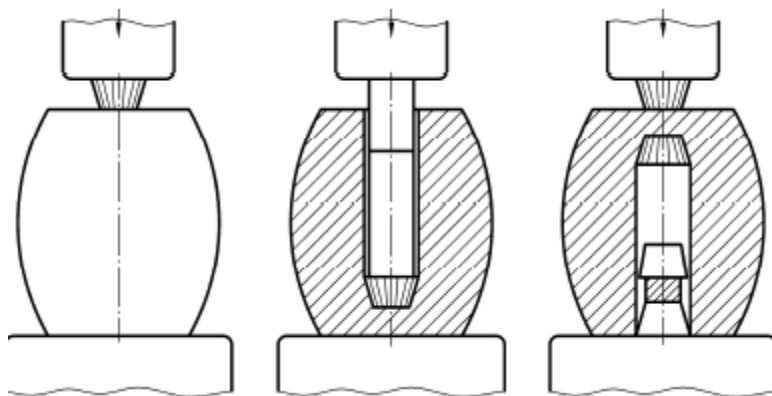


Рис. 19.3. Схема прошивки сплошным прошивнем

Протяжка – процесс увеличения длины заготовки за счет уменьшения площади ее поперечного сечения (рис. 19.4). Процесс осуществляется путем приложения усилияковки перпендикулярно оси заготовки. После одного или нескольких ударов заготовку поворачивают на 90° , проковывают, затем возвращают в начальное положение. Короткие заготовки начинают деформировать с края, длинные – с середины. За каждый переход коэффициент вытяжки составляет примерно 1,2–1,3.

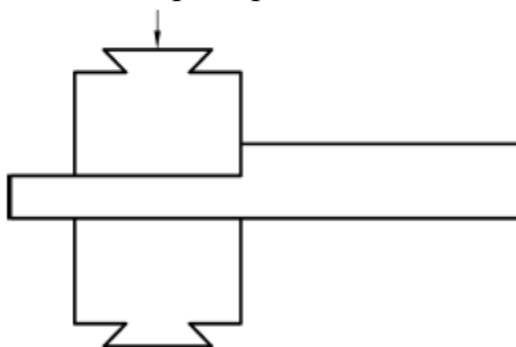


Рис. 19.4. Схема протяжки

Рубка – разделение заготовки на несколько частей или удаление концов поковок (рис. 19.5).

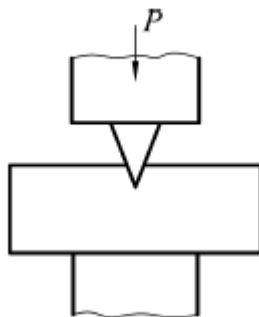


Рис. 19.5. Схема рубки

Раскатка – операция, заключающаяся в увеличении диаметра кольцевой заготовки за счет уменьшения ее толщины, выполняемая с помощью бойка и оправки (рис. 19.6). Раскатка используется при изготовлении поковок, имеющих незначительную толщину стенки по сравнению с диаметром отверстия (кольца, бандажи, венцы, различные обечайки). Операция раскатки аналогична протяжке заготовки, концы которой соединены между собой.

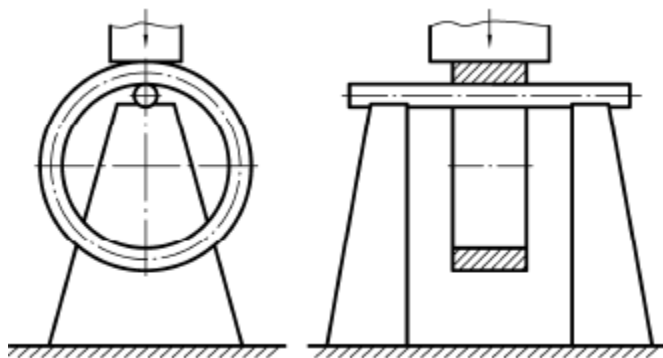


Рис. 19.6. Схема раскатки

Гибка – придание заготовке криволинейной формы, а также образование или изменение углов между частями заготовки (рис. 19.7). Гибку выполняют между опорами.

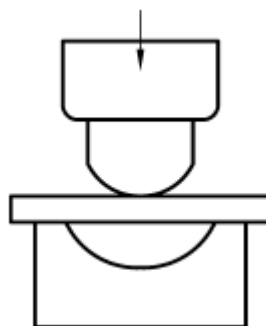


Рис. 19.7. Схема гибки

Закручивание – процесс поворота одной части заготовки относительно другой (рис. 19.8).

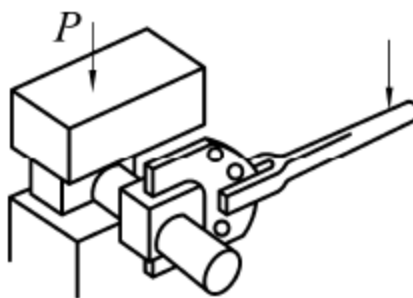


Рис. 19.8. Схема закручивания

Кузнечная сварка – процесс соединения нескольких частей (рис. 19.9). Место соединения очищают, нагревают до 1270–1400°C и сваривают в твердой фазе, прикладывая внешнее давление. Сварку применяют для низкоуглеродистых сталей.

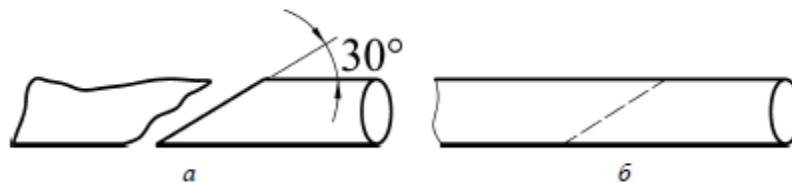


Рис. 19.9. Схема кузнечной сварки: а – до сварки; б – после сварки

Передача – смещение одной части заготовки относительно другой при сохранении параллельности осей или плоскостей частей заготовки (рис. 19.10).

Широко применяют передачу металла в одной и двух параллельных плоскостях. Например, при передаче по первому способу (рис. 19.10) на прессе с подвижным столом после надрубки и пережима сдвигают нижний боек относительно верхнего так, чтобы правая кромка нижнего бойка находилась на уровне левой кромки верхнего бойка. После этого нажатием верхнего бойка выполняют смещение одной части металла относительно другой.

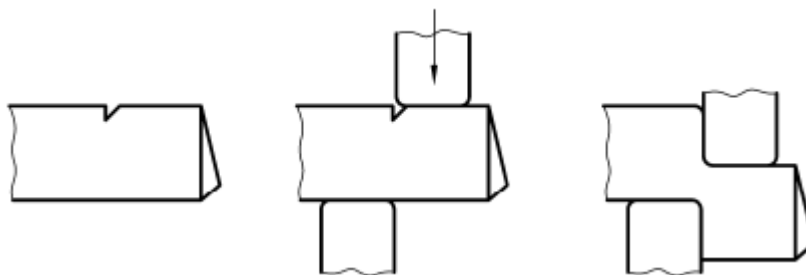


Рис. 19.10. Последовательность операции передачи

Помимо рассмотренных при ковке используют и другие операции: растяжка (местное уменьшение площади поперечного сечения путем растяжения), прожимка (местное уменьшение площади поперечного сечения заготовки путем обжатия), обкатка (придание заготовке формы тела вращения путем повторных ударов или нажатий), засечка (выделение части объема заготовки путем нанесения углубления по ее границам), проглаживание (устранение неровностей поверхности заготовки путем пластического деформирования) и др.

19.3 Влияниековки на структуру и свойства металлов

Заготовками дляковки обычно служат слитки (рис. 19.11). Рассмотримковку стальных слитков и влияние этой операции на структуру и свойства металла.

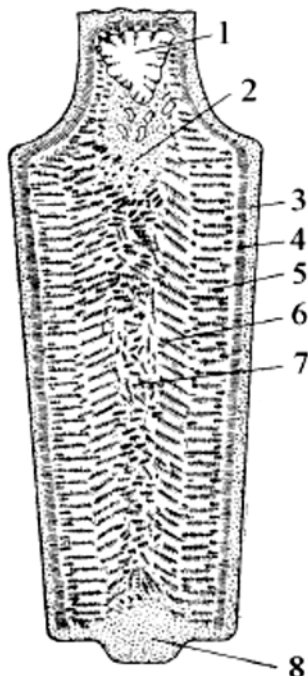


Рис. 19.11. Строение стального слитка: 1 – усадочная раковина; 2 – усадочная рыхлость; 3 – зона плотного зернистого строения; 4, 5 – зоны мелких и крупных кристаллов, ориентированных перпендикулярно к стенкам изложницы; 6 – зона крупных дендритов, наклоненных к стенкам изложницы; 7 – зона средних и крупных дендритов, различно ориентированных; 8 – часть слитка с плотным зернистым строением

В строении слитка различают несколько зон. Поверхностный слой слитка представляет собой мелкокристаллическую структуру, обусловленную быстрой скоростью охлаждения. В следующем слое кристаллиты имеют столбчатое строение, а в середине слитка кристаллизация жидкого металла происходит еще медленнее и образуется зона равноосных дендритов. Кроме того, в середине слитка скапливается некоторое количество микротрещин, переходящих в верхней части слитка в пустоты и рыхлости с располагающейся в верхней (прибыльной) части усадочной раковиной. Таким образом, слиток вследствие неоднородности по структуре и химическому составу, как в пределах зерна, так и по объему, а также из-за наличия пор, газовых пузырей и других дефектов не может быть непосредственно использован для изготовления деталей машин и конструкций. Для устранения перечисленных дефектов слитки подвергают горячей обработке давлением, в частности ковке.

При ковке литого металла первичные кристаллы (дендриты) дробятся и вытягиваются в направлении наибольшей деформации. В результате протекания процессов рекристаллизации деформированный металл приобретает зернистую микроструктуру. Одновременно с дендритами, создавая волокнистую структуру, перемещаются и их границы, представляющие собой неметаллические вещества. Кроме того, процесс сопровождается завариванием пузырей, трещин, пор, и металл уплотняется. Вследствие ускорения протекания диффузионных процессов частично выравнивается химический состав (устраняется дендритная ликвация).

В результатековки металл становится прочнее и пластичнее, хотя и приобретает анизотропию свойств. При сравнительно неизменных во всех направлениях характеристиках прочности характеристики пластичности металла вдоль волокон получаются выше, чем поперек. Причем эта разница растет с увеличением коэффициента уковки.

Изменение структуры слитка можно рассмотреть на примере протяжки (рис. 19.12).

Практикой установлено, что средняя часть слитка приобретает волокнистое строение уже после 2–3-кратного укова, а столбчатые дендриты при этом только начинают заметно отклоняться от первоначального направления. При 4–6-кратном укове увеличиваются деформация и наклон столбчатых дендритов, но последние все же остаются наклоненными к направлению вытяжки на заметный угол.

После 10-кратного укова сталь приобретает волокнистое строение по всему сечению. Эта структура является стойкой и только термообработкой, близкой к температуре плавления, можно лишь частично «размыть» волокнистость.

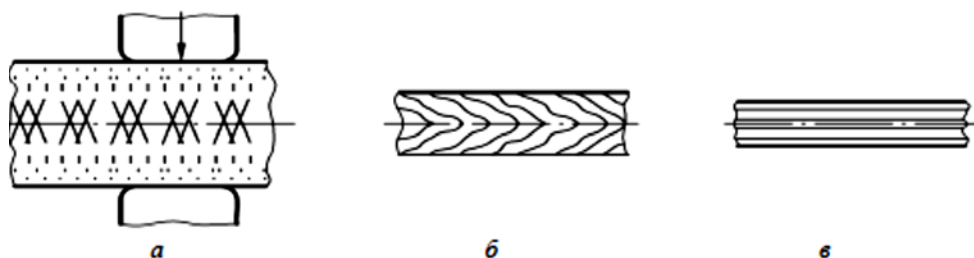


Рис. 19.12. Изменение структуры слитка при протяжке: а – до протяжки; б – протяжка с 4–6-кратным уковом; в – протяжка с 10-кратным уковом

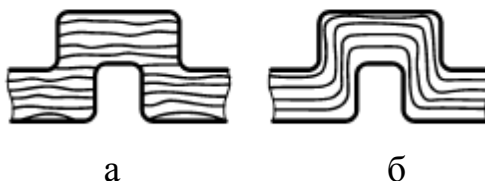


Рис. 19.13. Структура коленчатого вала, изготовленного резкой из пластины (а) и по лученного операциямиковки: гибкой или передачей (б)

Дальнейшая технология получения изделий из поковок должна учитывать волокнистость их структуры. Например (рис. 19.13), если коленчатый вал изготовить механической обработкой на металлорежущих станках из поковки в виде пластины, то волокна в щеках вала получаются подрезанными (рис. 19.13, а), что снижает прочность этих участков.

Если при изготовлении коленчатого вала применяют операции гибки или передачи металла, то получают волокнистую структуру, расположенную по контуру вала (рис. 19.13, б) и имеющую повышенную прочность.

20 ГОРЯЧАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА

20.1 Сущность процесса горячей объемной штамповки

Штамповка – это процесс обработки металлов давлением с использованием специального инструмента – штампа, состоящего из двух и более деталей. Штампы служат для формоизменения или разделения заготовок, а штамповке подвергают как объемные, так и листовые заготовки, с нагревом и без него.

Для горячей объемной штамповки используют штампы, содержащие полости – ручки. Течение металла при штамповке принудительно ограничивается поверхностями инструмента, что вызывает перераспределение объема заготовки. Заготовка, деформируясь в ручьях, заполняет их и принимает форму штампованной поковки.

Штамповый инструмент отличается высокой стоимостью, а деформирование металла при этом требует большей мощности по сравнению с ковкой, но при массовом производстве однотипных поковок штамповка имеет ряд преимуществ.

Помимо высокой производительности, штамповка обеспечивает получение поковок с высокой точностью размеров, что уменьшает расход металла на изготовление детали и снижает трудоемкость при последующей обработке металла резанием. Кроме того, этот вид обработки металлов давлением обеспечивает получение поверхности поковок высокого качества. Последующие за горячей штамповкой отделочные операции (например, калибровка в холодном состоянии) повышают качество поверхности поковок, а допуски размеров при этом снижаются. Поэтому все повышенные расходы на штамповку и изготовление инструмента окупаются экономией металла и расходами на механическую обработку поковок. Вместе с тем штамповкой можно получать изделия весьма сложной формы, которые во многих случаях нельзя выполнить ковкой без напусков.

Штамповкой изготавливают поковки преимущественно массой до 100 кг, однако производят поковки массой и до 400–500 кг и даже до 2 т.

20.2 Виды горячей объемной штамповки

Применяют два вида штамповки (рис. 20.1): облойную (с заусенцем) в открытых штампах (рис. 20.1, а) и безоблойную (при отсутствии заусенца) в закрытых штампах (рис. 20.1, б).

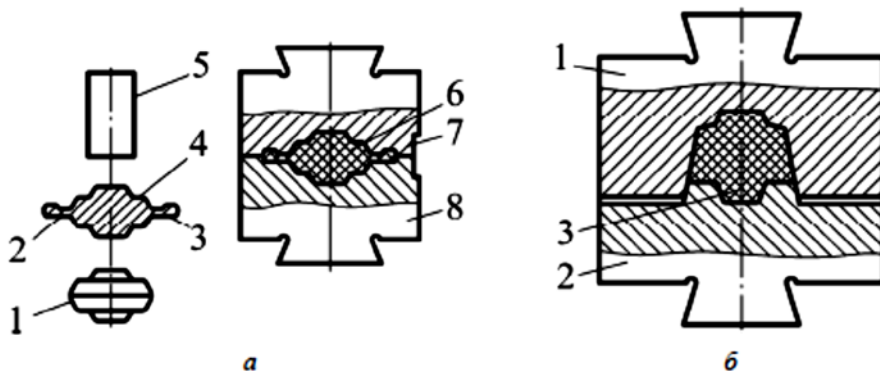


Рис. 20.1. Штампы для горячей штамповки на молоте:
а – открытый; б – закрытый

При облойной одноручевой штамповке поковки 1 получают из цилиндрической заготовки 5 в штампе, состоящем из двух частей: верхней 7, прикрепляемой к бабе, и нижней 8, прикрепляемой к штамподержателю и шаботу молота. Для облегчения выемки поковок боковые поверхности ручьев делают с уклонами $\alpha = 3\text{--}12^\circ$. Нагретую заготовку 5 укладывают в нижнюю половину штампа на торец. При деформации металл заполняет ручей, формируя черновую поковку 4. При облойной штамповке заусенец 2, 3 образуется по месту разъема штампа из-за избытка металла. Начало появления заусенца опережает заполнение металлом ручьев штампа. При последующем уменьшении зазоров штампа заусенец создает подпор по контуру поковки 6, что способствует заполнению металлом углов штампа, т.е. облой выполняет определенную технологическую функцию. Заусенечную щель между частями штампа выполняют в виде специальной канавки по периметру поковки.

После деформации облой удаляется на обрезных штампах. Облойная штамповка имеет широкое применение, так как надежно обеспечивает заполнение полостей штампа.

При безоблойной штамповке в закрытом штампе заготовку помещают в полости нижней части штампа 2 и процесс деформирования выполняют верхней частью 1. Небольшой заусенец, который может образоваться по плоскости разъема, не влияет на процесс штамповки и является результатом неточности размеров заготовки. Для удаления поковки 3 из штампа применяют выталкиватели или стенки штампа изготавливают с уклоном.

Основным преимуществом безоблойной штамповки является пониженный расход металла.

Сортамент штамповок, получаемых в открытых штампах, более широкий. Оба метода предусматривают штамповку в одном или нескольких ручьях.

Помимо штамповки в открытых и закрытых штампах, существует еще один способ горячей штамповки – это штамповка выдавливанием. Сущность данного процесса состоит в том, что заготовку устанавливают в полости штампа, выполненного конструктивно в виде закрытого, но так как в ней имеется выходное отверстие, то часть металла выдавливается через него за пределы основной полости. Отходов здесь не предусматривается. Исключение составляет та часть объема заготовки, которая является избыточной вследствие неточности прокатки и разделки пруткового металла на мерные заготовки. Поковка, полученная в этом штампе, состоит из корпуса, находящегося в основной части полости к концу процесса, и стержневой части, выдавленной через отверстие в полости штампа. Обычно стержневая часть поковки имеет постоянное поперечное сечение, но известны технологические процессы и соответствующие им штампы, которые обеспечивают переменный (конический или ступенчатый) профиль стержневой части выдавленной поковки.

Главное преимущество процесса выдавливания перед штамповкой в открытых штампах состоит в возможности получения поволоков с очень точными размерами и весьма качественной поверхностью. Большим или меньшим выдавливанием металла в стержневую часть поволоков можно фиксировать объем корпуса поволоков, не боясь перегрузки штампа (как при штамповке заготовок с завышенным объемом в закрытом штампе).

К основным недостаткам штамповки выдавливанием относятся высокие удельные усилия, большие энергозатраты на осуществление процесса, а также относительно низкая стойкость инструмента (особенно на участке выходного отверстия).

В штампе для выдавливания различают основную полость, в которой расположен металл до начала процесса, и полость выдавливания, или стержневую полость, в которую металл поступает при оформлении поволоков.

Процесс выдавливания можно подразделить на три стадии: осадка до момента соприкосновения бочкообразной заготовки с боковыми стенками основной полости; заполнение основной полости металлом; выдавливание металла в стержневую полость. Первые две — нестационарные стадии, последняя — стационарная. Однако эти стадии не имеют резко очерченных границ и частично перекрывают друг друга.

На рисунке 20.2 представлены две наиболее распространенные схемы выдавливания и действующие силы применительно к третьей стационарной стадии процесса выдавливания грибовидной поволоков.

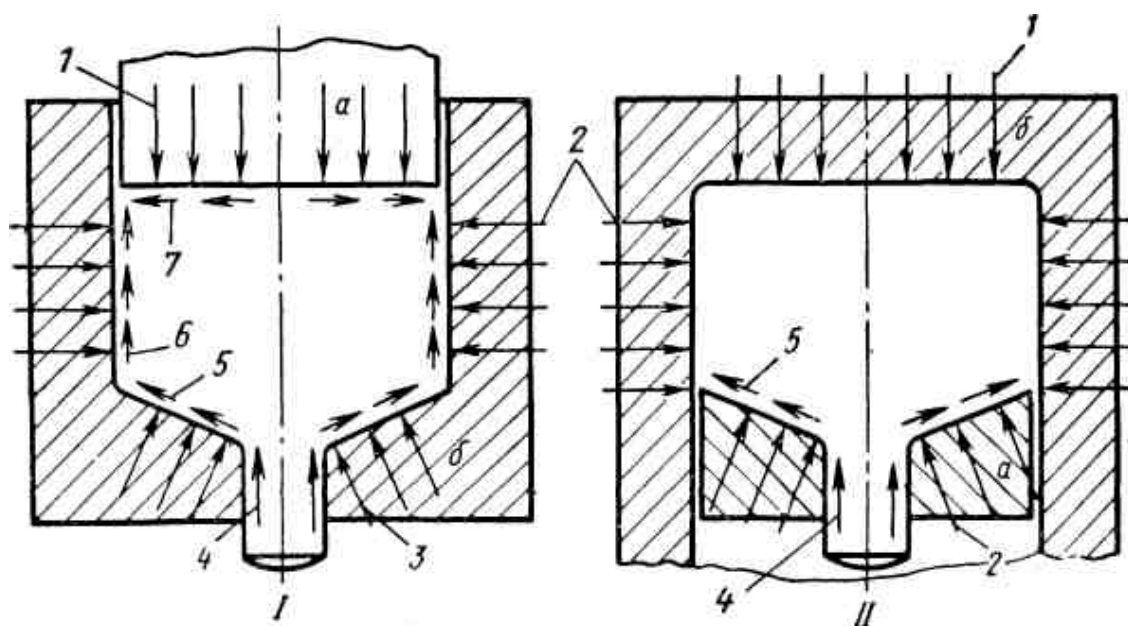


Рис. 20.2. Схемы и действующие силы на третьей стадии выдавливания

Инструмент для выдавливания состоит из пуансона *а* и матрицы *б*. Матрица *б* с основной полостью, в которой размещен корпус поковки, имеет входное отверстие для пуансона и стержневое или выходное отверстие для выдавливания металла. Если выходное (стержневое) отверстие расположено в глухой части полости (рис. 20, I), то выдавливание называют прямым. Если же отверстие расположено в части полости, образуемой движущимися относительно друг друга стенками (рис. 20, II), то выдавливание называют обратным. Схемы действующих сил при прямом и обратном выдавливании неодинаковы. Основное их отличие — силы трения от стенок инструмента. Как видно из рассмотрения рис. 20, схемы выдавливания и усилие для осуществления процессов не зависят от того, какая часть инструмента подвижна, а какая неподвижна. В общем случае могут перемещаться и обе части инструмента. Имеет значение лишь местоположение выходного отверстия (в глухой или противоположной частях основной полости). В зависимости от подвижности той или иной части инструмента изменяется только наименование сил 1 и 3, одни из них являются внешними силами, а другие их реакциями. Боковые силы 2 являются реактивными от внутреннего давления сжатого металла на стенки матрицы. При движении стержня поковки относительно боковой поверхности полости выдавливания возникают силы трения 4, направленные против движения стержня. Силы трения 5 возникают вследствие перемещения металла по направлению к выходному отверстию, силы трения 6 — от перемещения заготовки и 7 — вследствие радиального перемещения металла по направлению к оси полости. При обратном выдавливании возникают только силы трения 4 и 5, так как заготовка находится в глухой части основной полости и неподвижна относительно ее

стенок. Однако в конце процесса заготовка смещается относительно матрицы и появляется соответствующее противонаправление силы трения.

На третьей стадии прямого выдавливания происходит смещение объема заготовки относительно всех стенок полости. В связи с этим на боковой и торцовой стенках полости (см. рис. 20, I), кроме сил трения 4 и 5, возникают силы трения 6 и 7. Силы трения 7 у торца пуансона направлены от его оси к периферии, что согласуется с противоположным направлением соответствующего потока металла, который при прессовании приводит к так называемой пресс-утяжине. Этот дефект в виде воронкообразной выемки образуется в результате вытекания из полости значительного количества металла (более 80%) и при выдавливании поковок обычно не встречается.

На второй стадии выдавливания, которая, как и первая, является нестационарной, действие сил подчинено несколько иной схеме. Как уже отмечалось, эта стадия при выдавливании поковок очень развита и существенно влияет на весь процесс формообразования, поэтому рассмотрим ее более подробно.

На рис. 20.3 представлены начало (левые части схем) и конец (правые части схем) второй стадии выдавливания прямыми и обратными методами. При прямом выдавливании внешние силы P передаются пуансоном 1, который подвижен относительно матрицы 2.

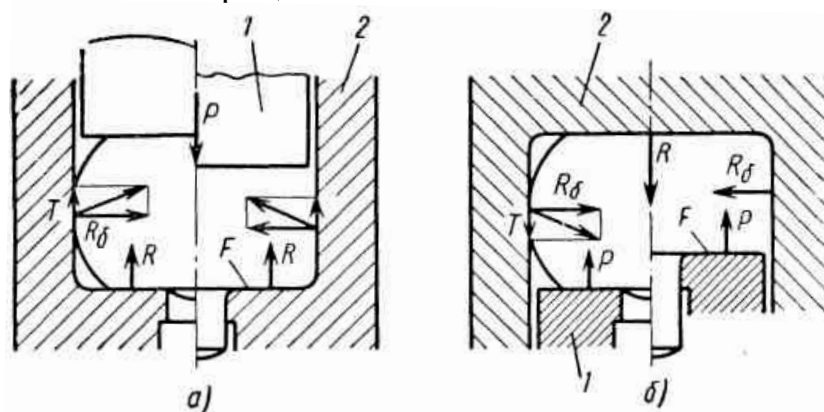


Рис. 20.3. Вторая стадия выдавливания: а — прямое; б - обратное

Вследствие наличия выходного отверстия на одной из торцовых поверхностей полости удельные силы с самого начала процесса на дне матрицы и на пуансоне неодинаковы. На первой стадии прямого и обратного процесса (свободная осадка заготовки) вследствие того, что $P = R$, условия истечения металла в отверстие также неодинаковы. Начало образования стержня может быть при относительно большом диаметре выходного отверстия по сравнению с диаметром заготовки.

С момента соприкосновения бочкообразной заготовки с боковой стенкой полости (вторая стадия выдавливания) возникают боковая реакция R_{δ} , а затем сила трения T , направленная против движения осаживаемой заготовки (остальные силы трения на рис. 20.3 не показаны).

Нетрудно видеть, что направление осадки заготовки в обоих случаях происходит в сторону глухой части полости. Это обуславливает действие боковых сил трения T по направлению от дна глухой полости к пуансону. В результате отклонение равнодействующих сил от сил R_6 и T происходит в разные стороны по отношению к стержневому отверстию. Из условия равновесия для обеих схем:

$$P = R + T. \quad (74)$$

Отсюда можно заключить, что общее усилие, необходимое для осуществления прямого и обратного выдавливания на второй стадии процесса, так же как и на первой его стадии, одинаковое. Однако удельное усилие на поверхности F с отверстием составит меньшую величину при прямом выдавливании:

$$P_{уд} = \frac{D - \dot{O}}{F}, \quad (75)$$

и большую величину при обратном выдавливании:

$$P_{уд} = \frac{P}{F}. \quad (76)$$

Естественно, что обратное выдавливание начнется раньше в процессе возрастания усилия на деформацию заготовки и будет происходить более интенсивно, чем прямое выдавливание. Большая интенсивность процесса на второй стадии обратного выдавливания происходит при одинаковой деформации заготовки по высоте при прямом и обратном выдавливании. Это предопределяет относительно меньшее затекание металла в углы полости вблизи матрицы и позволяет предположить увеличенную протяженность второй стадии обратного выдавливания по сравнению со второй стадией прямого выдавливания.

Меньшее общее усилие обратного выдавливания по сравнению с прямым наблюдается лишь на третьей стадии процесса, поскольку при обратном процессе отсутствуют боковые силы трения и появляются только незадолго до окончания процесса в случае очень тонкой головки поковки. При прямом выдавливании эти силы действуют на всем протяжении процесса, что обуславливает относительно большие усилия и работу деформации. Таким образом, чем больше развита вторая стадия процесса прямого выдавливания и чем, соответственно, меньше третья его стадия, тем меньше разница между прямым и обратным выдавливаниями, с точки зрения величины действующих сил.

Аналогичными остаются схемы выдавливания для поковок с отверстиями с тем отличием, что полая часть поковок образуется при истечении металла в отверстие между пуансоном и матрицей, причем

профиль отверстия матрицы определяет наружные форму и размеры поковок, а профиль сечения пуансона — форму и размеры полости поковок.

21 ХОЛОДНАЯ ОБЪЕМНАЯ ШТАМПОВКА

Холодной объемной штамповкой называют процесс обработки давлением, при котором формоизменение исходной заготовки из сортового проката происходит без предварительного нагрева и сопровождается значительным перераспределением металла в ее поперечном сечении.

Чаще всего этот способ применяют для изготовления массовых изделий небольших размеров: заклепок, гвоздей, болтов, гаек и т.п. Отсутствие нагрева, а следовательно, окалины и тепловых усадок, позволяет получать при помощи холодной объемной штамповки точные детали с допусками на размеры порядка сотых и десятых долей миллиметра, с высокой чистотой поверхности. Исходными заготовками для холодной объемной штамповки служат калиброванный круглый прутки (для метизов) и шайбы, вырубленные из листов.

К операциям холодной объемной штамповки относят осадку, выдавливание, редуцирование, высадку и др.

Свободная осадка происходит в начальной стадии почти всех операций объемной штамповки. Как самостоятельную операцию ее применяют для получения промежуточных заготовок.

При осадке в закрытом штампе (рис. 21.1) под действием пуансона 4 заготовка 3, помещенная в полость матрицы 2, сначала подвергается свободной осадке (рис. 21.1, а), а затем, когда бочкообразная поверхность заготовки коснется стенок полости матрицы, начнется закрытая осадка. Если объем металла заготовки будет больше объема полости штампа, то образуется заусенец (рис. 21.1, б).

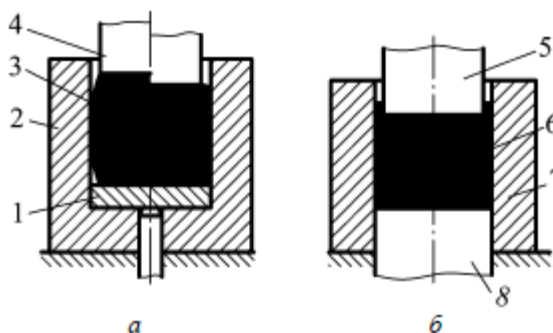


Рис. 21.1. Схемы осадки в закрытом штампе: а – свободная осадка; б – осадка с образованием заусенца; 1, 8 – выталкиватели; 2, 7 – матрицы; 3, 6 – заготовки; 4, 5 – пуансоны

При выдавливании происходит вытеснение металла исходной заготовки 2 в полости матрицы 1 (рис. 21.2). При прямом выдавливании (рис. 21.2, а) истечение металла относительно боковых стенок матрицы происходит в направлении, совпадающем с направлением движения пуансона. Высота заготовки выбирается из условия $H < (2,5-3) D_0$. При этом виде выдавливания в зазоре между пуансоном и матрицей возможно образование заусенца. Слева показана схема прямого выдавливания сплошного стержня, а справа – стержня с внутренней полостью. При обратном выдавливании (рис. 21.2, б) истечение металла происходит в направлении, противоположном движению пуансона 3. Справа показана схема обратного выдавливания полого стержня постоянного сечения. Выдавливанием получают изделия массой от 1 г до 35 кг, диаметром до 220 мм и длиной до 1500 мм. При этом минимальная толщина стенки может достигать 0,1 мм. Процесс особенно эффективен для массового производства, например, тубиков, корпусов снарядов, гильз, деталей автомашин, велосипедов и т.д.

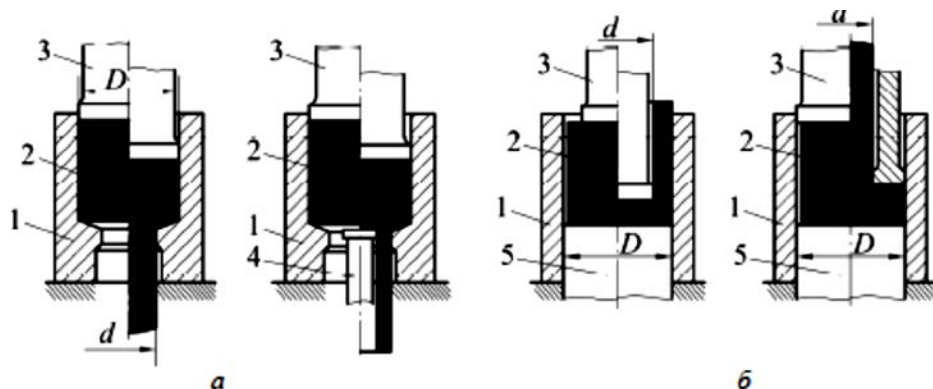


Рис. 21.2. Схема прямого (а) и обратного (б) выдавливания:
1 – матрица; 2 – заготовка; 3, 4 – пуансоны; 5 – выталкиватели

Для холодного выдавливания применяют механические, фрикционные и гидравлические прессы, снабженные выталкивающими устройствами.

В процессе редуцирования (рис. 21.3) происходит уменьшение площади поперечного сечения заготовки при проталкивании ее через матрицу 1 усилием, направленным вдоль оси заготовки 2. В отличие от прямого выдавливания, при редуцировании заготовка не ограничена стенками матрицы.

Степень редуцирования d/D_0 ограничена условием продольной устойчивости свободной части заготовки; продольная устойчивость зависит от длины заготовки, качества ее торцов и продольной кривизны. На рис. 21.3, б показана схема редуцирования полой заготовки 4 на оправке 7.

При высадке происходит осадка части заготовки (рис. 21.4). На рис. 21.4,а показана схема открытой высадки сплошного стержня. Длина высаживаемой части выбирается из условия $H/d \leq 2,5$. Для придания изделию заданной формы применяется высадка в закрытом штампе (рис. 21.4, б). В

этом случае сначала происходит свободная высадка до соприкосновения выпуклой части заготовки со стенками полости пуансона 5 (матрицы), а затем – осадка высаживаемой части заготовки в закрытой полости штампа. При высадке в закрытом штампе заусенец образуется по всему периметру изделия.

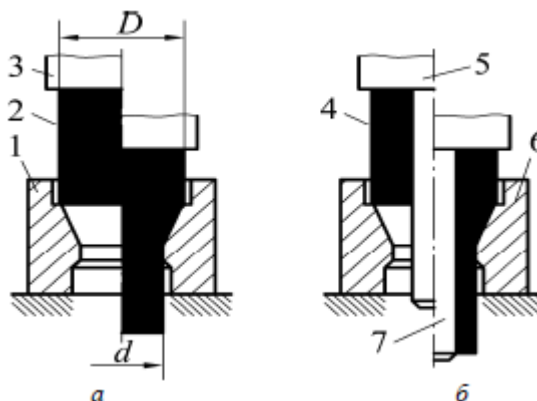


Рис. 21.3. Схемы редуцирования сплошной (а) и полой (б) заготовок: 1, 6 – матрицы; 2, 4 – заготовки; 3, 5 – пуансоны; 7 – оправка; D , d – диаметры заготовки до и после редуцирования

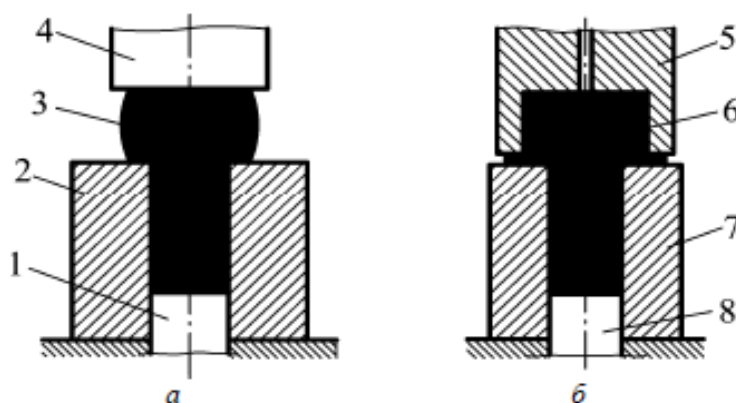


Рис. 21.4. Схема высадки открытой (а) и закрытой в штампе (б): 1, 8 – выталкиватели; 2, 7 – матрицы; 3, 6 – заготовки; 4, 5 – пуансоны

Существенное значение при холодной объемной штамповке имеет подготовка поверхности заготовки: удаление дефектов и очистка поверхности от окалины, жировых и других загрязнений механическим, термическим (нагревание) или химическим (травление) способами; образование на поверхности слоя-носителя смазки; нанесение на поверхность заготовки технологической смазки. Слой-носитель смазки образуется с помощью химической или электрохимической обработки заготовок. Пластическая деформация в этих процессах идет при температурах ниже температуры рекристаллизации, поэтому металл упрочняется тем больше,

чем больше степень деформации. Это используют при замене обработки резанием холодной объемной штамповкой. В ряде случаев упрочнение материала при штамповке заменяет термическую обработку (закалку с отпуском), которая применяется после механической обработки детали. Упрочнение металла сопровождается благоприятным расположением волокон в изделии.

При разработке технологии холодной штамповки следует иметь в виду, что суммарная степень деформации, необходимая для получения изделия из заготовки, может оказаться выше, чем та, которую этот металл способен выдержать без разрушения.

Поэтому обычно сложные детали изготавливают за несколько переходов, осуществляя снятие наклепа между отдельными переходами с помощью термической обработки. Уменьшение разовой деформации в результате распределения суммарной деформации по переходам снижает усилие штамповки и повышает стойкость штампов.

22 ЛИСТОВАЯ ШТАМПОВКА

22.1 Основные виды продукции

Листовая штамповка – процесс получения из листа, полосы, ленты изделий плоской или пространственной формы с заданными конструктивно-геометрическими и структурными параметрами без существенного изменения толщины материала. Процессы листовой штамповки основаны на использовании пластичности обрабатываемых материалов и их упрочнения при обработке. Они обеспечивают точность и стабильность размеров изготавливаемых деталей, что является основным условием их взаимозаменяемости (при достаточной прочности и минимальной массе), позволяющим снижать массу отдельных конструкций и узлов машины. Благодаря этим достоинствам, а также высокому коэффициенту использования металла, листовая штамповка находит широкое применение, как в массовом, так и в мелкосерийном производстве. На дальнейшее развитие технологии листовой штамповки влияют непрерывный рост производства изделий во многих отраслях промышленности, расширение номенклатуры изготавливаемых деталей, специализация производства.

Изделия, полученные листовой штамповкой, используются в авиационной, автомобильной, тракторной промышленности, производстве товаров массового потребления и других отраслях промышленности. Различают толстолистовую и тонколистовую штамповку, причем к тонколистовой штамповке относят штамповку заготовок толщиной менее 4 мм. Тонколистовую штамповку, как правило, ведут в холодном состоянии, а при толщине листа более 10 мм применяют только горячую штамповку.

Процесс листовой штамповки отличается высокой производительностью, легко поддается механизации и автоматизации, обеспечивает высокую точность размеров и хорошее качество поверхности отштампованных деталей.

Номенклатура штампуемых деталей постоянно растет в связи с возможностью изготовления импульсными методами (взрывом, электрогидравлической штамповкой) крупногабаритных деталей, а также необходимостью изготовления мелких деталей из материала толщиной 0,005–0,1 мм.

Для листовой штамповки применяют черные и цветные металлы и сплавы. К черным металлам и сплавам можно отнести сталь (углеродистая обыкновенного качества, углеродистая качественная конструкционная, легированная конструкционная, высоколегированная) и деформируемые сплавы с особыми свойствами (коррозионно-стойкие, жаростойкие, жаропрочные, магнитные и др.). К цветным металлам и сплавам – медь, никель, алюминий, магний, титан и деформируемые сплавы на их основе (латуни, бронзы, дуралюмины и др.).

22.2 Операции листовой штамповки

Различные фазы процесса изготовления детали, при которых происходит изменение формы заготовки, называют операциями. Операции листовой штамповки делят на: разделительные, формоизменяющие, прессовочные и штамповочные.

Разделительные операции. Эти операции предназначены для получения заготовки из листа или ленты. К таким операциям, выполняемым по замкнутому или незамкнутому контуру, относятся (рис. 22.1):

отрезка – полное отделение одной части материала от другой по незамкнутому контуру по прямой или кривой линии;

вырубка – полное отделение металла по замкнутому контуру, причем отделяемая часть является изделием или заготовкой, а оставшаяся часть – отходом;

пробивка – полное отделение металла внутри заготовки по замкнутому контуру, причем вырезанная часть является отходом, а оставшаяся часть – изделием;

обрезка – удаление неровного края или лишнего металла снаружи изделий;

разрезка – разделение заготовок на части по незамкнутому контуру;

надрезка – частичное отделение металла по незамкнутому контуру без удаления отходов;

зачистка – удаление технологических припусков с помощью штампа с образованием стружки для повышения точности размеров и уменьшения шероховатости поверхности штампованной заготовки;

проколка – образование в заготовке отверстия без удаления металла в ОТХОД.

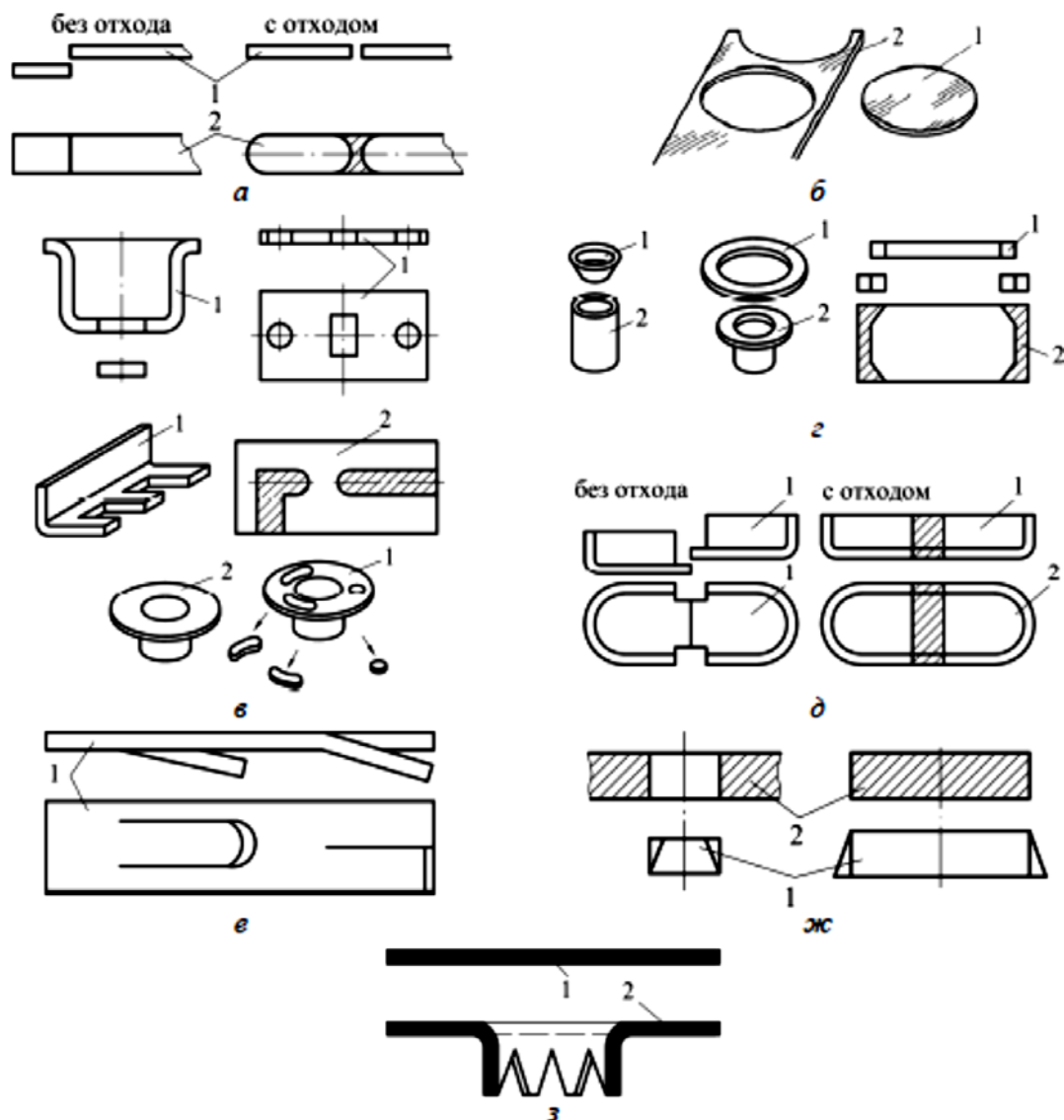


Рис. 22.1. Деталь (1) и исходная заготовка (2), полученная разделительной операцией листовой штамповки: а – отрезкой; б – вырубкой; в – пробивкой; г – обрезкой; д – разрезкой; е – надрезкой; ж – зачисткой; з – проколкой

Формоизменяющие операции. Формоизменяющими называют операции листовой штамповки, в результате которых изменяется форма заготовки путем пластического деформирования. К ним относятся (рис. 22.2):

гибка – образование или изменение углов между частями заготовки или придание ей криволинейной формы;

скручивание – поворот части заготовки вокруг продольной оси;

закатка – образование закругленных бортов на краях полой заготовки;

правка давлением (правка) – устранение искажений формы заготовки;

вытяжка – образование полой заготовки или изделий из плоской или полой исходной заготовки;

рельефная формовка – образование рельефа в листовой заготовке за счет местных растяжений без обусловленного изменения толщины металла;

отбортовка – образование борта по внутреннему и (или) наружному контуру заготовки;

раздача – увеличение размеров поперечного сечения части полой заготовки путем одновременного воздействия инструмента по всему периметру;

обжим в штампе – уменьшение размеров поперечного сечения части полой заготовки путем одновременного воздействия инструмента по всему ее периметру.

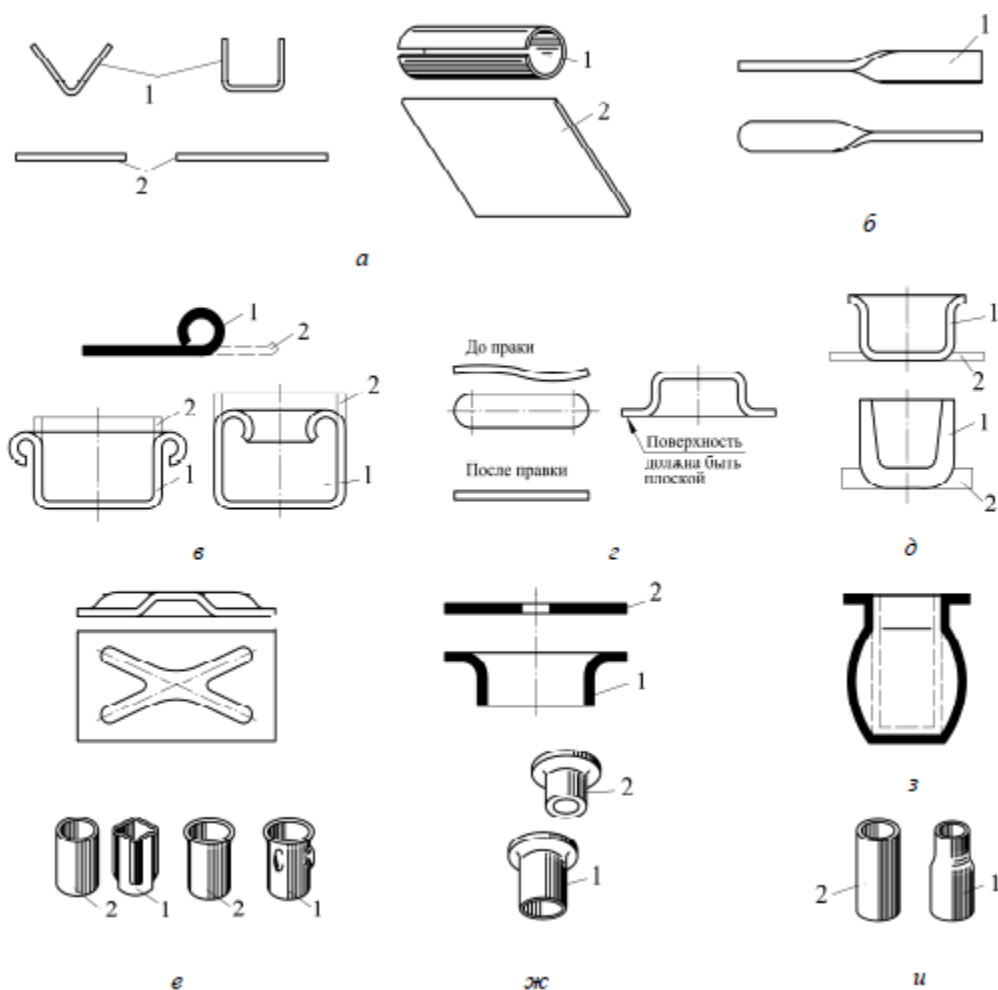


Рис. 22.2. Деталь (1) и исходная заготовка (2), полученная формоизменяющей операцией листовой штамповки: а – гибкой; б – скручиванием; в – закаткой; г – правкой; д – вытяжкой; е – рельефной формовкой; ж – отбортовкой; з – раздачей; и – обжимом в штампе

Прессовочные операции. К прессовочным операциям, осуществляемым из листового материала, относят чеканку, клеймение (маркировку) и разметку (кернение). Все эти операции основаны на перераспределении и перемещении части или всего объема металла заготовки в процессе штамповки.

Они характеризуются общностью схемы напряженного состояния (неравномерное объемное сжатие).

Чеканкой называется штамповочная операция, при которой происходит изменение формы изделия, большей частью плоского, осуществляемое между верхней и нижней частями штампа. При этом материал изменяет свою толщину и вследствие перемещения заполняет все углубления на поверхности штампа. Чеканка в листовой штамповке применяется главным образом для изготовления монет, медалей, а также художественных изделий и предметов широкого потребления: часовых деталей, столовых приборов и др.

Чеканка применяется и в комбинации с другими операциями (вытяжкой, отбортовкой и т.д.).

Операции клеймения (маркировки) аналогичны чеканке, но глубина распространения деформации в металл у них меньше, поэтому они требуют меньших удельных усилий. Клеймением наносят на поверхность деталей рельефные надписи, номера, обозначения и т.д.

Разметка, или кернение, в штампах применяется для нанесения лунок – центров под сверление мелких отверстий при обработке точных деталей в массовом и крупносерийном производстве. Разметка широко распространена в часовом производстве и в приборостроении. Достижимая точность разметки керновочным штампом составляет $\pm 0,02$ и $\pm 0,03$ мм. Для керновочных операций применяется такое же оборудование, как и для чеканки.

Штамповочные операции. Широкое распространение в листовой штамповке получили операции сборки различных деталей, особенно в приборостроении, точной механике, электро- и радиотехнике и в производстве изделий массового потребления.

Методы сборки листовых деталей штамповкой основаны на применении операций гибки, отбортовки, обжима и их комбинации. Большинство из них дает довольно прочное неразъемное соединение.

Формы деталей и способы их соединения могут быть различные: соединения двух плоских, согнутых или вытянутых деталей между собой; соединение листовой детали со стержнем путем его расклепки или с точеной втулкой путем развальцовки и др.

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Лежнев Сергей Николаевич

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ
ДАВЛЕНИЕМ**

Учебное пособие. – Темиртау: КГИУ, 2013. – 124 с.

Подписано к печати 07.02.2013 года. Формат 60×60 1/16

Усл. печ. л. 7,75.

Тираж 500. заказ № 55