

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

В.Р. КАРГИН, Б.В. КАРГИН

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 15.03.01 Машиностроение, 22.03.02 Металлургия

САМАРА
Издательство Самарского университета
2019

УДК 621.77(075)

ББК 34.5я7

K218

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. И.П. Попов;
канд. техн. наук, доц. А.П. Быков

Каргин, Владимир Родионович

K218 Теория обработки металлов давлением: учеб. пособие /
В.Р. Каргин, Б.В. Каргин – Самара: Изд-во Самарского университета, 2019 – 112 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-1458-7

Изложены теоретические основы обработки металлов давлением: физическая сущность обработки давлением, виды деформаций, роль внешнего трения, механические схемы деформаций, неравномерность деформаций. Приведены теоретические и экспериментальные методы расчета усилий и деформаций, температурно-скоростных условий для анализа различных процессов обработки металлов давлением.

Учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров по направлениям 15.03.01 Машиностроение и 22.03.02 Металлургия по дисциплине «Теория обработки металлов давлением».

Подготовлено на кафедре обработки металлов давлением.

УДК 621.77(075)

ББК 34.5я7

ISBN 978-5-7883-1458-7

© Самарский университет, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
1 Силовые условия процесса деформирования	9
1.1 Основные положения расчета деформирующего усилия....	9
1.2 Пример расчета деформирующего усилия.....	13
1.3 Контрольные вопросы.....	14
2 Метод совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности.....	15
2.1 Основные положения расчета деформирующего усилия....	15
2.2 Упрощенное уравнение равновесия для плоского деформированного состояния	19
2.3 Упрощенное уравнение равновесия для осесимметричного напряженного состояния	21
2.4 Упрощенное уравнение равновесия для плоского напряженного состояния	23
2.5 Алгоритм решения практических задач.....	25
2.6 Пример использования метода.....	26
2.7 Контрольные вопросы.....	28
3 Метод линий скольжения	29
3.1 Основные понятия линий скольжения	29
3.2 Основные свойства линий скольжения	32
3.3 Пример использования метода.....	36
3.4 Контрольные вопросы.....	38
4 Метод сопротивления материалов пластическим деформациям	39
4.1 Основные положения метода	39
4.2 Пример использования метода.....	40
4.3 Контрольные вопросы.....	43
5 Метод работ	43
5.1 Основные положения метода	43
5.2 Пример использования метода.....	45
5.3 Контрольные вопросы.....	47

6 Показатели пластической деформации.....	47
6.1 Абсолютные и относительные деформации	47
6.2 Логарифмические деформации. Коэффициенты деформации.....	49
6.3 Смещенный объем. Условие постоянства объема	52
6.4 Определение числа переходов. Условие постоянства секундных объемов	54
6.5 Средняя скорость деформации.....	55
6.6 Контрольные вопросы.....	57
7 Внешнее трение в обработке металлов давлением	58
7.1 Понятие внешнего трения	58
7.2 Роль трения в процессах пластического деформирования	60
7.3 Виды внешнего трения	63
7.4 Законы трения.....	66
7.5 Основные факторы, влияющие на трение.....	70
7.6 Контрольные вопросы.....	73
8 Механические схемы деформаций.....	74
8.1 Основные понятия.....	74
8.2 Диаграмма видов напряженного состояния.....	77
8.3 Контрольные вопросы.....	80
9 Температурно-скоростные условия пластической деформации.....	81
9.1 Классификация видов пластической деформации	81
9.2 Тепловой эффект деформации	83
9.3 Температурный режим горячей деформации	85
9.4 Контрольные вопросы.....	88
10 Неравномерность деформации	89
10.1 Неравномерность деформации и дополнительные напряжения	89
10.2 Причины неравномерности деформаций	91
10.3 Остаточные напряжения	93
10.4 Контрольные вопросы.....	95

11 Принцип наименьшего сопротивления	96
11.1 Формулировка принципа	96
11.2 Принципы кратчайшей нормали и наименьшего периметра	98
11.3 Контрольные вопросы.....	100
12 Экспериментальные методы исследования напряженно- деформированного состояния	100
12.1 Метод координатной делительной сетки	100
12.2 Метод визиопластичности.....	103
12.3 Определение нормальных контактных напряжений.....	104
12.4 Контрольные вопросы.....	107
Список рекомендуемой литературы	108

ВВЕДЕНИЕ

Теория обработки металлов давлением – это прикладная инженерная дисциплина, связанная с предшествующими дисциплинами учебного плана: математика, механика сплошных сред, материаловедение, термическая обработка, технологические процессы в машиностроении и металлургии. Дисциплина тесно связана и с последующими изучаемыми дисциплинами: «Теория и технология прокатки», «Теория и технология прессования», «Теория и технологияковки и горячей объемной штамповки», «Теория и технология холодной листовой штамповки».

Объект изучения дисциплины – это процессы пластического деформирования металлов: ковка, горячая объемная штамповка, холодная листовая штамповка, прокатка, прессование, волочение.

Предмет изучения дисциплины – это теоретические основы, методы проектирования и моделирования технологических процессов обработки металлов давлением (ОМД), обеспечивающих получение заготовок и готовых изделий требуемой формы и размеров, структуры и эксплуатационных свойств.

Сущностью современного технологического процесса обработки давлением является получение изделий из металлических, конструкционных, композитных и наноструктурированных материалов с заданным уровнем свойств (физических, механических и эксплуатационных) и качеством поверхности. Изделия максимально приближены по форме и размерам к готовым деталям машин, механизмов и других устройств.

В настоящее время считается бесспорным, что пластичность является состоянием металлов и зависит от температуры (термические условия), скорости и степени деформации (деформационные условия), схемы напряженного состояния, внешнего трения (механические условия).

Пластическая деформация является эффективным способом изменения механических и физических свойств металлов. Пла-

стической деформацией можно увеличить прочность сплавов, которые термически не упрочняются.

Изделия получают пластическим деформированием в холодном или горячем состоянии с использованием универсального и специализированного инструмента на оборудовании с минимальными затратами материалов, энергии, времени и труда.

К оборудованию относят прокатные станы, гидравлические и кривошипные прессы, молоты, горизонтальные ковочные машины. В качестве деформирующего инструмента применяют листовые и сортопрокатные валки, штампы для холодной и горячей объемной штамповки, матрицы, контейнеры.

Для реализации процессов пластического деформирования используется следующая структурная схема (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема процессов обработки металлов давлением

Любой технологический процесс состоит из последовательных операций обработки металлов давлением. Разработать технологический процесс – значит разработать все операции. На рис. 2 в качестве примера рассмотрен процесс прессования профиля из алюминиевого сплава в виде последовательности технологических операций и решаемые для их реализации на производстве задачи.

Из анализа приведенного примера видно, что при проектировании технологических процессов обработки металлов давлением специалисту приходится решать в общем случае следующие основные задачи:

- определять геометрические размеры и форму исходной заготовки перед и после технологической операции, степень ее деформации, число переходов, обеспечивающих высокую производительность, низкую себестоимость и высокое качество готовых изделий;

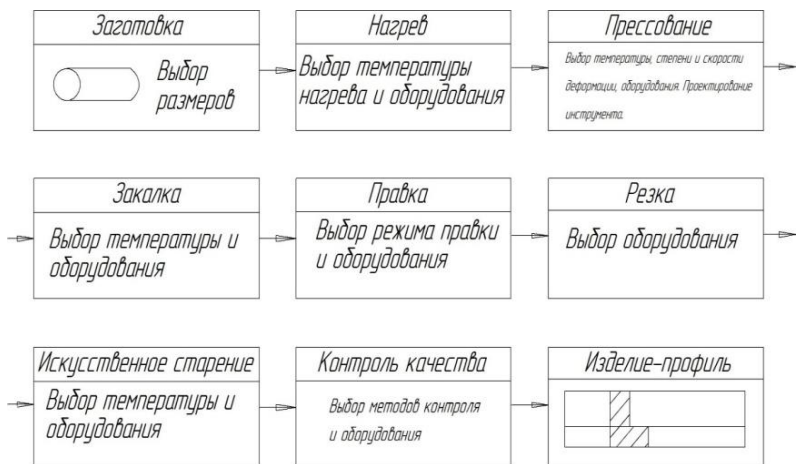


Рис. 2. Технологическая схема изготовления прессованного профиля «УГОЛОК» из алюминиевого сплава Д16, состояние поставки Т1

- определять температуру нагрева заготовки и инструмента, скорость деформирования, при которых будет осуществляться технологическая операция;
- оценивать предельные возможности пластической деформации заготовки без разрушения в ходе выполнения технологической операции;
- устанавливать влияние обработки давлением на структуру металла, изменение механических свойств, неравномерность распределения деформации;
- проводить расчет величины усилия и работы, необходимые для выбора основного оборудования, проектирования и расчета инструмента на прочность;
- моделировать напряженно-деформированное состояние металла заготовки при осуществлении операции, исключая появление дефектов.

Таким образом, теория обработки металлов давлением – это комплексная инженерная дисциплина, включающая в себя такие дисциплины как математика, физика, кристаллография, металлосведение, сопротивление материалов, термическая обработка, механика сплошных сред.

1 СИЛОВЫЕ УСЛОВИЯ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ

1.1 Основные положения расчета деформирующего усилия

В процессах пластического деформирования участвуют два тела: инструмент и заготовка. Например, в процессе кузнечной протяжки воздействие инструмента (плоских бойков) на заготовку образует очаг пластической деформации (ОПД) (рис. 3). Он ограничен свободной поверхностью 1, поверхностями контакта с бойками 2 и границей внешнего участка заготовки 3.

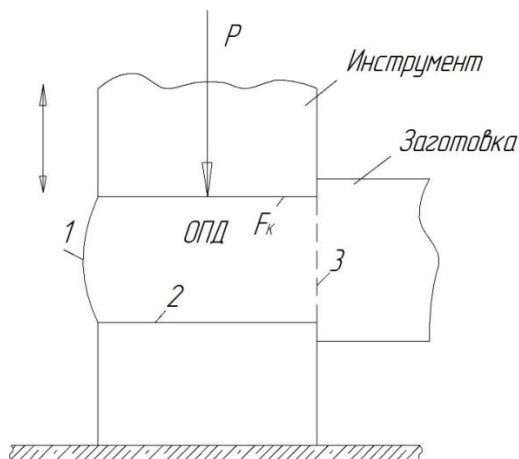


Рис. 3. Схема процесса протяжки заготовки на плоских бойках

Взаимодействие инструмента и заготовки по поверхности контакта с точки зрения величины и направления удобно выражать активной силой P . В теории обработки металлов давлением ее принято называть деформирующим усилием.

Вместо деформирующего усилия часто используют удельное усилие (давление), которое рассчитывается как отношение полного усилия P к проекции контактной поверхности F_k на плоскость, перпендикулярную направлению полного усилия:

$$p = \frac{P}{F_k}.$$

Для сравнительных расчетов пластической деформации заготовок из разных материалов целесообразно использовать безразмерные величины удельных усилий $\frac{p}{\sigma_m}$, где σ_m – предел текучести деформируемого металла.

Зная величину деформирующего усилия, можно выбрать требуемое оборудование, степень деформации заготовки за один переход, полную работу и энергию пластической деформации, рассчитать инструмент на прочность.

Для определения величины деформирующего усилия необходимо знать величину и распределение нормальных и касательных напряжений на поверхности контакта (рис. 4).

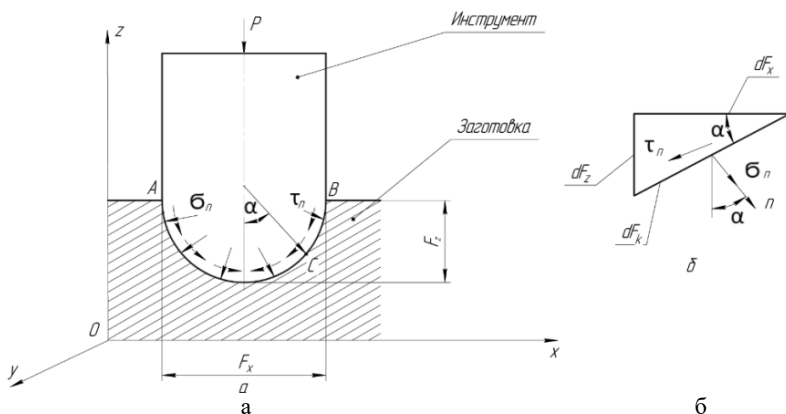


Рис. 4. Схема деформации заготовки выпуклым инструментом

Пусть рабочая поверхность инструмента (штампа) АВ имеет криволинейную форму. На контактной поверхности заготовки и штампа известно распределение нормальных σ_n и касательных τ_n

напряжений. Деформирующее усилие P действует в направлении движения верхнего инструмента.

Силой деформирования называют результирующую силу элементарных сил, действующих со стороны штампа на заготовку (рис. 4,а).

Элементарными силами являются нормальные контактные напряжения σ_n и контактные касательные напряжения трения τ_n , действующие по нормали и по касательной к элементу контактной поверхности между штампом и заготовкой.

Выделим в окрестности точки C на контактной поверхности АВ бесконечно малый элемент с площадкой dF_k , в пределах которого σ_n и τ_n можно считать постоянными (рис. 4,б).

Тогда элементарная сила, действующая на этот элемент заготовки по нормали

$$dP_n = \sigma_n dF_k.$$

Элементарная касательная сила

$$dP_\tau = \tau_n dF_k.$$

Пусть верхняя половина штампа движется параллельно оси Z . Проекция полной элементарной силы

$$dP = \sigma_n dF_k \cos \alpha + \tau_n dF_k \sin \alpha, \quad (1)$$

где α – угол между нормалью к элементу и осью OZ .

Так как $dF_z = dF_k \cos \alpha$ и $dF_x = dF_k \sin \alpha$, где dF_z и dF_x – проекции dF_k на плоскости, перпендикулярные осям z и x . Тогда уравнение (1) примет вид:

$$dP = \sigma_n dF_z + \tau_n dF_x. \quad (2)$$

Сравнение (1) и (2) показывает возможность замены проектирования внешних сил на некоторое направление проецирования контактных поверхностей.

Для определения деформирующего усилия необходимо провести интегрирование уравнения (2). Получим

$$P = \int_0^{F_z} \sigma_n dF_z + \int_0^{F_x} \tau_n dF_x. \quad (3)$$

Часто $\tau_n = 0$ на конечных стадиях заполнения штампа металлом, поэтому

$$P = \int_0^{F_z} \sigma_n dF_z.$$

Уравнение (3) в декартовых и цилиндрических координатах примет вид

$$P = \iint_F \sigma_n dx dy + \iint_F \tau_n dx dy, \quad (4)$$

$$P = \iint_F \sigma_n \rho d\rho d\vartheta + \iint_F \tau_n \rho d\rho d\vartheta.$$

Деформирующее усилие в зону пластической деформации может передаваться заготовке либо непосредственным контактом с ней подвижного инструмента (рис. 3, 4), либо посредством прилегающих пластически не деформируемых участков заготовки, как, например, при волочении (рис. 5) круглых прутков. Деформирующее усилие приложено к прутку на выходе из канала волоки.

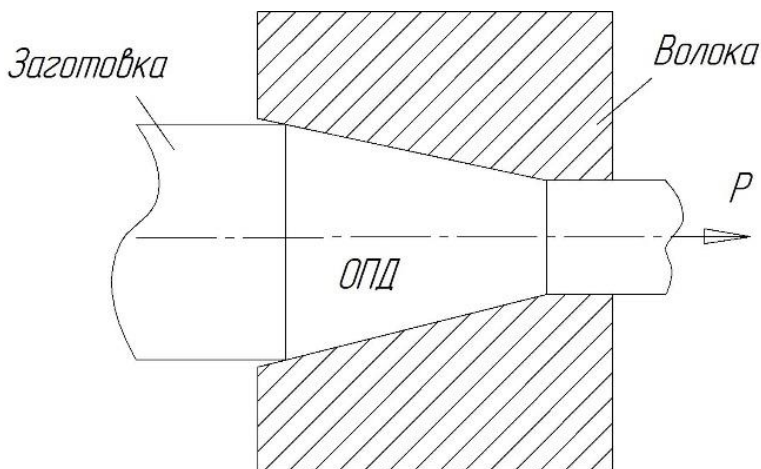


Рис. 5. Схема операции волочения прутков

1.2 Пример расчета деформирующего усилия

Определить выражение для расчета полного, удельного и безразмерного усилия при осадке длинномерной прямоугольной полосы с размерами $a \times h \times b$ на плоских параллельных плитах (бойках) в условиях плоской деформации.

Закон распределения на контактной поверхности нормального напряжения имеет вид

$$\sigma_z = \beta \sigma_T \left[1 + \frac{2\mu}{ah} \left(\frac{a^2}{4} - x^2 \right) \right], \quad (5)$$

где β – коэффициент Лоде, для плоской деформации $\beta=1,15$;
 μ – коэффициент внешнего трения.

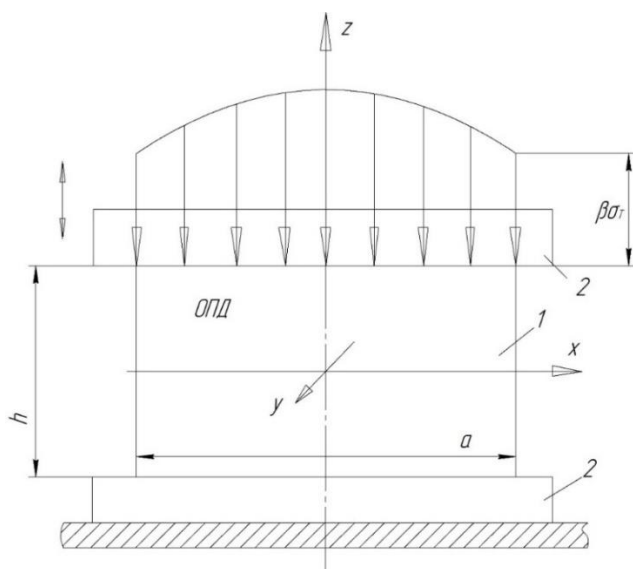


Рис. 6. Схема осадки прямоугольной длинномерной заготовки на плоских параллельных плитах

На рис. 6 дана схема осадки длинномерной заготовки 1 в плоских параллельных плитах 2. В связи с тем, что $l \gg h$ и $l \gg a$, деформация в направлении оси y принимается равной нулю.

Построим график распределения нормальных напряжений σ_z на контактной поверхности. Из анализа распределения σ_z на контактной поверхности по формуле (5) следует, что при $x = 0,5a$ $\sigma_z = \beta\sigma_T$, при $x=0$ $\sigma_z = \beta\sigma_T(1+\mu a/2h)$. Эпюра распределения имеет параболический характер.

При определении деформирующего усилия P используем декартовую систему координат. Тогда

$$P = \iint_{F_k} \sigma_z dx dy,$$

где F_k – площадь контактной поверхности, $F_k = a \times l$.

Принимаем условие симметрии процесса осадки относительно оси Z :

$$P = 2 \int_0^l dy \int_0^{0,5a} \beta\sigma_T \left[1 + \frac{2\mu}{ah} \left(\frac{a^2}{4} - x^2 \right) \right] dx. \quad (6)$$

После интегрирования выражения (6) формулы для расчета деформирующего, удельного и безразмерного усилия примут соответственно вид:

$$P = \beta\sigma_T F_k \left(1 + \frac{1}{3} \frac{\mu a}{h} \right),$$

$$p = \beta\sigma_T \left(1 + \frac{1}{3} \frac{\mu a}{h} \right),$$

$$\frac{p}{\beta\sigma_T} = \left(1 + \frac{1}{3} \frac{\mu a}{h} \right).$$

1.3 Контрольные вопросы

1. Дайте определение деформирующей силы.
2. Запишите формулу для нахождения силы деформирования.
3. Для чего надо знать величину деформирующей силы?

4. Что нужно знать для определения деформирующей силы?
5. Запишите уравнение для нахождения деформирующей силы в декартовой системе координат.
6. Запишите уравнение для нахождения деформирующей силы в цилиндрической системе координат.
7. Как может передаваться деформирующая сила заготовке?

2 МЕТОД СОВМЕСТНОГО РЕШЕНИЯ ПРИБЛИЖЕННЫХ УРАВНЕНИЙ РАВНОВЕСИЯ И ПЛАСТИЧНОСТИ

Метод широко применяется в процессах обработки металлов давлением для расчета усилий деформирования и расхода энергии.

2.1 Основные положения расчета деформирующего усилия

- Напряженно-деформированное состояние при деформировании заготовки рассматривается как плоское деформированное либо плоское напряженное, либо осесимметричное напряженное состояние. В случае сложности формы деформируемой заготовки необходимо ее разбить условно на ряд объемов, на которые можно наложить условие осесимметричной или плоской задачи.

Плоское напряженное состояние реализуется приближенно для тонкой пластины, у которой один основной размер значительно меньше, чем другие (рис. 7). По контуру пластины действуют силы, распределенные равномерно по ее толщине и параллельно плоскости пластины. В таком случае компоненты напряжений, содержащие индексы y , σ_y , τ_{xy} , τ_{yz} , равны нулю на обеих плоских поверхностях пластины и можно предположить, что они отсутствуют по всей толщине пластины. Три другие компоненты напряжений σ_x , σ_z , τ_{xz} будут постоянными по всей толщине пластины.

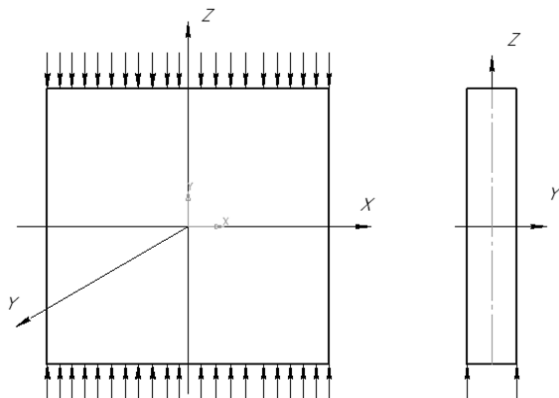


Рис. 7. Схема плоского напряженного состояния

Плоское напряженное состояние широко применяется при анализе процессов листовой штамповки, например во фланце при вытяжке детали из листового материала и при обжиге тонкостенных труб.

Плоское деформированное состояние приближенно реализуется для заготовки, у которой один основной размер значительно больше, чем другие (рис.8). В сечениях, перпендикулярных оси Z, перемещения всех точек тела описываются уравнениями:

$$U_x = U_x(x, z),$$

$$U_z = U_z(x, z),$$

$$U_y = 0.$$

В процессах обработки металлов давлением примерами плоского деформированного состояния являются прокатка широких тонких листов, когда ширина листа остается постоянной (прокатка без уширения), длинномерный брус, подвергающийся осадке в направлении толщины.

Осесимметричное напряженное состояние реализуется для тела вращения, к поверхности которого приложены распределенные нагрузки, расположенные симметрично относительно его оси и одинаковые во всех меридиональных сечениях (рис. 9).

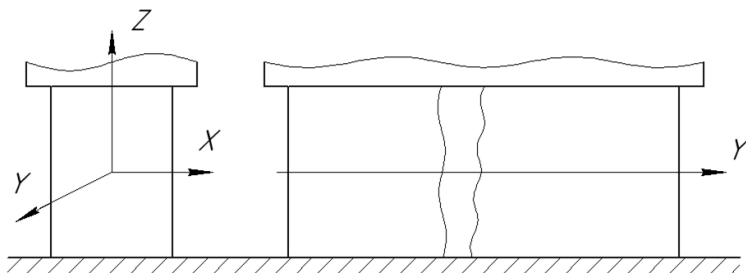


Рис. 8. Схема плоского деформированного состояния

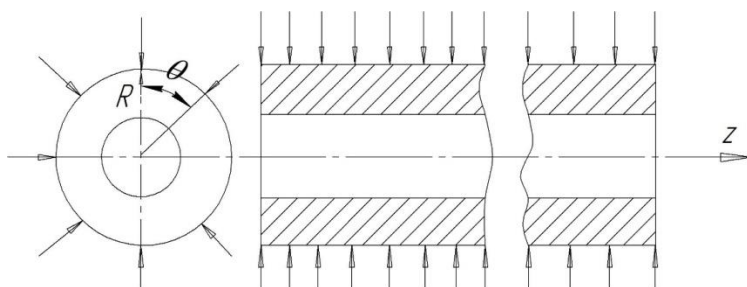


Рис. 9. Схема осесимметричного напряженного состояния

При рассмотрении процессов обработки металлов давлением, таких как осадка цилиндрической заготовки, прессование и волочение прутков и труб, а также деформация круглой толстостенной трубы, находящейся под равномерным наружным и внутренним давлением, можно использовать осесимметричное напряженное состояние.

При анализе осесимметричного напряженного состояния удобнее пользоваться цилиндрическими координатами R, θ, Z вместо декартовых X, Y, Z .

- Дифференциальные уравнения равновесия для плоской задачи по деформациям или напряжениям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

и осесимметричной задачи

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} &= 0\end{aligned}\tag{8}$$

упрощают принятием допущений:

- нормальные напряжения зависят только от одной координаты,
- зависимость касательных напряжений по соответствующей координате принимают линейной.

Благодаря этим допущениям остается только одно дифференциальное уравнение равновесия. В нем вместо частных производных можно использовать обыкновенные производные.

Принятые допущения исключают возможность определения напряжений в каждой точке деформируемого тела.

- Распределение нормальных напряжений определяют только на контактной поверхности заготовки и инструмента, что позволяет произвести вычисление деформирующего усилия.
- Условия пластичности принимают в форме, соответствующей частным случаям объемного напряженно-деформируемого состояния.

При плоской деформации, плоском напряженном состоянии и осесимметричной деформации приближенные условия пластичности имеют вид:

$$\begin{aligned}\sigma_\rho - \sigma_\theta &= \pm \beta \sigma_T \text{ или } d\sigma_\rho = d\sigma_\theta, \\ \sigma_\theta - \sigma_z &= \pm \beta \sigma_T \text{ или } d\sigma_\theta = d\sigma_z, \\ \sigma_z - \sigma_\rho &= \pm \beta \sigma_T \text{ или } d\sigma_z = d\sigma_\rho, \\ \sigma_x - \sigma_z &= \pm \beta \sigma_T \text{ или } d\sigma_x = d\sigma_z.\end{aligned}\tag{9}$$

В научно-технической литературе рассматриваемый метод встречается под названиями «инженерный метод», «метод тонких сечений», «гипотеза плоских сечений». Согласно последнему названию плоские сечения, проведенные в теле до деформации, остаются плоскими в течение всего процесса обработки металла.

2.2 Приближенное уравнение равновесия для плоского деформированного состояния

Рассмотрим осадку призматической полосы шириной $2b$, высотой $2h$, ограниченной длины между плоскими шероховатыми плитами в декартовой системе координат (рис. 10). Начало координат расположено в центре поперечного сечения полосы. Так как длина заготовки в направлении оси Y неограниченно велика, то деформированное состояние будет плоским, то есть $\varepsilon_y = 0$. Во всех поперечных сечениях, перпендикулярных оси Y , картина деформации одинаковая.

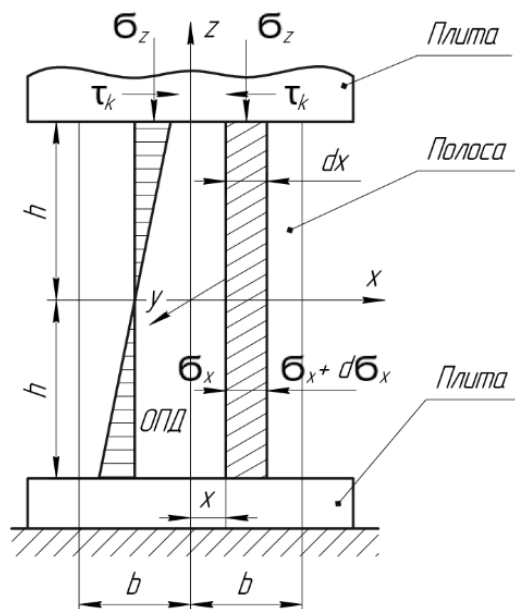


Рис. 10. Схема напряжений при осадке призматической полосы между плоскими шероховатыми плитами

Вследствие симметрии сечения полосы относительно оси Z определим напряжения для правого участка очага пластической деформации. Выделим в полосе бесконечно малый объем толщиной dx двумя плоскостями, параллельными оси Z , расположенными

ми на расстояниях x и $x+dx$ от начала координат. Длину этого элементарного объема в направлении оси Y примем равной единице. На выделенный элементарный объем действуют нормальные напряжения σ_z , σ_x , $\sigma_x+d\sigma_x$ и касательные напряжения τ_K .

Согласно второму допущению принимаем, что нормальные напряжения σ_z, σ_x не зависят от координаты Z , то есть постоянны по высоте по координате Z , а зависят только от координаты X . Тогда второе дифференциальное уравнение равновесия системы (6) тождественно обращается в нуль. Остается только первое уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0.$$

Касательное напряжение τ_{xz} переменное по высоте полосы, на контактной поверхности равно τ_K . На рисунке τ_K – это касательное напряжение, обусловленное трением полосы об инструмент. Величина τ_{xz} уменьшается при удалении от контактной поверхности. На средней высоте полосы $\tau_{xz} = 0$. Примем, что τ_{xz} зависит от высоты полосы линейно, то есть

$$\tau_{xz} = \frac{\tau_K Z}{h}.$$

Тогда

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\tau_K}{h}.$$

После подстановки $\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$ в первое уравнение системы (6) получаем приближенное уравнение равновесия, выраженное через обыкновенную производную

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{\tau_K}{h} = 0.$$

Это уравнение можно легко получить непосредственно из условия равновесия выделенного элемента толщиной dx на рис. 10. Сумма всех сил, действующих на выделенный элемент, на ось X равна 0, то есть

$$\sigma_x 2h - (\sigma_x + d\sigma_x) 2h - 2\tau_K dx = 0.$$

Тогда

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{\tau_K}{h} = 0.$$

2.3 Упрощенное уравнение равновесия для осесимметричного напряженного состояния

В качестве примера получения упрощенного уравнения равновесия рассмотрим задачу по осадке цилиндрической заготовки под плоскими шероховатыми плитами (рис.11). Используем цилиндрическую систему координат (ρ, θ, z) . Начало координат возьмем на пересечении осей симметрии очага пластической деформации. Так как задача осесимметричная и все направления по координате θ равноправны, то компоненты напряжений не зависят от координаты θ . Уравнения равновесия имеют вид (7). Согласно гипотезе тонких сечений выделим в очаге деформации элементарный кольцевой слой толщиной $d\rho$. На этот слой действуют

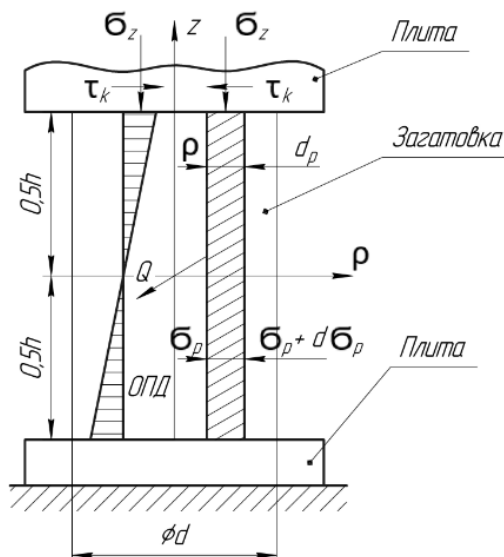


Рис.11. Расчетная схема при осадке цилиндрической заготовки

радиальные и осевые напряжения σ_ρ , σ_z , не зависящие от координаты z , и касательные напряжения τ_K .

Касательные напряжения $\tau_{\rho z}$, вызванные трением на контактной поверхности, не зависят от координаты ρ , так как трение в этом направлении постоянно и изотропно, изменяется по линейному закону в зависимости от координаты z .

Тогда в уравнениях равновесия (7), согласно принятым допущениям:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0; \quad \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} = \frac{d\sigma_\rho}{d\rho}; \\ \frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} &= 0; \quad \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} = \frac{2\tau_K}{h}.\end{aligned}$$

Окончательно получаем упрощённое уравнение равновесия, выраженное через обыкновенную производную:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} + \frac{2\tau_K}{h} = 0. \quad (10)$$

Это уравнение можно получить другим способом, проинтегрировав первое выражение системы (7) по z в пределах от 0 до $0,5h$:

$$\int_0^{0,5h} \frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} dz + \int_0^{0,5h} \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} dz + \int_0^{0,5h} \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} dz = 0$$

или

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} \int_0^{0,5h} dz + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} \int_0^{0,5h} dz + \int_0^{0,5h} \partial \tau_{\rho z} = 0.$$

Окончательно имеем уравнение (10).

Если принять допущение, что бочкообразование при осадке отсутствует, то можно принять условие $\sigma_\rho \approx \sigma_\theta$, $\varepsilon_\rho \approx \varepsilon_\theta$. Тогда упрощённое уравнение равновесия имеет вид:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{2\tau_K}{h} = 0.$$

2.4 Упрощенное уравнение равновесия для плоского напряженного состояния

Вывод упрощенных уравнений равновесия при деформации тонкостенной листовой заготовки основан на следующих допущениях:

1. При осесимметричной деформации тонкостенной заготовки все напряжения не зависят от координаты θ , поэтому σ_θ – это главное напряжение, а касательные напряжения $\tau_{r\theta} = \tau_{z\theta} = 0$.

2. Толщина листовой заготовки S постоянна и значительно меньше радиусов кривизны в меридиональном R_p и широтном R_θ направлениях.

3. Принимается схема плоского напряженного состояния $\sigma_z = \tau_{pz} = \tau_{z\theta} = 0$. Нормальные напряжения считаем главными и постоянными по толщине стенки оболочки и приведенными к средней поверхности заготовки.

4. Касательные напряжения τ_k , вызванные трением на контактной поверхности оболочки и инструмента, можно учесть законом Кулона–Амонтона.

$$\tau_k = \mu \sigma_k.$$

5. Очаг пластической деформации следует разделить на участки, в которых кривизна срединной поверхности заготовки в меридиональных сечениях постоянна, как показано на рис. 12.

Рассмотрим тонкостенную оболочку вращения двойной кривизны толщиной S относительно оси $O-O_1$ (рис. 13).

Выделим в очаге пластической деформации бесконечно малый элемент, имеющий постоянную кривизну в меридиональном сечении двумя плоскостями, проходящими через ось симметрии $O-O$, составляющими между собой угол $d\varphi$, и двумя круговыми коническими поверхностями, составляющими между собой угол $d\alpha$.

Все напряжения, действующие на выделенный бесконечно малый элемент оболочки, считаем постоянными по толщине оболочки S и приведенными к срединной поверхности.

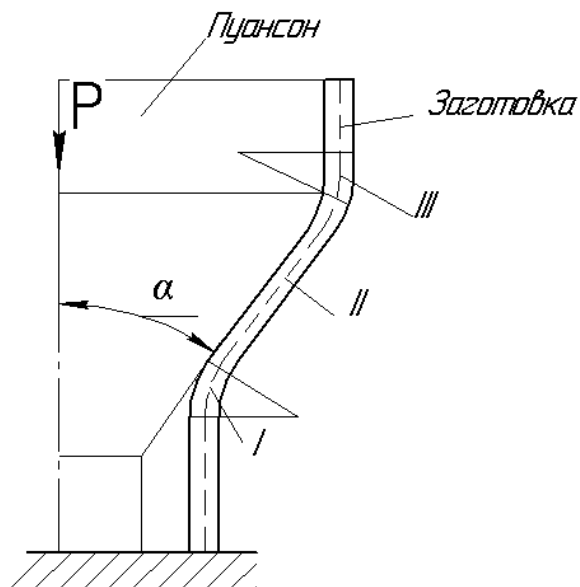


Рис. 12. Схема процесса раздачи

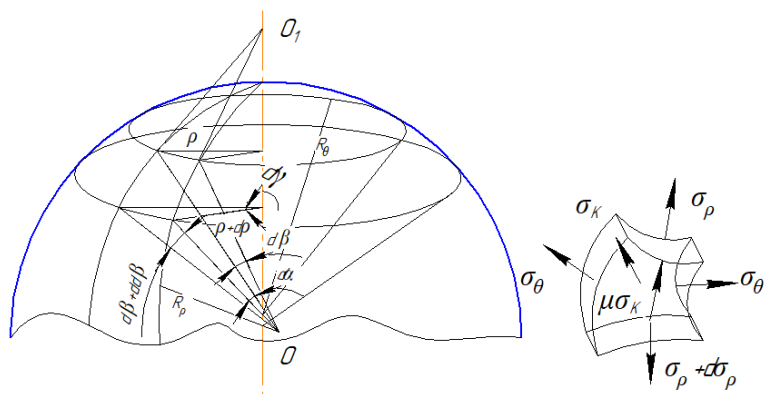


Рис.13. Тонкостенная оболочка вращения

Спроектируем все силы, действующие на нормаль к поверхности элемента, пренебрегая бесконечно малыми высших порядков:

$$\sigma_K \sigma_\rho d\alpha R_\theta d\beta - 2\sigma_\rho S R_\theta d\beta \frac{d\alpha}{2} - 2\sigma_\theta S R_\rho d\alpha \frac{d\beta}{2} = 0.$$

После деления почленно на $S R_\rho R_\theta$ получим уравнение Лапласа

$$\frac{\sigma_K}{S} = \frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}. \quad (11)$$

Проектируя все силы на касательную к поверхности элемента в меридиональном направлении, проведенную под углом α , получим приближенное уравнение равновесия

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \mu \sigma_K \frac{\rho}{S \cdot \sin \alpha} = 0. \quad (12)$$

Подстановка значения σ_K из (11) в (12) приводит к общему уравнению равновесия

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \mu \frac{\rho}{\sin \alpha} \left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} \right) = 0.$$

2.5 Алгоритм решения практических задач

Алгоритм решения приближенных уравнений равновесия и условия пластичности состоит из следующих этапов:

1. Обосновать допущение о частном виде объемного напряженного состояния.
2. Выбрать систему координат и направления осей.
3. В очаге пластической деформации выделить бесконечно малый элемент, проставить действующие на элемент нормальные и касательные напряжения.
4. Составить приближенное уравнение равновесия выделенного элементарного объема с учетом суммирования всех сил на соответствующую координатную ось.
5. Сформулировать приближенное условие пластичности.
6. Провести совместное решение приближенного уравнения и условия пластичности с учетом граничных условий.
7. Дать анализ полученного решения.

2.6 Пример использования метода

Алгоритм решения приближенного уравнения равновесия и условия пластичности рассмотрим при осадке прямоугольной полосы шириной $2b$ и высотой $2h$ неограниченной длины между шероховатыми плитами.

Приближенное дифференциальное уравнение равновесия для рассматриваемой задачи получено в параграфе 2.2 и имеет вид:

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{\tau_{xy}}{h} = 0. \quad (13)$$

Пусть касательное напряжение τ_K , обусловленное трением металла об инструмент, изменяется по закону Кулона–Амонтона

$$\tau_K = \mu \sigma_z, \quad (14)$$

где μ – коэффициент трения.

После подстановки выражения (14) в (13) получим

$$\frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{\mu \sigma_z}{h} = 0. \quad (15)$$

Приближенное условие пластичности для плоского деформированного состояния имеет вид

$$\sigma_x - \sigma_z = \beta \sigma_T. \quad (16)$$

При дифференцировании этого уравнения получаем условие пластичности в дифференциальной форме

$$d\sigma_x = d\sigma_z.$$

После замены в уравнении (15) дифференциала $d\sigma_x$ на $d\sigma_z$, получим дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными:

$$\frac{d\sigma_z}{dx} + \frac{\mu \sigma_z}{h} = 0. \quad (17)$$

В общем виде такие уравнения записываются в виде

$$f_1(x)\varphi_1(z)dx + f_2(x)\varphi_2(z)dz = 0.$$

В результате деления исходного уравнения на $f_2(x)\varphi_1(z)$ оно приводится к виду

$$\frac{f_1(x)}{f_2(x)}dx + \frac{\varphi_2(z)}{\varphi_1(z)}dz = 0.$$

Почленное интегрирование приводит к соотношению

$$\int \frac{f_1(x)}{f_2(x)}dx + \int \frac{\varphi_2(z)}{\varphi_1(z)}dz = C.$$

После разделения переменных в уравнении (17) и интегрирования получим

$$\sigma_z = Ce^{-\frac{\mu x}{h}}. \quad (18)$$

Постоянную интегрирования C найдем из граничных условий. При $x=b$ (на свободной поверхности) $\sigma_x = 0$. Тогда по условию пластичности (16)

$$\sigma_z = -\beta\sigma_T.$$

После подстановки граничных условий в уравнение (18) имеем

$$C = -\beta\sigma_T e^{-\frac{\mu b}{h}}.$$

Окончательно закон распределения нормальных контактных напряжений имеет вид

$$\sigma_z = -\beta\sigma_T e^{-\frac{\mu(b-x)}{h}}.$$

Полное усилие на единицу длины полосы

$$P = 2 \int_0^b \sigma_z dx = 2\beta\sigma_T \int_0^b e^{\frac{\mu(b-x)}{h}} dx = 2\beta\sigma_T \frac{h}{\mu} \left(e^{\frac{\mu b}{h}} - 1 \right). \quad (19)$$

Разделив полное усилие на контактную площадь $2bx_1$, получим удельное усилие

$$p = \frac{P}{2b} = \beta\sigma_T \frac{h}{\mu b} \left(e^{\frac{\mu b}{h}} - 1 \right).$$

По полученным выражениям можно построить эпюры контактных нормальных и касательных напряжений (рис. 14).

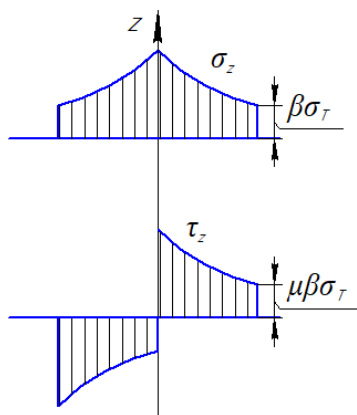


Рис.14. Эпюры контактных нормальных и касательных напряжений

Из анализа эпюр контактных напряжений видно, что эпюра σ_z на оси симметрии полосы имеет резко выраженный пик, напряжения τ_k растут от края полосы к оси симметрии по показательной кривой и на оси симметрии скачкообразно меняют знак.

Из формулы (19) следует, что величина усилия деформирования зависит от природы материала полосы, его физического состояния (температуры, степени и скорости деформации) и соотношения $\frac{\mu b}{h}$, определяющего размеры заготовки, величину коэффициента трения.

2.7 Контрольные вопросы

1. Перечислите основные положения инженерного метода.
2. Дайте определения частных случаев объемного напряженного состояния.
3. Запишите упрощенное уравнение равновесия для плоского деформированного состояния.
4. Для каких классов задач применяют инженерный метод?

5. Какие группы уравнений процесса пластического деформирования используют в инженерном методе?
6. Запишите уравнение равновесия и условие пластичности для осесимметричной задачи с осесимметричным распределением внешней нагрузки.
7. Запишите упрощенное уравнение равновесия для плоского напряженного состояния.
8. В какой последовательности проводят расчет деформирующего усилия инженерным методом?
9. В чем сущность метода решения дифференциальных уравнений первого порядка с разделяющимися переменными?
10. Запишите уравнение Лапласа и дайте его анализ.
11. Основные допущения при выводе упрощенных уравнений равновесия для плоского напряженного состояния.
12. Перечислите все параметры, входящие в формулу для расчета усилия деформирования, полученную инженерным методом.
13. Получите упрощенное уравнение равновесия для плоского деформированного состояния из рассмотрения равновесия выделенного элемента в очаге деформации.

3 МЕТОД ЛИНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ

Метод был разработан в 20 годы XX века Г.Генке и Л. Прандтлем для определения напряженного состояния по объему деформируемого тела при плоской и осесимметричной деформации. Зная напряжения в любой точке тела, можно определить напряжение на контактной поверхности с инструментом и тем самым найти полное усилие деформации.

3.1 Основные понятия о линиях скольжения

При растяжении плоских образцов на начальной стадии пластической деформации на его полированной поверхности можно

обнаружить сетку 2-х семейств линий α и β , пересекающихся под прямым углом друг к другу и наклоненных под углом 45° к оси образца (рис. 15).

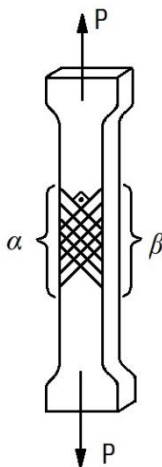


Рис. 15. Линии скольжения α и β при растяжении плоского образца силой P

Эти линии, впервые описанные Черновым и Людерсом, называют линиями скольжения. Такое название линии получили в связи с тем, что касательные к ним совпадают с направлением максимальных касательных напряжений.

В любой точке деформируемого тела, находящегося в плоском напряженном состоянии, имеются два взаимно-перпендикулярных направления, по которым действуют главные нормальные напряжения. Переходя от точки к точке и определяя направления главных нормальных напряжений, можно получить ортогональную сетку, состоящую из двух систем линий, касательные к которым совпадают с направлениями главных нормальных напряжений. Эти линии называют траекториями главных нормальных напряжений.

Под углом 45° к главным нормальным напряжениям σ_1 и σ_3 действуют максимальные касательные напряжения $\tau_{\max}$. Переходя

от точки к точке, можно получить ортогональную сетку, состоящую из двух систем линий скольжения α и β (рис. 16).

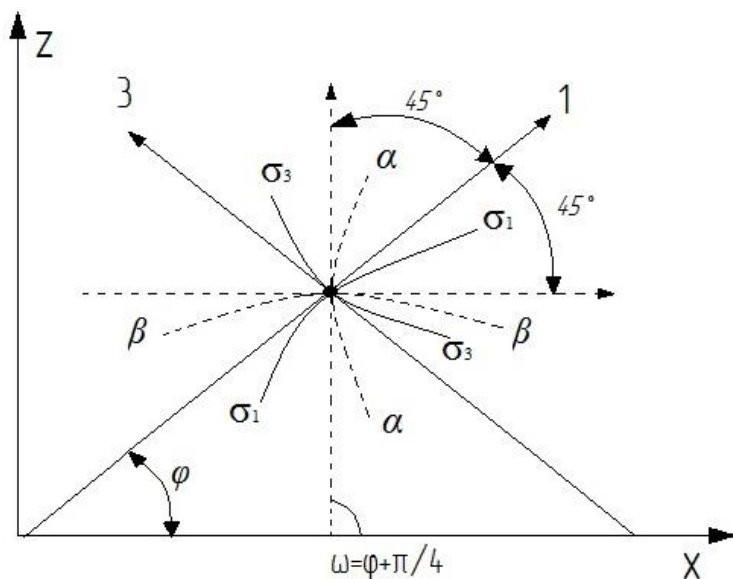


Рис. 16. Траектории главных нормальных и максимальных касательных напряжений

Компоненты напряжений в функции от угла φ определяются следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{cp} + k \cos 2\varphi, \\ \sigma_z = \sigma_{cp} - k \cos 2\varphi, \\ \tau_{xz} = k \sin 2\varphi, \end{cases}$$

которые тождественно удовлетворяют уравнению пластичности для плоской деформации

$$(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2 = 4k^2.$$

Здесь σ_{cp} — среднее напряжение:

$$\sigma_{cp} = 0,5(\sigma_x + \sigma_z);$$

k — предел текучести на сдвиг:

$$k = 0,5(\sigma_1 - \sigma_3) = \tau_T = \tau_{\max}.$$

По условию пластичности по максимальным касательным напряжениям ($\tau_{\max} = k$) $k = 0,5\sigma_T$. По энергетическому условию пластичности $k = \frac{\sigma_T}{\sqrt{3}}$.

Угол φ характеризует направление главных нормальных напряжений, а угол ω — направление главных касательных напряжений. Можно записать, что $\varphi = \omega - \frac{\pi}{4}$. Отсюда получим

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{cp} + k \sin 2\omega \\ \sigma_z = \sigma_{cp} - k \sin 2\omega \\ \tau_{xz} = -k \cos 2\omega. \end{cases}$$

Дифференциальные уравнения линий скольжения имеют вид

$$\frac{dz}{dx} = \operatorname{tg}\omega - \text{семейство } \alpha,$$

$$\frac{dz}{dx} = -\operatorname{ctg}\omega - \text{семейство } \beta.$$

3.2 Основные свойства линий скольжения

1. Линии скольжения образуют два взаимно-перпендикулярных семейства кривых α и β (рис. 17).

2. Линии скольжения должны быть непрерывными.

3. Линии скольжения должны быть ортогональными.

4. Линии скольжения должны пересекать направление главных нормальных напряжений под углом $\frac{\pi}{4}$.

5. Изменение среднего нормального напряжения σ_{cp} при движении вдоль линии скольжения равно произведению угла её поворота ω_{AB} на $2k$, т.е.

$$\sigma_{cpA} - \sigma_{cpB} = \pm 2k\omega_{AB} = \pm 2k(\omega_B - \omega_A).$$

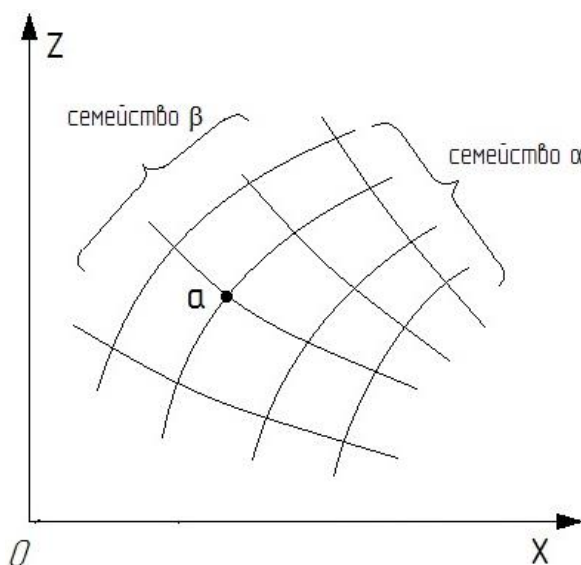


Рис. 17. Семейство линий скольжения α и β

6. Линии скольжения должны отвечать условиям на контуре.

Из формулы

$$\tau_{xz} = -k \cos 2\alpha$$

следует, что если отсутствует трение на контактной поверхности или на свободной поверхности, то

$$\cos 2\alpha = 0 \quad \alpha = \pm \frac{\pi}{4},$$

т.е. линии скольжения пересекают свободную поверхность или контактную поверхность под углом 45° .

При максимальном значении трения $\tau_{xy} = \pm k$.

$$\text{Тогда } \cos 2\alpha = \pm 1 \quad \alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = \frac{\pi}{2} = 90^\circ,$$

т.е. в этом случае одно семейство характеристик пересекает линию контакта под углом 90° , а для второго семейства линия контакта является общей касательной или огибающей.

В промежуточных случаях трение на поверхности контакта пропорционально нормальному напряжению. При этом линии скольжения пересекают линию контакта под промежуточными углами.

7. Угол между касательными к двум линиям скольжения одного семейства в точках их пересечения каждой линии другого семейства остается постоянным (теорема Генки).

Рассмотрим на рис.18 две линии αAB и CD и две линии βAC и BD , образующие криволинейный четырехугольник $ABCD$.

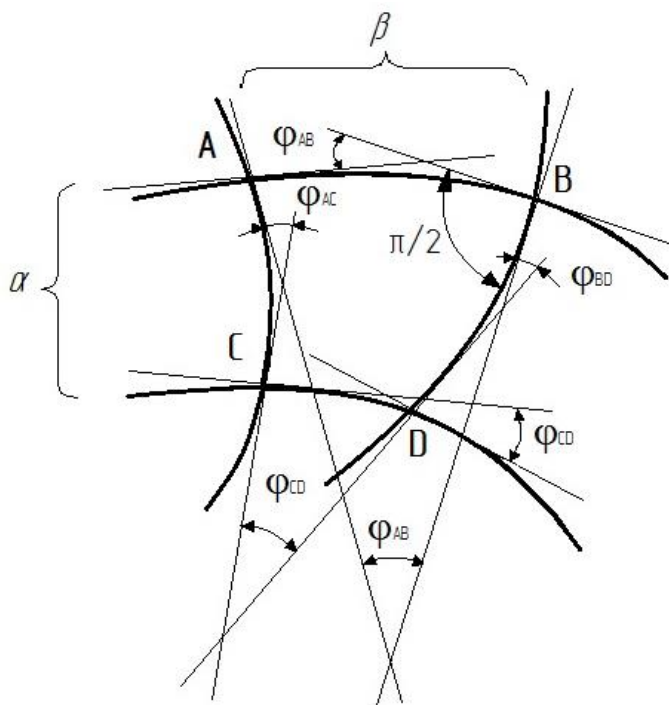


Рис. 18. Элемент в сетке линий скольжения

Определим разность средних напряжений при переходе из точки A через точку B в точку D .

$$\sigma_{срA} - \sigma_{срD} = (\sigma_{срA} - \sigma_{срB}) + (\sigma_{срB} - \sigma_{срD}).$$

Используя 5-е свойство линий скольжений, получим

$$\sigma_{cpA} - \sigma_{cpB} = -2k\varphi_{AB}(\alpha),$$

$$\sigma_{cpB} - \sigma_{cpD} = \pm 2k\varphi_{BD}(\beta).$$

Следовательно

$$\sigma_{cpA} - \sigma_{cpD} = 2k(-\varphi_{AB} + \varphi_{BD}).$$

При переходе из точки А через точку С в точку D:

$$\sigma_{cpA} - \sigma_{cpD} = (\sigma_{cpA} - \sigma_{cpC}) + (\sigma_{cpC} - \sigma_{cpD}).$$

Так как

$$\sigma_{cpA} - \sigma_{cpC} = 2k\varphi_{AC}(\beta),$$

$$\sigma_{cpC} - \sigma_{cpD} = -2k\varphi_{CD}(\alpha).$$

Следовательно

$$\sigma_{cpA} - \sigma_{cpD} = 2k(\varphi_{AC} - \varphi_{CD}).$$

Так как разность средних напряжений в точках А и D одинаковая при переходе через точки В и С:

$$-\varphi_{AB} + \varphi_{BD} = \varphi_{AC} - \varphi_{CD}$$

или

$$\varphi_{AB} - \varphi_{CD} = \varphi_{BD} - \varphi_{AC}, \quad (20)$$

то распишем углы в каждой точке четырехугольника:

$$\varphi_{AB} + \varphi_{BD} - \varphi_{AC} - \varphi_{CD} = 0$$

или

$$\varphi_{AB} - \varphi_{CD} = \varphi_{AC} - \varphi_{BD}. \quad (21)$$

Так как левые части выражений (20) и (21) одинаковые, то приравнивая правые части, получаем

$$\varphi_{BD} - \varphi_{AC} = \varphi_{AC} - \varphi_{BD}.$$

Отсюда

$$2\varphi_{BD} = 2\varphi_{AC}$$

или

$$\varphi_{BD} = \varphi_{AC} \text{ и } \varphi_{AB} = \varphi_{CD}.$$

3.3 Пример использования метода

Построить поле линий скольжения для начала внедрения плоского гладкого пуансона в пластическое полупространство в условиях плоского деформированного состояния, $\varepsilon_y \cong 0$.

Так как контактное трение отсутствует под пуансоном и на свободной поверхности, то линии скольжения подходят к рабочей поверхности пуансона и свободной поверхности металла под углом 45° и образуют два треугольных участка с однородным напряженным состоянием I и II (рис. 19). Проведя из точек a и b концентрические окружности и лучи, получим центрированное поле линий скольжений III (это поле впервые построил Л. Прандтль).

Определим удельное усилие $\bar{P}$, равномерно распределенное по контактной поверхности пуансона шириной d и длиной l .

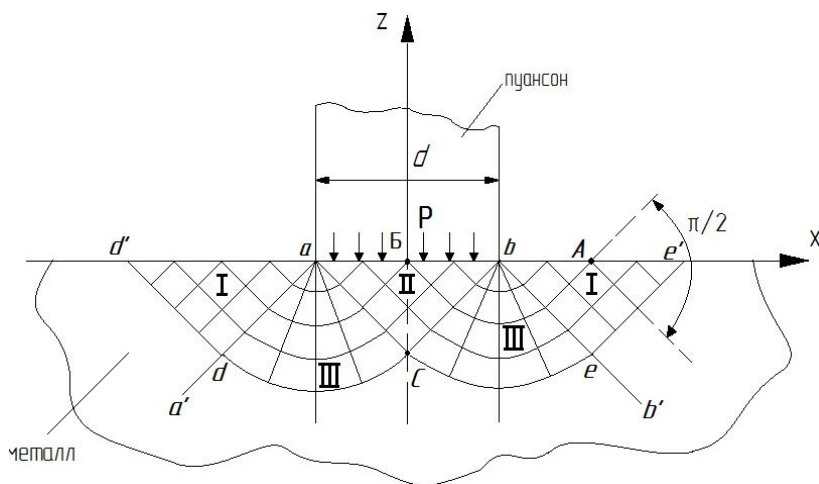


Рис. 19. Поле линий скольжения при внедрении пуансона в тело неограниченных размеров

На свободной поверхности напряжение в точке $A \sigma_{zA} = 0$, напряжение σ_{xA} — сжимающее и притом главное.

Следовательно, по условию пластичности

$$0 - \sigma_{xA} = 2k,$$

откуда

$$\sigma_{xA} = -2k.$$

Среднее напряжение в точке А:

$$\sigma_{cpA} = \frac{\sigma_{xA} + \sigma_{zA}}{2} = \frac{-2k + 0}{2} = -k.$$

На основании 5-го свойства линий скольжения (учитывая, что $\sigma_{cpA} > \sigma_{cpB}$):

$$\sigma_{cpA} - \sigma_{cpB} = 2k\omega_{AB}.$$

После подстановки значения σ_{cpA}

$$\sigma_{cpB} = -(k + 2k\omega_{AB}). \quad (22)$$

Для точки В условие пластичности:

$$\sigma_{xB} - \sigma_{zB} = 2k, \sigma_{cpB} = \frac{\sigma_{xB} + \sigma_{zB}}{2}.$$

Исключив из этих уравнений σ_{xB} , получим:

$$\sigma_{cpB} = \sigma_{zB} + k.$$

Подставив значение σ_{cpB} в уравнение (22), получим:

$$\sigma_{zB} = -2k(1 + \omega_{AB}).$$

Удельное усилие $p = -\sigma_{zB}$, следовательно

$$p = 2k(1 + \omega_{AB}).$$

Угол поворота линий скольжения при движении от точек А свободной поверхности к точкам В, расположенным на торце пуансона,

$$\omega_{AB} = \frac{\pi}{2}.$$

Тогда удельное усилие осадки

$$p = 2k \left(1 + \frac{\pi}{2}\right).$$

Полное усилие деформирования заготовки:

$$P = pF_k = 2k \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) dl.$$

3.4 Контрольные вопросы

1. В чем суть метода линий скольжения?
- 2) Назовите класс задач, решаемых методом линий скольжения.
3. Как расположены относительно друг друга два семейства линий скольжения Чернова-Людерса? Изобразите их.
4. Запишите дифференциальные уравнения для коэффициентов, касательных к линиям скольжения.
5. Как связаны углы касательных с линиями скольжения и траекториями главных напряжений?
6. Запишите выражения напряжений для условий плоской деформации.
7. Запишите уравнения для вычисления среднего нормального напряжения σ_{cp} при движении вдоль линии скольжения.
8. Выполните рисунок к теореме Генки и дайте пояснения.
9. Выполните переход между узловыми точками с различными промежуточными точками для доказательства теоремы Генке.
10. Дайте обзор семи свойств линий скольжения.
11. Постройте и опишите поле линии скольжения при внедрении прямоугольного пуансона в плоское полупространство в условиях плоской деформации, при отсутствии трения на контактной поверхности.
12. Постройте и опишите поле линий скольжений при растяжении плоского образца.
13. Постройте и опишите поле линий скольжений для плоского кольца, нагруженного по внутреннему контуру равномерно распределенной растягивающей нагрузкой.

4 МЕТОД СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМАЦИЯМ

4.1 Основные положения метода

Метод сопротивления материалов пластическим деформациям используют для решения задач при больших пластических деформациях. Метод разработан российским ученым Г.А. Смирновым-Аляевым и сокращенно называется как метод СМПД.

Данный метод предполагает, что деформация является монотонной. При монотонной деформации материальное волокно рассматриваемой частицы на данной стадии либо удлиняется, либо укорачивается и остается таковым на последующих стадиях деформации.

Показатель вида напряженного состояния

$$\vartheta_{\sigma} = \frac{\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}} \quad (23)$$

равен показателю вида деформированного состояния

$$\vartheta_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_2 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}}{\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2}}$$

и постоянен, т.е. $\vartheta_{\sigma} = \vartheta_{\varepsilon} = \text{const.}$

Тогда

$$\frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} = \text{const.}$$

Если условие монотонности выполняется, то в физических уравнениях теории пластичности, связывающих напряжения и деформации, можно использовать вместо малых деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ и ε_3 конечные логарифмические деформации

$$\frac{e_1 - e_2}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{e_2 - e_3}{\sigma_2 - \sigma_3} = \frac{e_3 - e_1}{\sigma_3 - \sigma_1} = \frac{3 e_i}{2 \sigma_i}, \quad (24)$$

где e_i – интенсивность деформаций,

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2};$$

σ_i – интенсивность напряжений,

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

Метод позволяет найти напряжения, если предварительно определены деформации, известно напряжение на границах заготовки или задано среднее напряжение

$$\sigma_{cp} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}.$$

Для нахождения компонент напряжений используют приближенное условие пластичности

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta \sigma_m, \quad (25)$$

где β – коэффициент Лодэ,

$$\beta = \frac{2}{\sqrt{3 + \vartheta_\sigma^2}}.$$

Или уравнение, полученное из формулы (23):

$$2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3 = \vartheta_\sigma(\sigma_1 - \sigma_3).$$

Таким образом, для определения трех главных напряжений σ_1, σ_2 и σ_3 имеется система из трех линейных уравнений (23-25), т.е. задача решается.

4.2 Пример использования метода

Пример использования метода рассмотрен при определении напряженно-деформированного состояния на свободной поверхности торца прошиваемой заготовки (рис. 20).

На торцевой поверхности цилиндрической заготовки наносят две концентрические круговые риски с диаметрами $2R_1$ и $2R_2$, большими диаметра прошивки $2R_{np}$. После внедрения прошивки они останутся на свободной поверхности заготовки в зоне наплыва с диаметрами $2r_1$ и $2r_2$ (рис. 20).

Определим в общем виде приближенное значение компонент деформации в зоне, расположенной между двумя рисками.

Окружные деформации по внутренней риске

$$e_{\theta}^B = \ln \frac{2\pi r_1}{2\pi R_1} = \ln \frac{r_1}{R_1}.$$

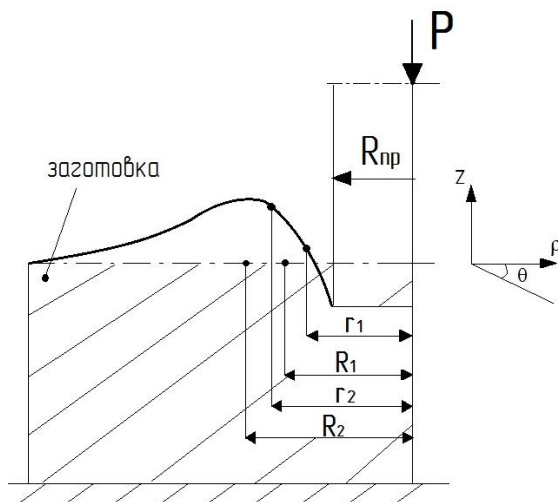


Рис.20. Схема к определению деформаций на поверхности прошиваемой поверхности заготовки

На наружной риске

$$e_{\theta}^H = \ln \frac{r_2}{R_2}.$$

Среднее значение:

$$e_{\theta}^{cp} = \frac{\varepsilon_{\theta}^B - \varepsilon_{\theta}^H}{2}.$$

Среднее значение радиальной деформации:

$$e_{\rho}^{cp} = \ln \frac{r_2 - r_1}{R_2 - R_1}.$$

Среднее значение осевой деформации e_z^{cp} найдем из условия постоянства объема

$$e_{\rho}^{cp} + e_{\theta}^{cp} + e_z^{cp} = 0,$$

откуда $e_z^{cp} = -e_{\rho}^{cp} - e_{\theta}^{cp}$.

Теперь можно найти показатель вида деформированного состояния, принимая логарифмические деформации за главные:

$$\vartheta_e = \frac{2e_2 - e_1 - e_3}{e_1 - e_3}$$

и коэффициент Лодэ β :

$$\beta = \frac{2}{\sqrt{3 + \vartheta_e^2}}.$$

Из физических уравнений (24)

$$\frac{\sigma_{\rho} - \sigma_z}{e_{\rho} - e_z} = \frac{\sigma_z - \sigma_{\theta}}{e_z - e_{\theta}}.$$

Так как на свободной поверхности $\sigma_z = 0$, т.е. напряженное состояние плоское, то

$$\frac{\sigma_{\rho}}{e_{\rho} - e_z} = -\frac{\sigma_{\theta}}{e_z - e_{\theta}}. \quad (26)$$

Условие пластичности

$$\sigma_{\theta} - \sigma_{\rho} = \beta \sigma_T. \quad (27)$$

Таким образом, для определения двух напряжений $\sigma_{\theta}, \sigma_{\rho}$ получили систему двух уравнений (26) и (27) с двумя неизвестными, т.е. задача решается.

4.3 Контрольные вопросы

1. Перечислите основные задачи, решаемые методом СМПД.
2. В каком виде используют в методе СМПД условие пластичности?
3. Какие величины задают в методе СМПД на границе?
4. Приведите алгоритм определения деформаций в методе СМПД.
5. Чем обеспечивается точность определения деформаций?
6. При каких условиях рекомендуется использовать метод СМПД?
7. Что означает условие монотонности деформаций?
8. Запишите уравнения, связывающие компоненты напряжений и деформаций и расшифруйте все величины, входящие в эти формулы.
9. Алгоритм решения задачи методом СМПД.
10. Как определяются показатели вида напряженного и деформированного состояния в СМПД?

5 МЕТОД РАБОТ

5.1 Основные положения метода

Метод работ в основном применяется для определения деформирующего усилия и базируется на законе сохранения энергии. При пластической деформации работа внешних сил A_B равна работе внутренних сил A_D , $A_B = A_D$ или $A_B - A_D = 0$.

Работа внешних сил равна разности работ активных сил A_a и сил внешнего трения A_{mp} :

$$A_B = A_a - A_{mp} = A_D \text{ или } A_a = A_D + A_{mp}.$$

Работа внутренних сил

$$A_D = \iiint_V \sigma_i \varepsilon_i dV.$$

Для идеально пластичного металла по энергетическому условию пластичности

$$\sigma_i = \sigma_T A_D = \sigma_T \iiint_V \varepsilon_i dV.$$

Здесь σ_i — интенсивность напряжений в главных осях напряжений,

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

ε_i — интенсивность деформаций в главных осях деформаций,

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

Работа сил внешнего трения

$$A_{mp} = \iint_F \sqrt{\tau_{kx}^2 u_x^2 + \tau_{ky}^2 u_y^2 + \tau_{kz}^2 u_z^2} dF,$$

где $\tau_{kx}, \tau_{ky}, \tau_{kz}$ — проекции сил трения на контактных поверхностях заготовки;

u_x, u_y, u_z — проекции вектора перемещения на контактных поверхностях заготовки на координатные оси x, y, z .

Если трение на контактной поверхности считать постоянным:

$$\tau_k = \tau_{kx} = \tau_{ky} = \tau_{kz} = \text{const},$$

то

$$A_{mp} = \tau_k \iint_F \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} dF.$$

Тогда работа активных сил

$$A_a = \iiint_V \sigma_i \varepsilon_i dV + \tau_k \iint_F \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} dF.$$

Работа внешних сил

$$A_B = \iint_F (Xu_x + Yu_y + Zu_z) dF ,$$

где X, Y, Z —проекции сил на оси координат.

5.2 Пример использования метода

Пример применения метода работ рассмотрен при решении задачи осадки цилиндрической заготовки диаметром d и высотой h на величину Δh из идеально пластичного материала $\sigma_T = \text{const}$.

Работа внешних сил может быть вычислена по формуле:

$$A_B = P\Delta h ,$$

где P —усилие, Δh — перемещение верхнего инструмента.

Работа сил трения

$$A_{mp} = - \iint_F \tau_k u_\rho dF ,$$

где u_ρ — радиальное перемещение, τ_k —касательное напряжение на контактной поверхности. Знак " — " в формуле в силу того, что силы трения препятствуют перемещению металла.

Работа сил деформирования для неупрочняемого металла $\sigma_i = \sigma_T$:

$$A_d = \sigma_T \iiint_V \varepsilon_i dV = \sigma_T \iiint \varepsilon_i \rho d\rho d\theta dz.$$

Деформации в продольном, окружном и радиальном направлениях для осесимметричной задачи находят по формулам:

$$\varepsilon_z = -\frac{\Delta h}{h} , \varepsilon_\rho = \frac{du_\rho}{d\rho} , \varepsilon_\theta = \frac{u}{\rho}.$$

Воспользуемся условием несжимаемости

$$\frac{du_\rho}{d\rho} + \frac{u_\rho}{\rho} - \frac{\Delta h}{h} = 0.$$

Это дифференциальное уравнение имеет решение:

$$u_\rho = \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h} \rho.$$

Тогда

$$\varepsilon_\rho = \frac{du_\rho}{d\rho} = \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_\rho}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h}; \quad \varepsilon_z = -\frac{\Delta h}{h};$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\rho)^2} = \pm \frac{\Delta h}{h}.$$

В расчетах надо взять знак " - ", поскольку основной деформацией является деформация сжатия.

Работа сил деформирования:

$$A_d = \sigma_T \iiint_V \varepsilon_i dV = -\sigma_s \frac{\Delta h}{h} \int_0^{2\pi} \int_0^{0,5d} \int_0^h \rho d\rho d\theta dz = -\sigma_T \Delta h \frac{\pi d^2}{4}.$$

Работа сил трения на верхнем и нижнем инструментах вычисляется путем интегрирования:

$$A_{mp} = -2\tau_k \int_0^{2\pi} \int_0^{0,5d} \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h} \rho^2 d\rho d\theta = -\frac{\tau_k \Delta h d}{3h} \frac{\pi d^2}{4}.$$

Полная работа внешних сил определяется выражением

$$A_B = P \Delta h = \frac{\sigma_T \Delta h \pi d^2}{4} - \frac{\tau_k \Delta h d}{3h} \frac{\pi d^2}{4}.$$

Окончательно формула для расчета полного усилия осадки имеет вид

$$P = -\frac{\pi d^2}{4} \left(\sigma_T + \frac{\tau_k d}{3h} \right).$$

5.3 Контрольные вопросы

1. На каком предположении основан метод работ?
2. Как определяется полная деформация заготовки?
3. Запишите физические уравнения для пластической области.
4. Произведите вычисления работы деформации в пластической области с учетом физических уравнений и интенсивности напряжений.
5. Для определения каких величин и в каких процессах может быть использован метод баланса работ?
6. Выполните эскиз для процесса осадки цилиндрической заготовки.
7. Как формулируется постановка задачи для процесса осадки цилиндрической заготовки?
8. Запишите формулу определения полной работы деформирования.
9. Как определяется работа сил трения на одном из торцов цилиндрической заготовки?
10. Запишите условие несжимаемости и получите из него дифференциальное уравнение для определения радиального перемещения.
11. Проинтегрируйте дифференциальное уравнение и определите радиальное перемещение.

6 ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

6.1 Абсолютные и относительные деформации

В процессах обработки металлов давлением происходят большие деформации, что связано с значительными изменениями размеров деформируемого тела. Для описания больших деформаций применяют следующие показатели деформации: абсолютные, относительные и логарифмические, а также коэффициент деформации.

Для расчёта показателей деформации рассмотрим прямоугольный параллелепипед с рёбрами, параллельными главным осям деформации 1, 2, 3 (рис. 21). Исходные размеры тела до пластической деформации X_0, Y_0, Z_0 .

Конечные размеры после пластической деформации x, y, z .

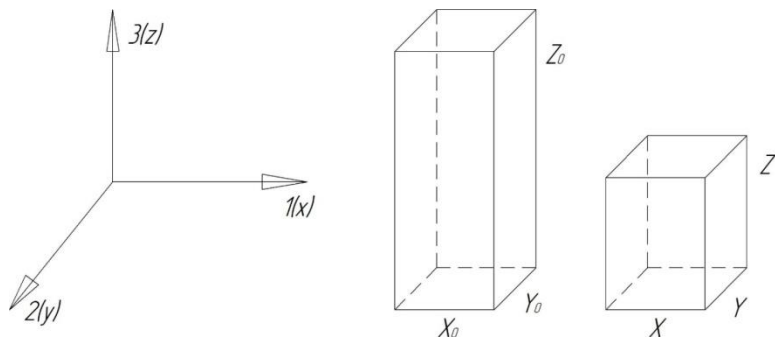


Рис. 21. Схема к расчёту абсолютных и относительных деформаций

Абсолютная деформация находится как разность между конечными и начальными размерами тела в направлении осей координат:

$$\Delta X = X - X_0, \quad \Delta Y = Y - Y_0, \quad \Delta Z = Z - Z_0.$$

Она может быть как положительной, так и отрицательной в зависимости от того, происходит увеличение или уменьшение размеров деформируемого тела.

Относительная деформация по Лагранжу определяется как отношение абсолютной деформации к первоначальному размеру тела.

$$\epsilon_x = \frac{\Delta X}{X_0} = \frac{X - X_0}{X_0}, \quad \epsilon_y = \frac{\Delta Y}{Y_0} = \frac{Y - Y_0}{Y_0}, \quad \epsilon_z = \frac{\Delta Z}{Z_0} = \frac{Z - Z_0}{Z_0}.$$

Здесь положительная величина деформации соответствует растяжению, а отрицательная – сжатию. Показатели деформации могут быть выражены в процентах. Отрицательная деформация изменяется в пределах $[0, -1)$, положительная – в пределах $[0, +\infty)$.

Индексы x, y, z в обозначении деформации показывают: по направлению к какой оси ее рассматривают.

Относительная деформация по Эйлеру определяется как отношение абсолютной деформации к конечному размеру тела:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{X}, \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta Y}{Y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta Z}{Z}.$$

6.2 Логарифмические деформации. Коэффициенты деформации

Рассмотрим как пример деформацию осадки тела в виде прямоугольного параллелепипеда с начальной высоты Z_0 до конечной высоты Z (рис. 22).

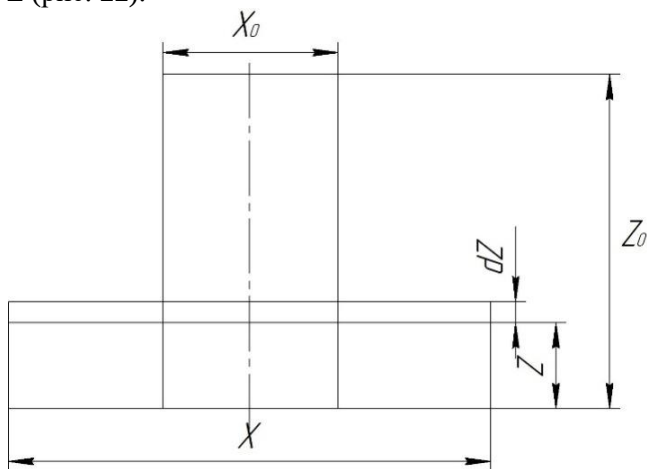


Рис. 22. Схема к расчёту логарифмических деформаций

Допустим, что в какой-то момент времени высота тела равна Z , а бесконечно малое уменьшение его высоты равно dZ . Тогда бесконечно малая деформация в направлении оси z .

$$de_z = \frac{dZ}{Z}.$$

Логарифмическая деформация при осадке тела от Z_0 до Z .

$$e_z = \int_{Z_0}^Z \frac{dZ}{Z} = \ln \frac{Z}{Z_0}.$$

Рассматривая деформацию параллелепипеда с исходными размерами X_0, Y_0, Z_0 и конечными размерами X, Y, Z , можно аналогично определить деформации в направлении осей x и y .

$$e_x = \ln \frac{X}{X_0}, e_y = \ln \frac{Y}{Y_0}.$$

Таким образом, логарифмические деформации представляют собой результат суммирования бесконечно малых деформаций, поэтому их часто называют истинными деформациями.

Логарифмические деформации обладают свойством аддитивности. При выполнении деформации в несколько этапов их можно складывать при расчёте суммарной деформации:

$$e_{\Sigma} = e_I + e_{II}.$$

Допустим, что растяжение образца длиной 100 мм произведено в два этапа. Вначале образец растянут на длину 120 мм, а после – до 150 мм. Суммарная деформация за два этапа нагружения:

$$e_{\Sigma} = \ln \frac{150}{100} = \ln \frac{150}{120} \times \frac{120}{100} = \ln \frac{150}{120} + \ln \frac{120}{100} = e_I + e_{II}.$$

Относительные деформации по Лагранжу и логарифмические деформации связаны между собой соотношениями:

$$e_x = \ln \frac{X}{X_0} = \ln \frac{X_0 + \Delta X}{X_0} = \ln(1 + \varepsilon_x),$$

$$e_y = \ln \frac{Y}{Y_0} = \ln \frac{Y_0 + \Delta Y}{Y_0} = \ln(1 + \varepsilon_y),$$

$$e_z = \ln \frac{Z}{Z_0} = \ln \frac{Z_0 + \Delta Z}{Z_0} = \ln(1 + \varepsilon_z).$$

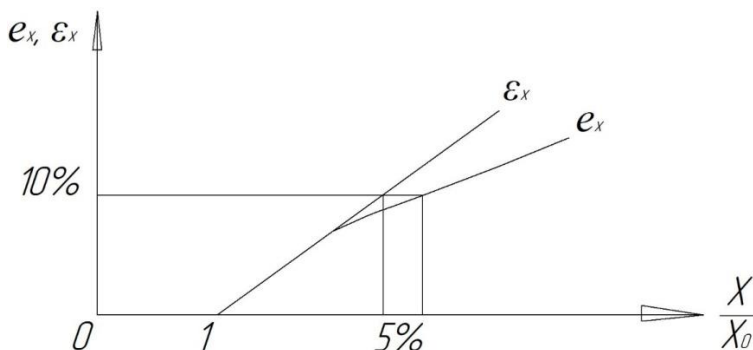


Рис. 23. График зависимости относительной ε_x и логарифмической e_x деформации от X/X_0

Из рис. 23 видно, что расхождение $\frac{(\varepsilon_x - e_x)}{(100 \times e_x)\%}$ между логарифмической и относительной деформацией при изменении последних в пределах 0-10% составляет 0-5% . В инженерных расчётах при относительной деформации меньше 0.1 можно считать $e_x \approx \varepsilon_x$.

Коэффициенты деформации определяются через отношение размеров тела после деформации к соответствующим размерам до деформации. Применительно к процессу прокатки плит коэффициенты деформации по рис. 24 следующие: коэффициент обжатия $\eta = \frac{H}{H_0}$, коэффициент уширения $\beta = \frac{B}{B_0}$, коэффициент вытяжки $\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{F_0}{F}$, где $F_0 = B_0 H_0$, $F = BH$.

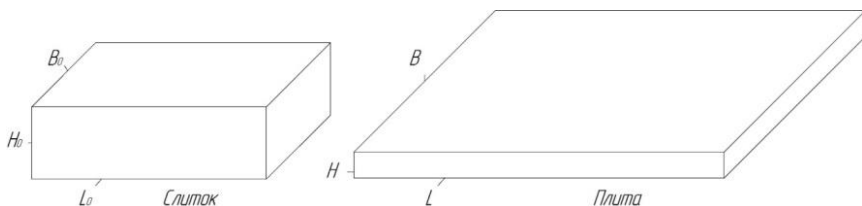


Рис. 24. Схема к расчёту коэффициента деформации при прокатке плит

В ряде процессов обработки металлов давлением, таких как прессование, волочение, прокатка, чаще используют относительную деформацию, выраженную через начальную F_0 и конечную F_k площади поперечных сечений тела.

$$\varepsilon_F = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%.$$

Выбор показателей деформации определяется удобством вычисления и требуемой точностью расчёта.

6.3 Смещенный объем. Условие постоянства объема

Смещённый объём – это объём, прибавленный или удалённый в процессе деформации в одном из главных направлений осей деформации. Этот термин широко используется для расчёта работы, затрачиваемой на пластическую деформацию тела.

Пусть в текущий момент деформации при осадке заготовка получает приращение dZ (рис. 25). Тогда элементарный смещённый объём в направлении оси z по высоте

$$dF_{cz} = F_z dZ,$$

где F_z – площадь поперечного сечения, перпендикулярная оси z в каждый момент деформации.

$$F_z = \frac{V_0}{Z},$$

где V_0 – объём параллелепипеда $V_0 = X_0 Y_0 Z_0$.

После интегрирования получим выражение, из которого видно, что смещённый объём равен объёму тела, умноженному на логарифмическую деформацию:

$$V_{cz} = V_0 \int_{Z_0}^Z \frac{dZ}{Z} = V_0 e_z.$$

Аналогично можно вывести выражения для смещённых объёмов металла по двум другим направлениям – по ширине и длине:

$$V_{cx} = V_0 e_x V_{cy} = V_0 e_y.$$

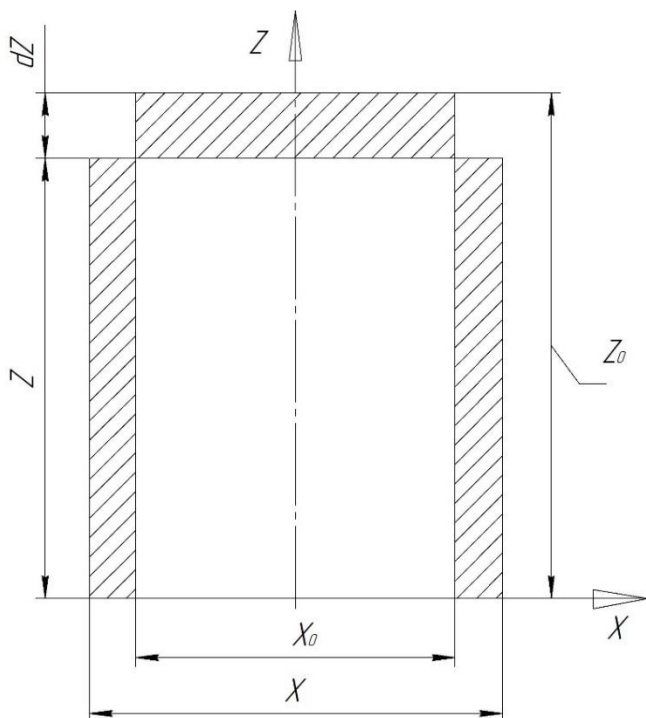


Рис.25. Схема к расчёту смещённого объёма в направлении оси Z

Условие постоянства объёма используется при расчётах размеров заготовки для изготовления изделий обработкой давлением. По условию постоянства объёма при осадке прямоугольного параллелепипеда (см. рис. 21) получаем

$$\frac{XYZ}{X_0Y_0Z_0} = 1.$$

После логарифмирования получим уравнение, описывающее условие постоянства объёма:

$$\ln \frac{X}{X_0} + \ln \frac{Y}{Y_0} + \ln \frac{Z}{Z_0} = 0$$

или

$$e_x + e_y + e_z = 0.$$

Умножив на объём деформируемого тела V_0 , получим

$$V_0 e_x + V_0 e_y + V_0 e_z = 0$$

или

$$V_{cx} + V_{cy} + V_{cz} = 0.$$

Таким образом, сумма смещённых объёмов по трём взаимно перпендикулярным направлениям равна нулю. Условие постоянства объёма $XYZ / X_0 Y_0 Z_0 = 1$ после подстановки коэффициентов деформации примет вид

$$\eta \beta \lambda = 1.$$

6.4 Определение числа переходов.

Условие постоянства секундных объёмов

В ряде процессов обработки металлов давлением, таких как прокатка, волочение, протяжка, вытяжка изделия получают за несколько операций (переходов). Используя условие постоянства объёма, можно получить формулу для определения числа переходов, если известен средний коэффициент вытяжки за переход λ_{cp} за всю обработку, где F_0 начальное, F_k конечное поперечное сечение тела.

Пусть после 1, 2, ..., n операций (переходов) поперечное сечение деформируемой заготовки будет равно $F_1, F_2, \dots, F_k$. Тогда коэффициенты вытяжки при отдельных операциях составят

$$\lambda_1 = \frac{F_0}{F_1}, \lambda_2 = \frac{F_1}{F_2}, \dots, \lambda_n = \frac{F_{n-1}}{F_k},$$

откуда $F_0 = \lambda_1 F_1, F_1 = \lambda_2 F_2, \dots, F_{n-1} = \lambda_n F_k$.

Тогда $F_0 = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n F_k$ или $\frac{F_0}{F_k} = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n$, где n число операций.

Окончательно $\lambda_\Sigma = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n$.

Если принять $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda_{cp}$, то $\lambda_\Sigma = \lambda_{cp}^n$.

После логарифмирования получим формулу для расчета числа переходов:

$$n = \frac{\ln \lambda_{\Sigma}}{\ln \lambda_{cp}} = \frac{\ln F_0 - \ln F_k}{\ln \lambda_{cp}}.$$

Условие постоянства секундных объемов устанавливает взаимосвязь между скоростью движения металла V и изменениями размеров поперечного сечения F деформируемой заготовки при непрерывном режиме обработки давлением. Например, закон постоянства секундных объемов должен выполняться при одновременной прокатке заготовки в группе рабочих клеток прокатного стана (рис. 26).

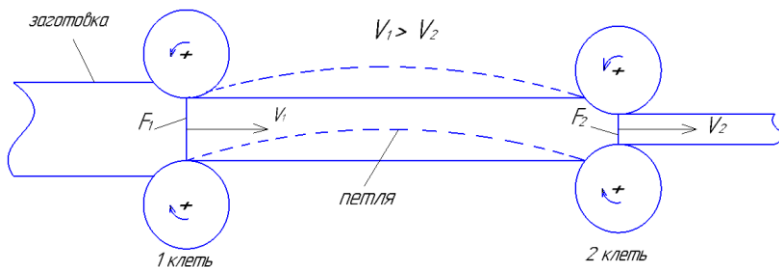


Рис.26.Схема одновременной прокатки заготовки в двух рабочих клетях

Условие постоянства секундных объемов формулируется так: объём металла, проходящего за единицу времени через определенное сечение очага деформации, не меняется при переходе от одного сечения к другому.

$$V_1 F_1 = V_2 F_2 = V_3 F_3 = V_i F_i = \text{const.}$$

В противном случае возможен обрыв при V_2 больше V_1 или образование петли при V_2 меньше V_1 .

6.5 Средняя скорость деформации

Скорость деформации – это изменение степени деформации за единицу времени. Обозначается как $\dot{\epsilon}$, её размерность с^{-1} , в от-

личие от скорости деформации V (м/с) (скорость движения инструмента).

Для случая простого растяжения стержня длиной L_0 на длину Δl за время t средняя скорость деформации

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t} = \frac{\Delta l}{L_0 t}.$$

При осадке заготовки с начальной высотой H_0 до конечной высоты H со скоростью движения инструмента (бойка) V средняя скорость деформации

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_H}{t} = \frac{(H_0 - H)/H_0}{t} = \frac{V}{H_0}.$$

При прессовании круглых прутков (рис. 27) среднюю скорость деформации определяют по формуле

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\ln \lambda}{t},$$

где λ – коэффициент вытяжки.

$$\lambda = \frac{F_k}{F_{np}},$$

где F_k – площадь поперечного сечения контейнера;

F_{np} – площадь поперечного сечения прутка.

Длительность деформации находят по выражению

$$t = \frac{W_{опд}}{W_c},$$

где W_c – объем металла, вытекающий из канала матрицы за одну секунду.

$$W_c = F_{np} V_{ист},$$

где $V_{ист}$ – скорость истечения прутка

Объем очага пластической деформации $W_{опд}$ может быть числен как объём усечённого конуса высотой h .

$$W_{опд} = \frac{1}{3} \pi (R_k^2 + R_k R_{np} + R_{np}^2) h,$$

где $R_k = D_k/2$ и $R_{np} = D_{np}/2$.

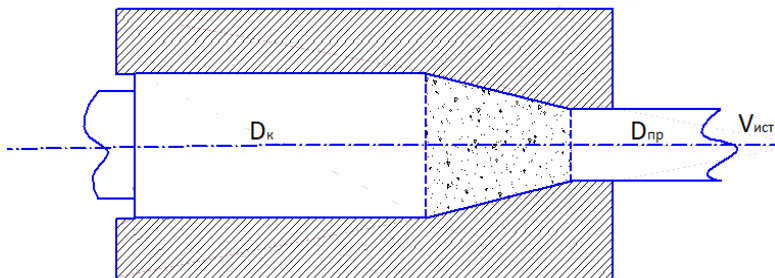


Рис. 27. Схема прессования круглого прутка

Для случая листовой прокатки средняя скорость деформации за проход

$$\dot{\epsilon} = \frac{V \Delta H}{H \sqrt{R \Delta H}},$$

где H – высота заготовки до прокатки;
 V – скорость вращения рабочего вала;
 ΔH – абсолютное обжатие за проход;
 R – радиус рабочего вала.

6.6 Контрольные вопросы

1. Что понимают под деформацией тела?
2. Физический смысл логарифмических деформаций.
3. Как рассчитать относительные деформации?
4. Какая связь между логарифмическими и относительными деформациями?
5. Дайте понятие смещенного объема.
6. Как определить число переходов в многопереходных процессах обработки давлением?
7. Запишите закон постоянства деформируемого объема.
8. Чем скорость деформации отличается от скорости деформирования?
9. Запишите условие постоянства объема через коэффициенты деформации.

10. Запишите условие постоянства объема через смещенные объемы.
11. Как рассчитать среднюю скорость деформации при осадке?
12. Какие деформации обладают свойством аддитивности?
13. В чем суть условия постоянства секундных объемов?
14. Чем отличается расчет относительных деформаций по Эйлеру от расчета относительных деформаций по Лагранжу?
15. Как рассчитать степень деформации при осадке?
16. Когда деформации положительны, а когда отрицательны?
17. Запишите условие постоянства объема через скорости деформаций.

7 ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ В ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

7.1 Понятие внешнего трения

Внешнее трение – это механическое взаимодействие двух тел, препятствующее их относительному перемещению в плоскости соприкосновения.

Рассмотрим силы взаимодействия элементов заготовки R_3 и инструмента R_u на площадках ΔF_3 и ΔF_u . В общем случае эти равнодействующие силы направлены под углом α к нормали контакта $\bar{n}$ (рис. 28). Касательная составляющая T силы взаимодействия R называется силой трения. В соответствии с третьим законом Ньютона силе R_3 , действующей на заготовку, соответствует такая же сила R_u , действующая на инструмент, нормальной силе N_3 – нормальной силе N_u .

Таким образом, на контактной поверхности ΔF_3 возникает сила трения T_3 , оказывающая сопротивление перемещению заготовки относительно инструмента. На контактной поверхности ΔF_u возникает сила трения T_u активного действия, которая стремится увлечь инструмент в направлении движения заготовки. Сила T_3

влияет на качество поверхности заготовки, а сила T_u – на износ инструмента. Силы трения относят к единице площади поверхности трения $\tau_k = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{T}{\Delta F}$ и называют контактным касательным напряжением.

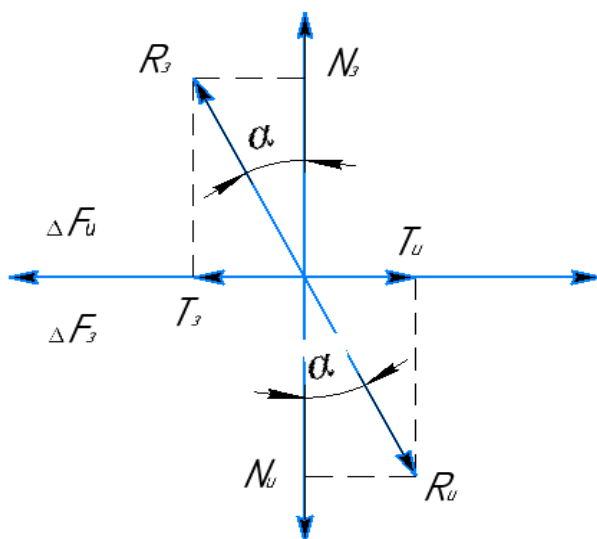


Рис. 28. Силы взаимодействия между заготовкой и инструментом

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

В механике различают два вида трения: скольжения и качения. Для процессов пластического деформирования характерно внешнее трение скольжения. Его особенности:

1) Высокие давления на поверхности контакта 100 МПа и более. Для сравнения в узлах машин ~10 МПа.

2) При контакте двух тел одно из них жесткое либо упругое, другое – пластическое. Для сравнения: в узлах машин оба тела жесткие.

7.2 Роль внешнего трения в процессах пластического деформирования

В процессах обработки давлением роль сил внешнего трения с точки зрения технологии может быть положительной и отрицательной.

Примером положительной роли внешнего трения является момент захвата полосы валками при прокатке. В месте контакта в зоне входа полосы в очаг пластической деформации действуют силы внешнего трения T , втягивающие полосу в зазор между вращающимися валками. Такие силы трения, направления которых совпадают с направлениями деформирования, называют активными (рис. 29). Для их усиления на поверхность валков в ряде случаев наносят насечки, увеличивающие их шероховатость. На выходе из очага пластической деформации действуют реактивные силы внешнего трения, направленные в сторону, противоположную деформации металла в валках. Эти силы являются примером отрицательной роли внешнего трения, так как препятствуют свободному перемещению металла по поверхности инструмента.

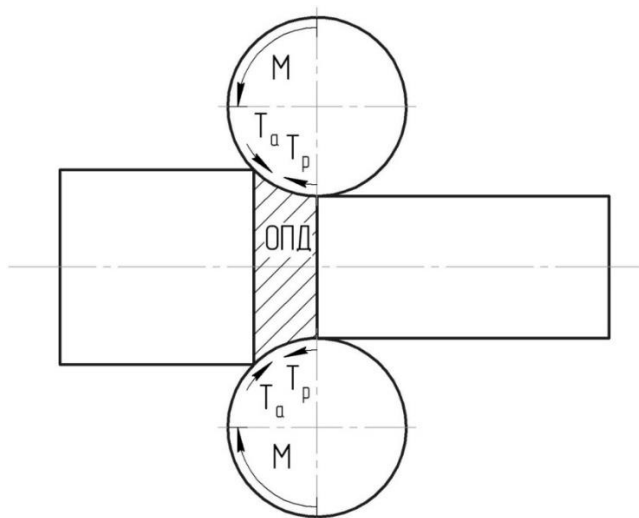


Рис. 29. Схема сил трения при прокатке полосы

Активное действие сил трения наблюдается и при волочении трубы на длинной подвижной оправке (рис. 30). Реактивные силы T_p – это силы, тормозящие скольжение металла, а T_a – активные силы трения. Направление активных сил трения совпадает с направлением внешней силы P .

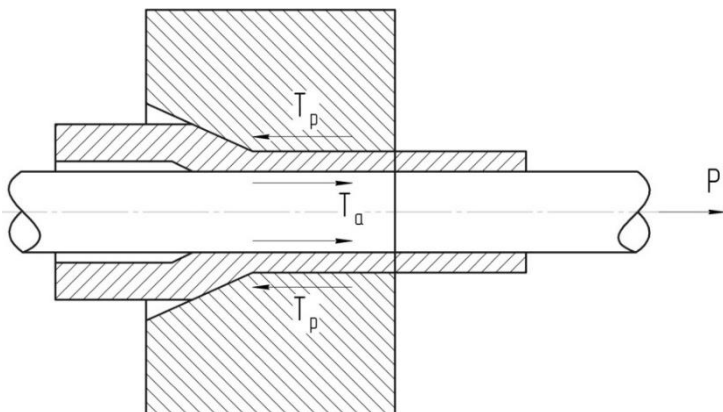


Рис. 30. Схема волочения труб на длинной подвижной оправке

В этом случае силы трения между трубой и оправкой направлены в сторону движения труб и являются активными, а силы трения трубы в волоке направлены против движения и являются реактивными.

Контактное трение ведет к возникновению неоднородности деформаций по объему заготовки, что видно на примере осадки цилиндрической заготовки на плоских бойках без смазки (рис. 31). В этом случае все вертикальные сечения заготовки получают одинаковые деформации. Силы трения T тормозят движение слоев металла, примыкающих к бойкам в радиальном направлении. Слои металла, удаленные от контактной поверхности, деформируются интенсивнее. В связи с этим цилиндрическая заготовка приобретает бочкообразный вид.

Весь объем деформируемой заготовки можно условно разбить на три зоны деформации. Зона I состоит из двух областей «затрудненной» деформации, прилегающих к торцам заготовки. Зона II в осевом сечении заготовки имеет крестообразную форму, в этой

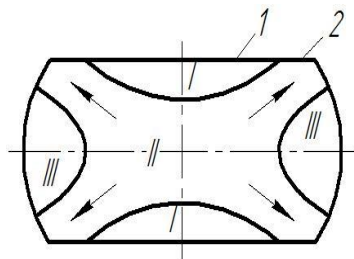


Рис. 31. Схема неравномерности деформации при осадке

зоне наблюдается наиболее интенсивная деформация. В зоне III интенсивность деформации больше, чем в зоне I, но меньше, чем в зоне II. При осадке заготовок из малопластичных материалов в зоне III, под воздействием окружающих растягивающих напряжений, возможно образование трещин, расположенных вдоль образующей.

Для оценки неравномерности деформации пользуются коэффициентом $K_n = \epsilon_l / \epsilon_{ср}$, где ϵ_l – относительная локальная деформация, $\epsilon_{ср}$ – средняя деформация по объему деформируемой заготовки.

Внешнее трение определяет напряженное состояние и сопротивление деформации. Контактные напряжения, суммируясь с основными напряжениями от внешней активной нагрузки, формируют неравномерное поле напряжений по объему деформируемого тела и по поверхности контакта, значительно увеличивают сопротивление деформации металла.

Увеличение усилия деформирования P бывает весьма заметным (рис. 32). Например, полное усилие прессования складывается из нескольких составляющих: $P = R_M + T_M + T_{KP} + T_{II}$, где R_M – усилие на осуществление деформации без учета трения; T_{KP} , T_M , T_{II} – усилия на преодоление сил трения, соответственно, на стенке контейнера, конуса матрицы и канала матрицы.

На преодоление сил трения затрачивается до 30-40 процентов от полного усилия прессования.

Контактное трение снижает стойкость инструмента в результате износа контактной поверхности и образует, например, при волочении на входе заготовки в волоку кольцо износа.

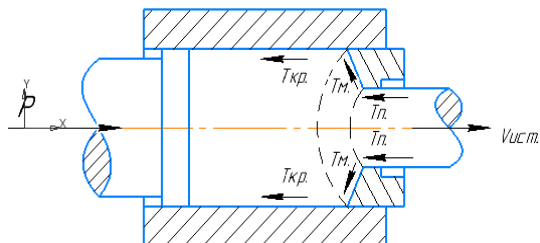


Рис. 32. Схема сил трения при прессовании прутков

Из-за действия сил трения может измениться схема напряженного состояния. При осадке цилиндрических заготовок в плоских бойках при отсутствии контактного трения имеет место линейная схема напряженного состояния, при осадке с трением – объемная схема напряженного состояния.

7.3 Виды внешнего трения

Различают три вида трения: сухое, граничное и жидкостное. Трение называется сухим, если поверхности деформируемого тела и инструмента находятся во взаимном механическом контакте, свободны от третьих веществ и могут перемещаться в касательной к ним плоскости со скоростью V (рис. 33).

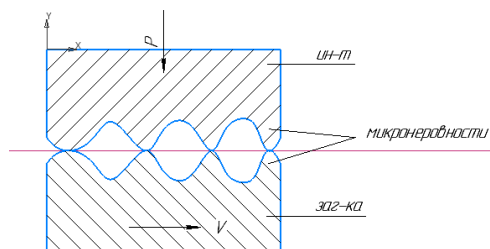


Рис. 33. Схема сухого трения между заготовкой и инструментом

К третьим веществам относятся окислы обрабатываемого материала и инструмента, продукты износа, смазка и т.п.

В чистом виде такое трение при обработке металлов давлением встречается редко, так как имеются на поверхности заготовок окислы, загрязнения, например, при горячей прокатке стальных полос в первых проходах.

Сухое трение предусматривает непосредственный контакт инструмента и заготовки первоначально по вершинам выступов микронеровностей преимущественно заготовки. В процессе сухого трения в условиях больших контактных давлений возможно появление узлов схватывания, разрушение выступов микронеровностей, увеличение площади контакта, ухудшение качества заготовки и повышенный износ инструмента.

Трение называется граничным, если на поверхности трущихся тел адсорбированы вещества, существенно отличающиеся свойствами от материалов инструмента и заготовки (рис. 34). Имеет место зацепление шероховатостей поверхностей контакта.

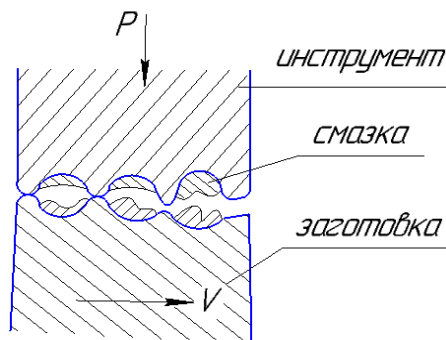


Рис. 34. Схема граничного трения

Это наиболее часто встречающийся на практике вид трения на основе применения смазок. Смазки, содержащие поверхностно-активные вещества, адсорбируются на трущихся поверхностях, образуя прочные клейки. Однако толщина смазки так мала, ($\delta < 10^{-6} - 10^{-4}$ мкм), что шероховатости заготовки и инструмента находятся во взаимном зацеплении.

Трение называется жидкостным, если между трущимися поверхностями имеется слой смазки $\delta > 10^{-4}$ мкм (рис. 35). Жидкостное трение — это внутреннее трение в объеме смазки.

Оно нашло применение при скоростном волочении проволоки (рис. 36). В этом процессе сила трения T уменьшается на один–два порядка. С этой целью используют конические волокни с $\alpha \leq 3^\circ \div 6^\circ$, специальные напорные насадки, устанавливаемые перед волокой с зазором $(0,1-0,2)$ мм, и большие скорости волочения $V > 30$ м/мин.

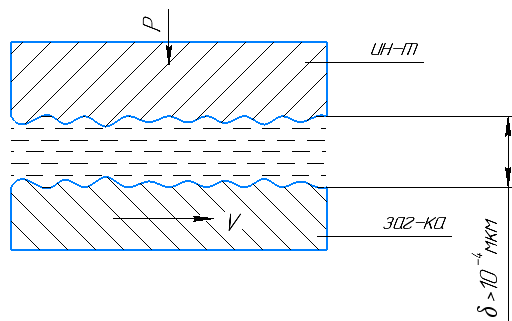


Рис. 35. Схема жидкостного трения

Термин «жидкостное» трение условен, так как смазка может быть консистентной и даже твердой, например, парафин. Главное, чтобы не происходило соприкосновения трущихся поверхностей.

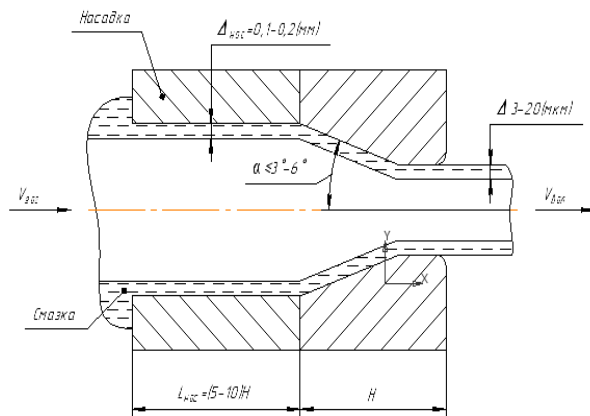


Рис. 36. Схема волочения круглого прутка в режиме жидкостного трения

7.4 Законы трения

На контактное касательное напряжение трения $\tau_k = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta F}$ влияет большое количество факторов:

$$\tau_k = f[\sigma_k, v, \sigma_m(\varepsilon, V, T), \alpha],$$

где σ_k – нормальное напряжение на контакте;

$\sigma_m(\varepsilon, \varepsilon, T)$ – сопротивление металла деформации, зависящее от степени деформации ε , скорости деформации V и температуры T ;

v – скорость скольжения металла по инструменту;

α – характеристика физико-химического и механического состояния трущихся поверхностей.

Из-за сложности описания одновременного влияния на τ_k всех перечисленных факторов на практике используют упрощенные законы трения, предложенные Г. Кулоном, Амонтоном, Зибелем, Ньютоном.

Первым, кто занимался трением, был Леонардо да Винчи (1500 г.). Он установил, что трение зависит от вида контактируемых материалов: медь-сталь, стекло-мел. Если компоненты одинаковые, то сила трения может быть разной. Все зависит от того, какое тело движется. Если мел по стеклу – одна сила, если стекло по мелу – другая сила трения. Сила трения, возникающая при контакте тела с поверхностью другого тела, пропорциональна нагрузке, силе прижатия, направлена против направления движения и не зависит от площади контакта.

В 1699 г. французский ученый Г. Амонтон предложил закон сухого трения:

$$T = \mu \rho,$$

где T – сила трения;

ρ – сила нормального давления;

μ – коэффициент трения.

В 1785г. Ш. Кулон предложил молекулярную теорию трения и вновь открыл закон Г. Амонтона:

$$T = \mu \rho + A,$$

где A – сила молекулярного взаимодействия на площади контакта. При $\rho=0$, $T=A$. В практических расчетах процессов обработки металлов давлением $A=0$, т.к. силы молекулярного взаимодействия малы в сравнении с первым членом.

При переходе от сил к напряжениям закон Амонтона–Кулона имеет вид:

$$\tau_k = \mu \sigma_k. \quad (28)$$

Из формулы видно, что напряжение трения пропорционально нормальному напряжению на поверхности контактирующих тел σ_k и не зависит от сопротивления деформации металла. При расчетах по формуле (28) следует помнить, что $\tau_k \leq \tau_m$, где τ_m – сопротивление металла деформации сдвига.

Если принять гипотезу, что трение не зависит от величины нормального напряжения σ_k , то его можно выразить в долях от величины σ_T и τ_m . Этот закон в такой постановке получил название закон Зибеля:

$$\tau_k = \Psi \tau_m. \quad (29)$$

Закон, формулируется так: «Напряжение трения τ_k пропорционально среднему по области пластического деформирования сопротивлению деформации сдвига».

Области предположительного применения рассмотренных законов трения на практике можно отобразить зависимостью, приведенной на рис.37.

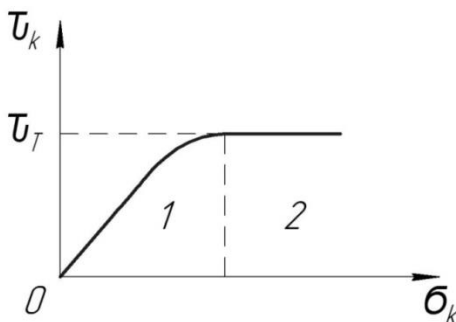


Рис.37. Диаграмма области применения законов трения

В области умеренных значений σ_k 1 справедлив закон Амонтона–Кулона. В области 2 увеличение σ_k не изменяет τ_k и оно остается постоянным $\tau_k \leq \tau_m$, поэтому справедлив закон трения по Зибелю.

Уравнение (28) целесообразно использовать при расчете ряда операций холодной листовой штамповки, а также операций со слабо выраженной схемой всестороннего сжатия при малых степенях деформации.

Уравнение (29) полезно использовать при исследовании процессов горячей деформации металлов с достаточно выраженным всесторонним сжатием (горячая штамповка, прессование) и при больших степенях деформации.

При определении сил жидкого трения, возникающих на контактных поверхностях, используют закон движения вязкой жидкости Ньютона:

$$\tau_k = \eta \frac{dV}{dn},$$

где η – коэффициент вязкости; $\frac{dV}{dn}$ – градиент скорости в направлении n , перпендикулярном действию напряжения τ_k .

Основная предпосылка динамики вязких жидкостей, установленная И. Ньютоном, – «положение о пропорциональности касательного напряжения, вызывающего перемещение одного слоя относительно другого, градиенту скорости в направлении, перпендикулярном относительному перемещению».

Силу трения по гипотезе жидкостного трения определяют по формуле:

$$T = \eta v \frac{F_k}{H},$$

а касательное напряжение:

$$\tau = \eta \frac{v}{H},$$

где v – скорость скольжения;

H – толщина слоя смазки;

F_k – площадь поверхности контакта.

Пример использования законов трения при анализе процесса листовой прокатки дан на рис. 38.

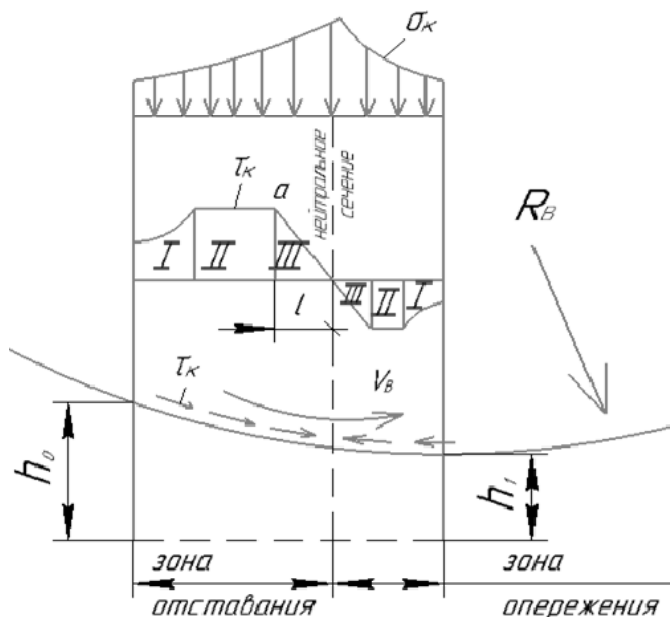


Рис. 38. Распределение контактных напряжений τ_k и σ_k в зонах:
I –скольжения, II – торможения, III– прилипания

Как видно из рисунка, трение по поверхности контакта не постоянно, могут возникать различные условия взаимного перемещения между металлом и инструментом: скольжения и прилипания. Для прокатки зона III – это зона прилипания, средние – зоны торможения II, крайние участки – зоны скольжения I. Контактные напряжения в этих зонах определяются следующими соотношениями:

область скольжения. Металл скользит по поверхности инструмента:

$$\tau_k = \mu \sigma_k;$$

область торможения. В этом случае скольжение может идти как внутри металла, так и на контакте:

$$\tau_k = \mu \sigma_T (\mu = 0,5),$$

где σ_T – сопротивление металла деформации;

область прилипания. Здесь отсутствует скольжение металла по поверхности вала. Сдвиговые деформации идут внутри деформируемого тела:

$$\tau_k = 0,5\sigma_T \frac{x}{l},$$

где x – расстояние от точки α до нейтрального сечения,
 l – протяженность зоны прилипания.

7.5 Основные факторы, влияющие на трение

На величину коэффициента трения на поверхности контакта инструмента и деформируемого металла влияет ряд факторов:

- состояние поверхностей инструмента и заготовки;
- температура деформации;
- скорость относительного скольжения;
- характер приложения внешних сил;
- наличие смазки.

Состояние поверхности рабочего инструмента определяется качеством обработки поверхности и её износа в процессе эксплуатации. Чем меньше шероховатость рабочего инструмента (R_A, R_Z), тем меньше трение. Этот фактор используется довольно гибко. В случае горячей прокатки, чтобы улучшить условия захвата металла и увеличить обжатие, поверхность валков загроубляют, увеличивая её шероховатость. При холодной прокатке наоборот – для снижения давления металла на валки и сил трения прокатные валки шлифуют. Вид обработки поверхности заготовки имеет значение лишь в начальный момент деформации. При её дальнейшем развитии она сглаживается и становится отпечатком поверхности инструмента, его шероховатости.

Чем больше твердость материала инструмента, тем меньше величина коэффициента трения. Так при волочении проволоки наибольший коэффициент трения наблюдается на стальных (У9), меньший – на твердосплавных (ВК 15) и ещё меньший – на алмазных волокнах.

Температура деформации при прокатке стали приводит к появлению окисных пленок на поверхности заготовки, увеличивающих трение (экстремум I) (рис. 39).

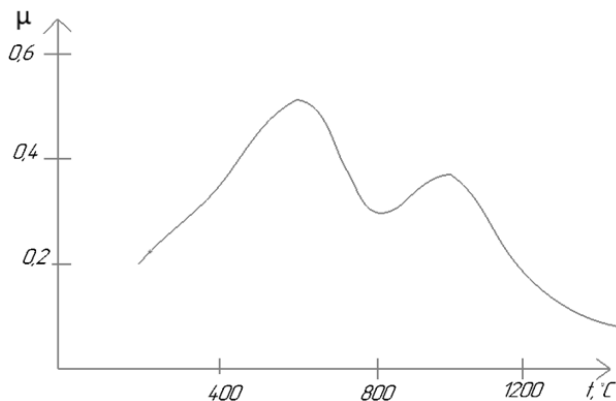


Рис. 39. Изменение величин коэффициента трения в зависимости от температуры деформации

С дальнейшим нагревом окалина размягчается и играет роль смазки. Экстремум II связан со структурными изменениями в окалине с образованием окислов Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO .

Скорость относительного скольжения при её увеличении коррелируется со снижением трения. Известно, что при штамповке на молоте ($v = 3 - 5^{\text{м/с}}$) трение меньше, чем при штамповке на прессе ($v = 0,3 - 0,5^{\text{м/с}}$). Разнообразие факторов, влияющих на μ , нашло отражение в эмпирической формуле Бахтинова при листовой прокатке стали.

$$\mu = K_1 K_2 K_3 (1,05 - 0,0005t),$$

где K – коэффициент, учитывающий материал валков,
 $K_1 = 0,8 - 1,0$;

K_3 – марка прокатываемой стали, $K_3 = 1,0 - 1,6$;

K_2 – скорость прокатки;

t – температура нагрева заготовки.

Характер приложения внешних сил влияет на силовые условия и характер формообразования. Например, применение вибра-

ции при осадке снижает деформирующее усилие в 1,5–2 раза, волочение с противонапряжением уменьшает величину нормальных контактных напряжений на 30–40%, что объясняется снижением сил трения.

Снизить энергосиловые параметры деформации и износ инструмента позволяет применение технологических смазок, которые уменьшают трение скольжения, облегчают заполнение полости инструмента, создают разделительную прослойку, препятствующую местному схватыванию, прилипанию деформируемого металла с инструментом, сокращают потерю тепла заготовки и снижают нагрев инструмента.

Смазки состоят из носителя (вода, минеральные масла, растительные и животные жиры и т.д.), активной части (графит, соль, стекло, алюминиевая пудра, дисульфид молибдена и т.д.) и наполнителя (графит, тальк, мел, слюда, глина и т.д.).

Если смазка предназначена для инструмента, то её капля должна приобретать форму IV (рис.40) или II, что свидетельствует о том, что смазка не склонна к выдавливанию и переходу на деформируемый металл. Формы капли I и III в этом отношении неудовлетворительны. При нанесении смазки на заготовку капля должна приобретать форму I и II. Форма капли III свидетельствует о неограниченной способности смазки к выдавливанию.

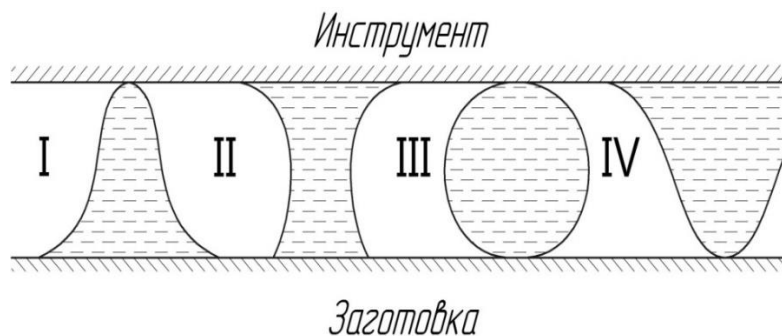


Рис. 40. Формы капель смазки, наносимой на инструмент или заготовку

Правильно выбранная технологическая смазка позволяет значительно снизить величину коэффициента трения.

Смазка	Металл	
	Al	Cu
Без смазки	0,30	0,36
Технич. керосин	0,20	0,26
Маш.масло	0,07	0,12

При горячей обработке металлов давлением наиболее распространенными являются водно-графитовые и графитомасляные смазки. Графит в виде суспензии находится в носителе — воде, масле или летучих растворителях. Иногда к графитомасляной смазке для увеличения ее эффективности добавляют активные составляющие (дисульфид молибдена, соль, смолу и т. д.), что придает ей стабильность и повышенный температурный предел работоспособности.

При холодной обработке давлением смазка должна быть поверхностно активной, чтобы противостоять выжиманию при больших контактных давлениях. Чем тоньше заготовка, тем более тонким должен быть слой смазки.

7.6 Контрольные вопросы

1. Приведите примеры положительной и отрицательной роли внешнего (контактного) трения в процессах пластического деформирования.
2. Дайте определение внешнего контактного трения.
3. Начертите схему процесса волочения труб на длинной подвижной оправке и покажите на ней реактивные и активные силы трения.
4. Нарисуйте график распределения касательных сил трения при прокатке полосы.
5. Опишите состав технологических смазок для уменьшения сил трения.
6. Перечислите отрицательные проявления контактного трения.
7. Назовите основные виды контактного трения.
8. Дайте характеристику сухого трения.
9. Назовите процессы, в которых может быть реализовано жидкостное трение и каковы условия для его реализации?

10. Напишите формулу для определения контактных касательных напряжений при жидкостной смазке.

11. Нарисуйте схему реализации жидкостного трения при волочении.

12. Дайте характеристику граничного трения и условия его существования.

13. Запишите закон Амонтона – Кулона и поясните область его использования.

14. Запишите формулу Зибеля для определения контактного трения и укажите область ее применения.

15. Перечислите факторы, влияющие на величину коэффициента трения.

16. Какова роль контактного трения в процессах обработки давлением.

17. Какие зависимости используют для расчета сил трения?

18. В каких пределах изменяется коэффициент трения μ ?

19. В каких пределах изменяется показатель трения Ψ ?

20. Как влияет на величину показателя трения твердость металла инструмента?

21. Как влияет на величину показателя трения температура деформации?

22. Виды смазок при горячей и холодной обработке давлением.

23. Как влияет на величину показателя трения скорость скольжения металла по инструменту?

8 МЕХАНИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ДЕФОРМАЦИЙ

8.1 Основные понятия

В процессах обработки металлов давлением, исходя из количества действующих напряжений на трех взаимно перпендикулярных площадках, возможны девять схем главных нормальных напряжений: линейные, плоские и объёмные (рис. 41). Схемы

представлены в виде кубиков, грани которых ориентированы в направлении действия главных нормальных напряжений. Наличие напряжения и его направление обозначают стрелкой.

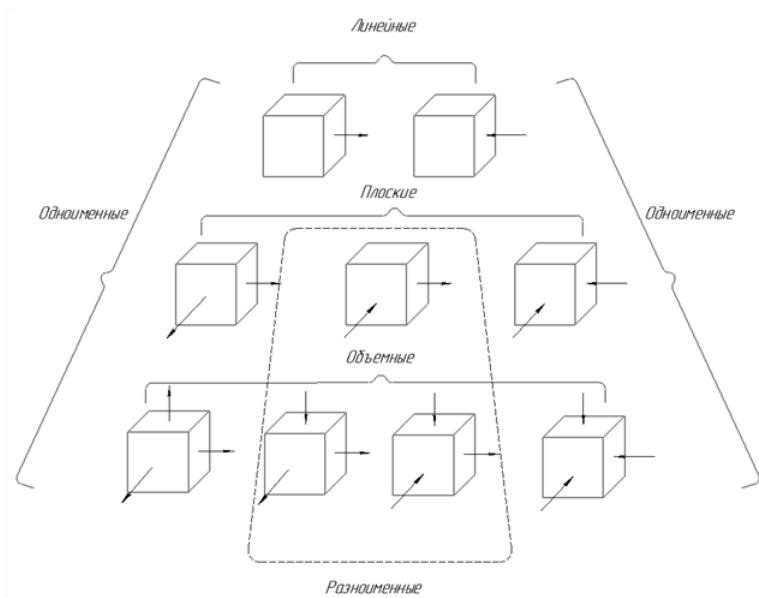


Рис.41. Схемы главных нормальных напряжений

Схемы, имеющие напряжения одного знака, называют *одноименными*, а разных знаков – *разноименными*. Схемы дают графическое представление о наличии и знаке главных нормальных напряжений. Они являются, по предложению С.И. Губкина, классификатором всех видов напряженного состояния деформируемого тела.

Схемы линейного напряженного состояния встречаются на практике редко. Схема линейного растяжения реализуется, например, при растяжении тела, длина которого значительно больше размеров остальных двух измерений (растяжение струны, канатов и т.п.). Плоская схема напряженного состояния с известным приближением может быть создана при растяжении тонкой пластины по контуру. Объемное напряженное состояние возникает почти

при всех процессах обработки металлов давлением (прокатка, прессование, горячая штамповка, волочение).

При обработке металлов давлением различают три схемы главных деформаций, предложенные С.И. Губкиным (рис. 42).

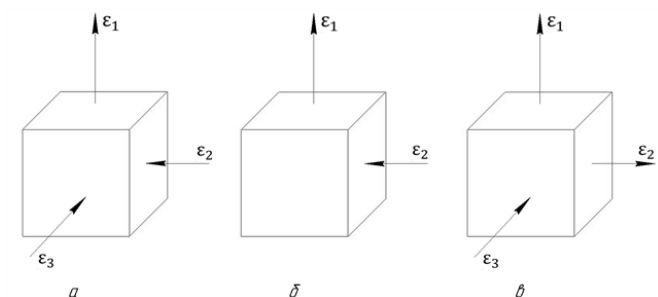


Рис. 42. Схемы главных деформаций

Из условия постоянства объёма (несжимаемости), широко используемого в процессах обработки металлов давлением, $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0$ следует, что три главные деформации не могут быть одного знака, а схемы деформаций могут быть только разноименные. Поэтому не может быть линейных схем деформации. Реально осуществимы только одна плоская (рис. 42,б) и две объёмных (рис. 42, а, в) схемы.

Механические схемы деформаций – это сочетание схем главных нормальных напряжений (рис. 41) и схем главных деформаций (рис. 42).

В табл. 1 приведены механические схемы деформаций основных технологических процессов: прессование, прокатка листов, осадка и волочение.

Из табл. 1 видно, что усилие деформации и пластичность зависят не только от схемы напряженного состояния, но и от схемы деформированного состояния.

При одной и той же схеме напряженного состояния, схемы деформированного состояния могут быть различны, например, осадка и прессование. И, наоборот, при одной и той же схеме деформированного состояния схемы напряженного состояния различны, например, прессование и волочение.

**Таблица 1. Механические схемы деформации
основных технологических процессов**

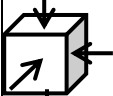
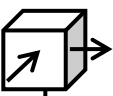
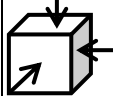
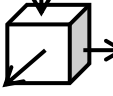
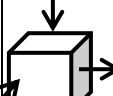
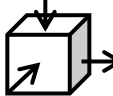
Процесс	Схема напряженного состояния (σ)	Схема деформированного состояния (ϵ)	Усилие деформации	Пластичность
Прессование			Высокое	Отличная
Прокатка листов			Высокое	Хорошая
Осадка			Среднее	Удовлетворительная
Волочение			Низкое	Пониженная

Схема главных деформаций позволяет судить, в каком направлении течёт металл, как изменяется характер физических и механических свойств металлов. Например, при схеме на рис. 42,а зерна металла удлиняются в направлении положительной деформации. Интенсивно происходит упрочнение металла, образуется полосчатость микроструктуры и текстура деформации. При схеме деформаций на рис. 42,в зерна металла как бы сплющиваются. Включения инородных металлов и примесей рассеиваются в направлениях положительных деформаций, что оказывает неблагоприятное воздействие на свойства металла.

8.2 Диаграмма видов напряженного состояния

По механическим схемам деформации можно судить о пластичности металла. Пластичность всегда больше в схемах со сжимающими напряжениями, чем в схемах с растягивающими напря-

жениями. Наибольшим усилием деформации отличаются металлы в условиях деформирования при одноименных схемах. В условиях разноименных схем напряженного состояния усилие снижается.

Если известна схема главных деформаций, то по ней нельзя судить о схеме главных напряжений. Если известна схема главных нормальных напряжений, то по ней всегда можно найти вид схемы главных деформаций.

Механических схем деформаций может быть только 23.

Любую схему напряженного состояния можно определить в виде точки на диаграмме видов напряженного состояния (рис. 43) в координатах (v_σ, σ°) , где v_σ – показатель вида напряженного состояния;

$$v_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3},$$

σ° – безразмерное среднее напряжение:

$$\sigma^\circ = \frac{\sigma_{cp}}{\tau_{окт}}, \quad \sigma_{cp} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3},$$

$\tau_{окт}$ – октаэдрическое напряжение:

$$\tau_{окт} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

На рис. 43 область IV выше qr – трехосное растяжение, область III (qpn) – объемная разноименная схема (два растяжения и одно сжатие), область II (pnm) – объемная разноименная схема (одно растяжение и два сжатия), область I ниже mn – область всестороннего сжатия.

На линиях mn , pr , pq реализуется плоское напряженное состояние: на mn – плоская схема сжатия, на pr – сдвиговая схема напряженного состояния (одно растяжение и одно сжатие), на pq – схема плоского растяжения.

В точках q и n реализуются линейные схемы напряженного состояния, в точке q – схема линейного растяжения, в точке n – линейного сжатия.

Диаграмма $v_\sigma - \sigma$ дает наглядное представление о том, как изменяется напряженное состояние с изменением среднего напряжения σ° и v_σ . Например, в области II реализуются схемы напряженного состояния, отвечающие процессу волочения (рис.44). Если

волочению подвергается осесимметричное изделие (круглый пруток), то напряженное состояние этого процесса реализуется на линии mp . Наличие высокого гидростатического давления σ° при входе в волоку, определяемое точкой m на диаграмме, вызывает износ волоки. На выходе из очага пластической деформации напряженное состояние определяется точкой p . Растягивающие напряжения могут привести к разрушению.

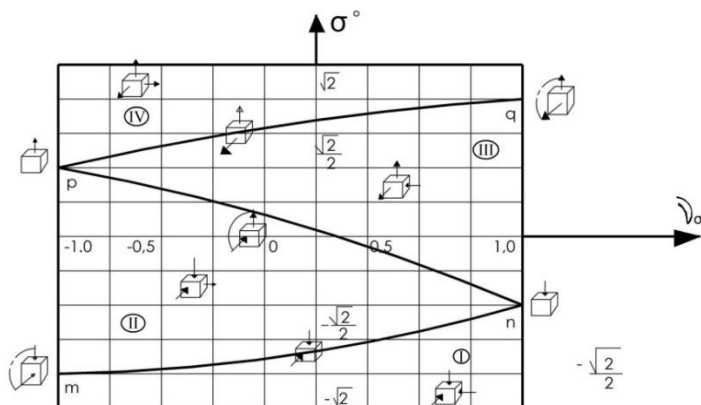


Рис. 43. Диаграмма видов напряженного состояния

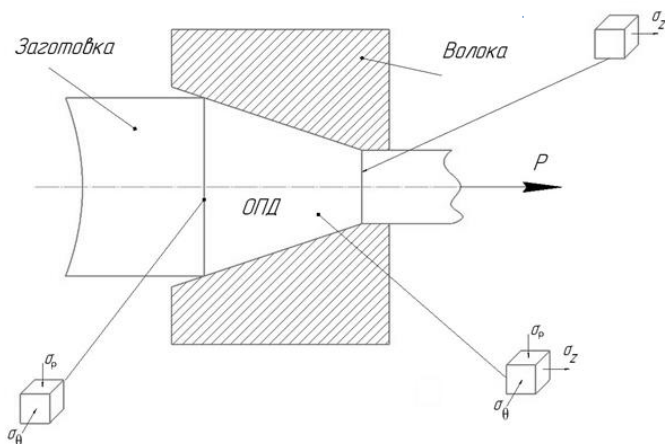


Рис.44. Анализ напряженного состояния при волочении

Диаграмма позволяет классифицировать все процессы обработки давлением с точки зрения напряженного состояния: область I – прессование, прокатки, область III – операцииковки (осадка, протяжки.) Область II – волочение линии pq , qn , tn операции листовой штамповки.

8.3 Контрольные вопросы

1. Опишите схемы главных нормальных напряжений.
2. Какую роль играют схемы главных нормальных напряжений?
3. Опишите схему главных нормальных напряжений для процесса прессования.
4. При каких схемах главных нормальных напряжений пластичность деформируемого металла высокая?
5. При каких схемах главных нормальных напряжений сопротивление деформированию наибольшее?
6. Приведите примеры использования плоской схемы напряженного состояния.
7. Опишите схемы главных деформаций в процессах обработки давлением.
8. Проведите доказательство, что схем главных деформаций может быть только три.
9. Дайте определение механической схемы деформаций.
10. Назовите общее число механических схем деформаций.
11. В каких координатах строят диаграмму видов напряженного состояния?
12. Что характеризует показатель вида напряженного состояния?
13. Что характеризуют схемы главных деформаций?
14. Используя диаграмму видов напряженного состояния, проведите анализ процесса волочения.

9 ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫЕ УСЛОВИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

9.1 Классификация видов пластической деформации

Основные критерии деления пластической деформации на виды – это температура, степень и скорость деформации. Они определяют соотношение процессов упрочнения (наклеп) и разупрочнения (возврат, рекристаллизация) в деформируемом металле.

Явление, связанное с повышением прочностных свойств металлов (σ_B, σ_T), называется упрочнением. Если в ходе пластической деформации прочностные характеристики понижаются, то речь идет о разупрочнении металлов. В зависимости от того, какой из процессов является преобладающим, результаты деформации будут различны. По С.И. Губкину в зависимости от величины температуры нагрева металла различают холодную, неполную холодную, неполную горячую и горячую пластическую деформацию.

Холодную пластическую деформацию проводят ниже температуры возврата при:

$$T \leq T_{nl},$$

где T_{nl} – абсолютная температура плавления металла по Кельвину.

Холодная деформация сопровождается высоким эффектом упрочнения и относительно малыми пластическими свойствами металла. Чем больше степень деформации, тем выше степень упрочнения металлов.

Неполную холодную пластическую деформацию проводят при температурах $(0,3-0,5) T_{nl}$. Рекристаллизация отсутствует, но процесс возврата успевает произойти, что повышает ресурс пластичности металла путем снятия остаточных напряжений.

Неполную горячую пластическую деформацию проводят при температурах, близких к температуре рекристаллизации, в интервале $(0,5-0,7) T_{nl}$. Скорость деформирования выбирают такой, что в процессе пластической деформации рекристаллизация происходит

не полностью. Металл содержит два типа микроструктур: упрочненные деформированные зерна и разупрочнённые рекристаллизованные зерна. Это приводит к неравномерности деформации при обработке.

Горячая деформация проводится при температурах выше $0,7T_{пл}$, но ниже $0,9T_{пл}$ и с такой скоростью деформирования, что металл получает полностью рекристаллизованную структуру.

Скорость деформации оказывает двойное влияние на процессы горячей обработки металлов давлением. С одной стороны, повышение скорости деформации приводит к понижению пластичности и повышению прочности, если скорость упрочняющих процессов выше скорости разупрочняющих процессов. С другой стороны, при деформировании с высокими степенями и скоростями деформации происходит разогрев металла, тепло не успевает рассеиваться в пространстве. Скорость разупрочняющих процессов в период деформирования больше скорости упрочняющих процессов.

Влияние скорости деформации упрочняющих процессов полученного при скорости испытания $\dot{\epsilon}_0 = 1 \cdot 10^{-1} (C^{-1})$ при различных видах пластической деформации и величины скорости деформации показано в табл.2

Таблица 2. Значения скоростных коэффициентов

Изменение скорости деформации $\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}_0}$	Гомологическая температура			
	Холодная деформация $\leq 0,3T_{пл}$	Неполная холодная $(0,3-0,5)T_{пл}$	Неполная горячая $(0,5-0,7)T_{пл}$	Горячая $>0,7T_{пл}$
В 10 раз	1,05-1,10	1,10-1,15	1,15-1,30	1,30-1,50
В 100 раз	1,10-1,22	1,22-1,32	1,32-1,70	1,70-2,25
В 1000 раз	1,16-1,34	1,34-1,52	1,52-2,20	2,20-3,40

Горячая деформация является наиболее благоприятной для деформирования металлов. Она улучшает структуру и механические свойства. При правильно выбранных температурно-скоростных условиях и степени обжатия в результате горячей деформации получается мелкозернистая структура, за счет чего по-

вышаются показатели сопротивления деформированию и пластичности.

Достоинство горячей деформации в сравнении с холодной: получение мелкозернистой структуры, повышение пластичности металла, применение оборудования меньших усилий, устранение промежуточного отжига, меньшая опасность разрушения.

К недостаткам можно отнести: низкое качество поверхности изделий, снижение точности размеров, неоднородность структуры и свойств по объему металла.

Горячая деформация является обязательной технологической операцией в процессахковки и горячей объемной штамповки, горячей прокатки, горячего прессования.

Достоинство холодной деформации –это получение точных размеров и хорошей поверхности изделий, тонких полуфабрикатов, изготовление нагартованных изделий, формирование рациональной анизотропии механических свойств, повышение прочностных свойств.

К недостаткам можно отнести: понижение коррозионной стойкости, пластичности, электропроводности.

Холодная деформация является обязательной технологической операцией в процессах холодной прокатки листов, холодной листовой штамповки, холодного волочения проволоки и прутков, холодного выдавливания.

9.2 Тепловой эффект деформации

Часть энергии, расходуемой на пластическую деформацию металла, превращается в тепловую энергию. Вследствие выделенного тепла температура металла повышается. Это явление получила название теплового эффекта деформации. Тепловой эффект зависит от скорости деформирования и степени деформации. При прочих равных условиях тепловой эффект зависит от температуры и уменьшается с его повышением.

Коэффициент выхода тепловой энергии:

$$n_{\text{вых}} = \frac{A_m}{A},$$

где A_m количество работы, расходуемое на повышение температуры металла на величину ΔT_ε , A – величина полной работы при деформации заготовки.

Губкин С.И. показал, что коэффициент выхода тепловой энергии для чистых металлов Al, Mg, Cu, Fe (0,85-0,90), сплавов (0,75-0,85).

На рис. 45 показано изменение температуры алюминиевой полосы при горячей и холодной прокатке в зависимости от начальной температуры деформации по проходам. При холодной прокатке температура металла с 20 °С повышается до 180 °С.

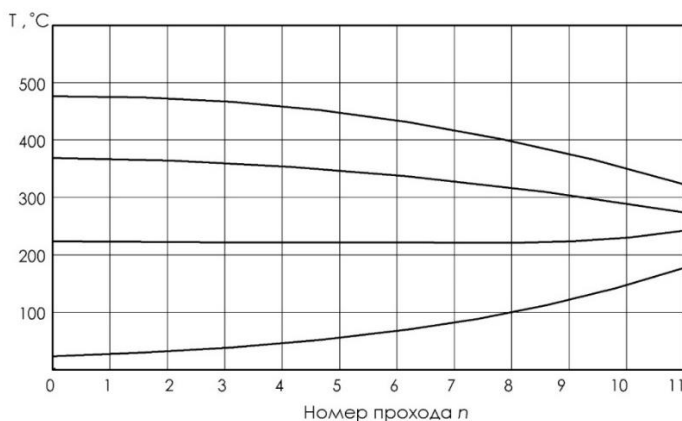


Рис.45. Изменение температуры по проходам при горячей и холодной прокатке

При горячей прокатке температура металла понижается с 480 °С до 330 °С. Если прокатывать металл с 200 °С, то после 11 проходов его температура практически не изменяется, так как одновременно происходит уменьшение температуры металла за счет теплоотдачи и разогрев за счет теплового эффекта.

При расчете теплового эффекта ΔT_ε примем допущение, что пластическая деформация металла – это адиабатический процесс,

когда все тепло при формоизменении не успевает рассеяться в окружающую среду, а остается в металле. При этом температура металла повышается.

$$T_{Me} = T_0 + \Delta T_\varepsilon,$$

где T_0 – исходная температура металла.

Количество тепла, необходимое для разогрева металла с массой m , удельной теплоемкостью C от температуры T_1 до температуры T_2 равно:

$$Q_\varepsilon = mC(T_1 - T_2) = \rho VC\Delta T_\varepsilon,$$

где ρ – плотность металла; V – объем металла заготовки.

Полная работа пластической деформации:

$$A = P_{y\partial} \cdot V_{CM} = P_{y\partial} V \ln e_{\max},$$

где $P_{y\partial}$ – среднее удельное усилие в рассматриваемом процессе;

V_{CM} – смещенный объем металла;

$e_{\max}$ – максимальная деформация в одном из главных направлений.

Используя закон сохранения энергии $Q_\varepsilon = \eta_{\text{вых}} A$, получим:

$$\Delta T_\varepsilon = \eta_{\text{вых}} \frac{P_{y\partial} \ln e_{\max}}{C\rho}.$$

Тепловой эффект появляется неравномерно по всему объему металла. Он проявляется интенсивнее в тех местах, где локализируются пластические деформации.

9.3 Температурный режим горячей деформации

Для горячей обработки металлов давлением при установлении температурного режима, определяемого температурой ниже T_n и конца T_k данного процесса, используются следующие диаграммы: состояния, пластичности и рекристаллизации.

Температурный режим выбирают так, чтобы при верхних предельных температурах T_n не происходило перегрева или пере-

жога металла, а при нижних температурах T_k усилие деформации оказалось меньше паспортного усилия оборудования.

По диаграмме состояния на рис. 46 предварительно определяется интервал температур для горячей обработки металлов давлением.

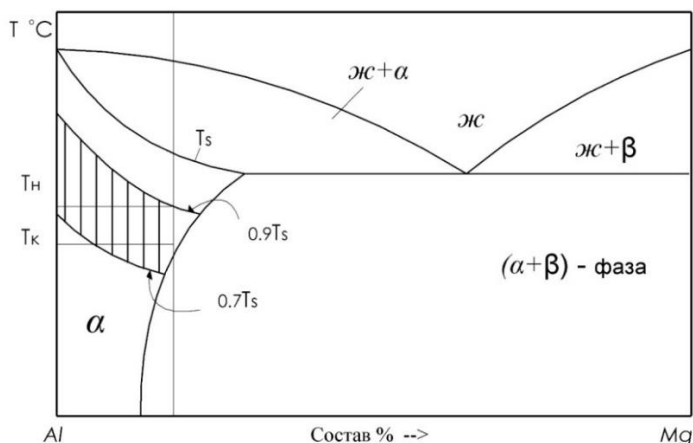


Рис. 46. Диаграмма состояния системы AL-Mg

Верхний предел температурного интервала T_n ограничивает линия солидуса T_s , т.е. $T_n \leq 0,9T_s$. Нижний предел температурного интервала пластической деформации T_k определяется кривой изменения фазового состояния. Его принимают на (20-30)% выше линии ограниченной растворимости в твердом виде, так как деформация металла в двухфазной области приводит к снижению пластичности. Для уточнения температурного интервала необходимо использовать диаграмму пластичности (рис.47), по которой находится по параметрам δ и Ψ участок максимальной пластичности и по параметрам σ_m , σ_g – минимальное сопротивление деформированию.

Он показан на рис.47 пунктирной линией и определяет для алюминиевого сплава АМг5 температурный интервал горячей деформации (400-500) $^{\circ}\text{C}$.

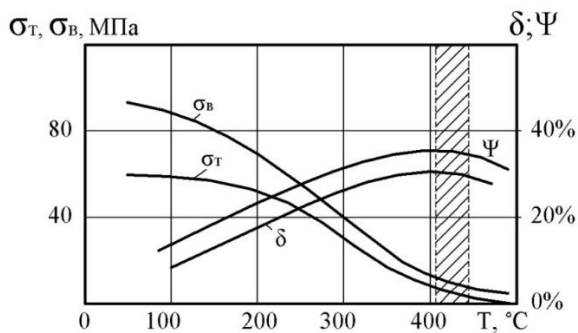


Рис.47. Диаграмма пластичности алюминиевого сплава АМг5

По диаграмме рекристаллизации (рис.48) можно определить величину зерна, которое будет образовываться при выбранном температурном режиме.

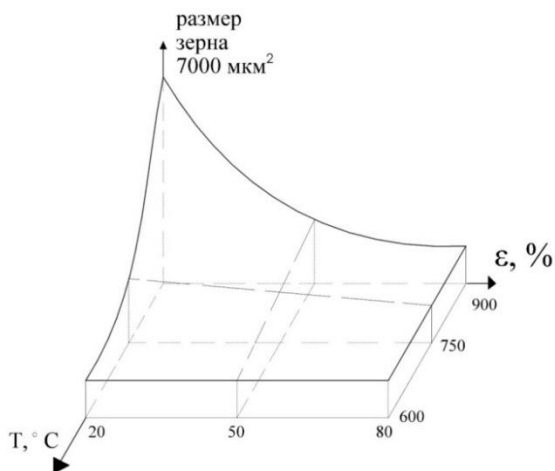


Рис.48. Диаграмма рекристаллизации для меди

Начальная температура нагрева металла $T_{нагр}$ с учетом теплового эффекта и охлаждение при температуре транспортировки металла к оборудованию:

$$T_{нагр} = T_p + \Delta T_{тр} + \Delta T_{\varepsilon},$$

где $\Delta T_{тр}$ – падение температуры при транспортировке.

$$\Delta T_p = V_{охл} \tau_{тр},$$

где $V_{охл}$ – скорость охлаждения; $\tau_{тр}$ – время транспортировки.

9.4 Контрольные вопросы

1. Перечислите критерии деления видов пластической деформации.
2. Какие явления связаны с процессом упрочнения?
3. Какие явления связаны с процессом разупрочнения?
4. При каких температурах проводят холодную деформацию?
5. При каких температурах проводят неполную холодную пластическую деформацию?
6. При каких температурах проводят неполную горячую пластическую деформацию?
7. При каких температурах проводят горячую пластическую деформацию?
8. Как влияет скорость деформации на процессы горячей обработки металлов давлением?
9. Назовите наиболее благоприятный вид пластической деформации для деформирования металлов.
10. Опишите тепловой эффект деформации.
11. Какие факторы влияют на величину теплового эффекта деформации?
12. На основании какого закона получают формулу для расчета теплового эффекта деформации?
13. Какие диаграммы используют при установлении температурного режима горячей деформации?
14. Как выбирают верхнюю границу температурного режима горячей деформации?
15. Как выбирают нижнюю границу температурного режима горячей деформации?

16. По какой диаграмме можно определить величину зерна, которое будет образовываться при выбранном температурном режиме?

10 НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ

10.1 Неравномерность деформации и дополнительные напряжения

При равномерной деформации напряжения и деформации в различных точках изотропного, однородного деформируемого тела одинаковы. Прямые линии, проведенные в теле до деформации, остаются прямыми и после деформации (рис. 49).

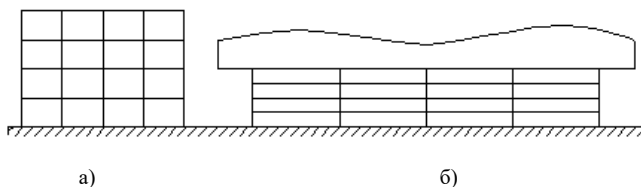


Рис. 49. Схема осадки квадратной заготовки в условиях равномерной деформации:
а – до деформации; б – после деформации

В реальных процессах обработки металлов давлением напряжения и деформации будут изменяться при переходе от одной точки к другой. В целом по телу возникает как неравномерность напряженного состояния, так и неравномерность деформаций.

В процессе пластической деформации отдельные слои (части, элементы, объемы) тела стремятся получить неравномерные необратимые изменения размеров и формы, чему препятствует целостность металла.

Пусть в деформируемом теле (рис. 50,а) две части А и В разграничены условной поверхностью *mn*. Предположим, что эти две

части в результате приложения внешней силы получают различные изменения размеров. Если бы элементы А и В могли изменять свою форму обособленно друг от друга, то в результате деформации они приняли бы вид, как на рис. 50,б. Так как при деформации сохраняется сплошность тела, то частицы «а» элемента А взаимодействуют с частицами «в» элемента В. Поэтому элемент В передает на элемент А силы T_A , стремящиеся увеличить размеры А, а элемент А, наоборот, передает на элемент В силы T_B , стремящиеся сдержать его деформацию (рис. 50,в).

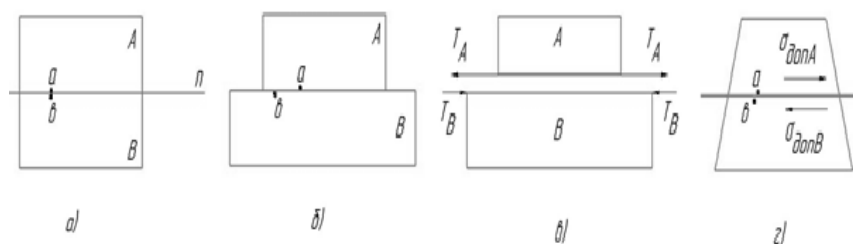


Рис. 50. Модель образования дополнительных напряжений

Таким образом, в теле на границе элементов, деформирующихся с разной интенсивностью, возникают взаимно уравновешивающиеся внутренние напряжения $\sigma_{донА}, \sigma_{донВ}$ (рис. 50,г). Их называют дополнительными напряжениями. Они не зависят от схемы напряженного состояния, определяемого внешними силами, а возникают как следствие разницы в деформациях отдельных элементов тела.

С.И. Губкин сформулировал закон дополнительных напряжений, на основании которого определяется знак дополнительных напряжений.

«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».

Дополнительные напряжения могут быть трех родов:

- а) дополнительные напряжения первого рода, уравнивающиеся между отдельными слоями тела;
- б) дополнительные напряжения второго рода, уравнивающиеся между отдельными кристаллитами (зернами);
- в) дополнительные напряжения третьего рода, уравнивающиеся между отдельными элементами кристаллитов.

Дополнительные напряжения, суммируясь с основными напряжениями, приводят к следующим последствиям:

- а) повышение сопротивления деформированию;
- б) изменение распределения напряжений;
- в) понижение технологических свойств металла (появление трещин за счет растягивающих напряжений).

10.2 Причины неравномерности деформаций

К основным причинам неравномерности деформаций в процессах пластического деформирования относят:

- несоответствие формы заготовки форме готового изделия или инструмента;
- наличие внешнего трения на контактных поверхностях заготовки и инструмента;
- неоднородность физико-механических свойств деформируемой заготовки;
- характер приложения внешних сил.

Во многих случаях деформирования имеет место несоответствие формы заготовки форме инструмента или готового изделия. Например, при сортовой прокатке форма калибров валков отличается от формы заготовки (рис. 51). Если квадратную заготовку условно представить в виде набора узких полос металла, то каждая из них будет удлиняться пропорционально своему обжатию по высоте в калибрах валков. Как видно из рис. 51, в сечении 1-1 удлинение узкой полосы при обжатии максимальное, в сечении 2-2 минимальное. Металл в области сечения 1-1 стремится к удлинению, но удерживается металлом в области сечения 2-2 и в

нем возникают дополнительные сжимающие напряжения. В свою очередь, металл в сечении 2-2 стремится увеличить деформацию металла в сечении 1-1 и получает дополнительные растягивающие напряжения.

Влияние внешних сил трения на неравномерность деформации показано на примере осадки цилиндрической заготовки на плоских бойках без смазки (рис. 31).

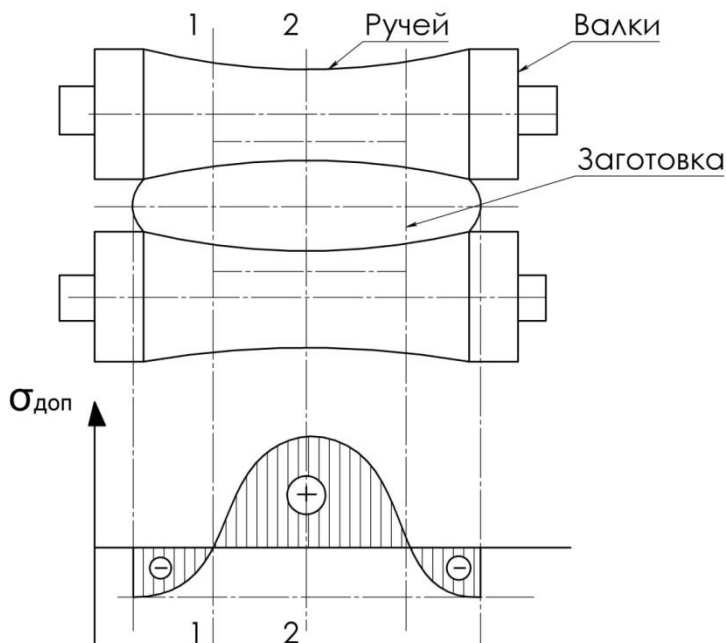


Рис. 51. Схема неравномерной деформации при сортовой прокатке

Влияние неоднородности физико-механических свойств видно на примере обработки неравномерно нагретой заготовки или деформируемой заготовки, составленной из разных металлов (биметалл).

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 слоях. При большем перепаде

температур и высокой степени деформации в объеме заготовки при малой пластичности металла дополнительные напряжения растяжения могут вызвать разрывы внутренних слоев. Аналогичная картина имеет место при деформации биметаллической заготовки из металлов с разными механическими свойствами. В мягких слоях появятся дополнительные напряжения сжатия, а в твердых – растяжения.

10.3 Остаточные напряжения

После прекращения действия внешних сил, вызывающих пластическую деформацию, снимаются только основные напряжения, определяющие величину упругой деформации. Дополнительные напряжения остаются в изделии после разгрузки. Их называют остаточными напряжениями первого, второго и третьего рода, действующими соответственно между частями тела, кристаллитами и в кристаллите – между группами атомов.

В процессе прессования основные причины появления остаточных напряжений – неравномерность деформаций как результат совместного действия сил трения и формообразующей матрицы. При пластической деформации центральные слои металла деформируются меньше, чем периферийные. После прессования знак деформации при разгрузке изменяется на противоположный. В периферийных слоях прутка возникают деформации укорочения. Так как центральные слои сдерживают упругое сокращение периферийных слоев, то они остаются в растянутом положении. В результате в пресс-изделии в центральных слоях возникают продольные остаточные напряжения сжатия, а в периферийных – растяжения (рис. 52).

После прессования диаметр прутка несколько увеличивается из-за действия остаточных радиальных напряжений. На поверхности прутка $\sigma_{г\text{ост}} = 0$. Внутри слои металла действуют друг на друга подобно трубам, собранным с натягом.

Под действием остаточных радиальных напряжений в периферийных слоях окружные остаточные напряжения растягиваю-

щие, так как они подвержены действию внутреннего давления. А поскольку остаточные напряжения уравновешены внутри прутка, то внутренние слои испытывают действие сжимающих окружающих напряжений.

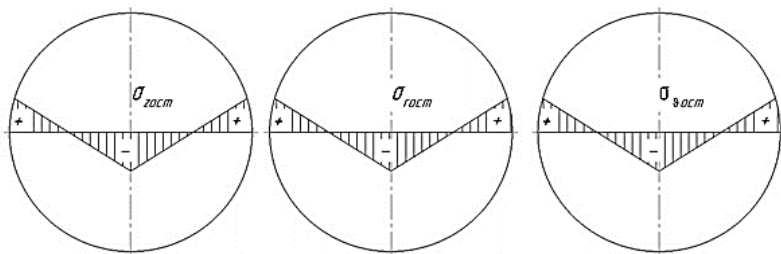


Рис. 52. Распределение остаточных напряжений

Прессование приводит к появлению в некруглых профилях остаточных напряжений, которые вызывают коробление, скрутку, продольную и поперечную кривизну, трещины.

В большинстве случаев остаточные напряжения нежелательны, поскольку они ухудшают служебные свойства изделий: снижают коррозионную стойкость, пластичность, ударную вязкость и предел выносливости.

Остаточные напряжения первого рода могут вызвать искажение формы изделия. В качестве примера возникновения остаточных напряжений, приводящих к искажению формы изделия, рассмотрим прокатку тонкого листа. Тепловая выпуклость бочки вала приводит к неравномерности деформаций по ширине прокатываемой полосы. Внутренние взаимно уравновешивающиеся силы создают остаточные напряжения растяжения в крайних слоях полосы и сжатия – в центральных слоях, что приводит к появлению в них дефекта «коробоватость» (рис. 53,а). Изгиб рабочих валков в результате действия больших внешних сил формирует в полосе остаточные напряжения растяжения в центральных слоях и сжатия – в крайних слоях, что приводит к появлению в них дефекта «волнистость» (рис. 53,б).

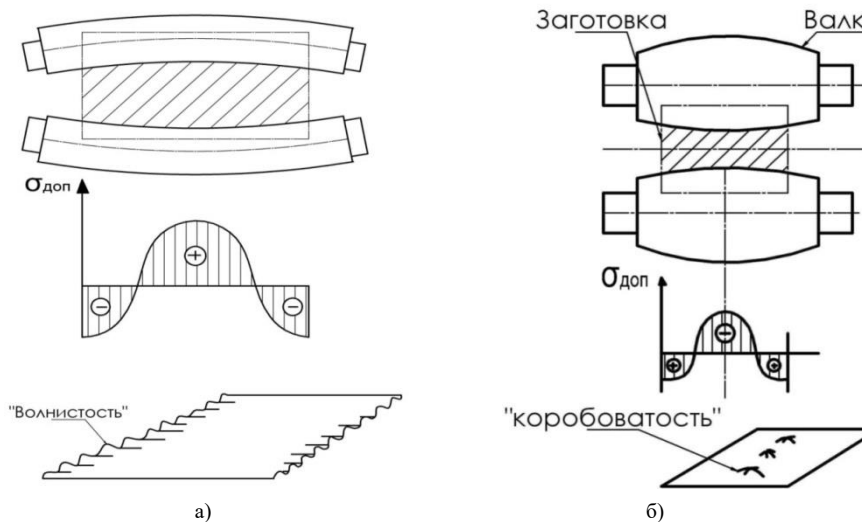


Рис.53. Схема образования дефектов при прокатке полос:
а – дефект «коробоватость»; б – дефект «волнистость»

Основной метод устранения остаточных напряжений – предотвращение их появления правильным режимом обработки, при котором неравномерность деформации сводится к минимуму. Для достижения этого необходимо форму заготовки постепенно приближать к форме готового изделия, заготовку изготавливать из однородного материала, обрабатывать ее при минимальном трении и равномерно распределенной по объему температуре.

10.4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение и пример равномерной пластической деформации.
2. Назовите основные причины неравномерности пластической деформации.
3. Приведите примеры технологических процессов, где проявляется влияние геометрических факторов, приводящих к неравномерной деформации.

4. Укажите несколько физических факторов, приводящих к неравномерности деформации.
5. В каких случаях остаточные напряжения в изделиях нежелательны?
6. Как зависит величина неравномерности деформации от продольной координаты в процессе осадки цилиндрического образца? Проиллюстрируйте графически.
7. Какие меры принимают с целью выравнивания деформаций по объему деформируемой заготовки?
8. Приведите примеры образования дефектов в изделиях вследствие неравномерности деформаций.
9. Приведите примеры технологических процессов, где проявляется влияние контактных сил трения, приводящих к неравномерной деформации.
10. Назовите основные причины образования остаточных напряжений.
11. Как классифицируют дополнительные и остаточные напряжения?
12. Сформулируйте закон дополнительных напряжений.
13. Опишите модель образования дополнительных напряжений.
14. К каким последствиям приводят дополнительные напряжения?
15. В каких случаях остаточные напряжения в изделиях нежелательны?

11 ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

11.1 Формулировка принципа

При решении задач обработки металлов давлением необходимо знать перемещения металла и соотношения между этими перемещениями в разных направлениях. Качественно направление те-

чения M_e определяют на основании принципа наименьшего сопротивления, предложенного Г. Треска в 1695 г.

«В случае возможности перемещения точек деформируемого тела в различных направлениях каждая его точка перемещается в направлении наименьшего сопротивления».

Сопротивление на пути перемещения может быть внутренне-го или внешнего трения.

Принцип наименьшего сопротивления используют, например, при горячей штамповке заготовок в открытых штампах (рис. 54).

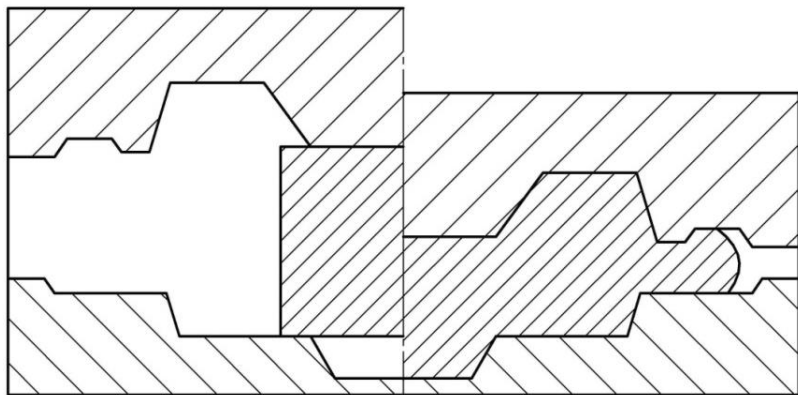


Рис. 54. Схема заполнения гравюры штампа

Металл заготовки в начальный период штамповки перемещается в радиальном направлении за пределы гравюры штампа, так как сопротивление течению металла в разъеме между верхней и нижней половинами штампа в вертикальном направлении большое. По мере смыкания половин штампа зазор между ними уменьшается, сопротивление течению металла в радиальном направлении резко возрастает, а в вертикальном уменьшается, что обеспечивает заполнение всех элементов полости гравюры штампа.

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

11.2 Принципы кратчайшей нормали и наименьшего периметра

Для случая осадки призматических тел между параллельными шероховатыми плитами при наличии трения по плоскостям контакта с заготовкой траектории определяются по принципу кратчайшей нормали, сформулированного А.Ф. Головиным.

«Перемещение любой точки тела в плоскости, перпендикулярной к действию внешней силы, происходит по кратчайшей нормали к периметру сечения».

Максимальную конечную деформацию тело получит в тех направлениях, по которым будет передвигаться наибольшее количество точек.

Согласно указанному принципу, прямоугольник можно разделить на два треугольника и две трапеции линиями, представляющими собой граничные линии или линии раздела сечения (рис. 55).

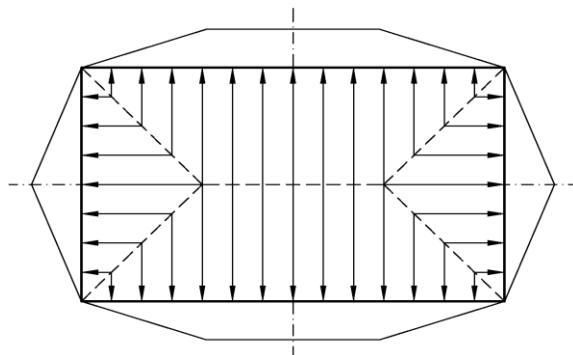


Рис. 55 Направление движения точек при осадке прямоугольной призмы в условиях значительного трения

Нетрудно представить, что при увеличении степени деформации при осадке тела контур поперечного сечения первоначально стремится к эллипсу, а эллипс в дальнейшем преобразуется в круг, после чего движение точек происходит по радиусам.

Траектория, по которой движутся точки деформируемого тела, подчиняется принципу наименьшего периметра.

Любая форма поперечного сечения призматического или цилиндрического тела при осадке его в условиях максимального контактного трения стремится принять форму фигуры, имеющей при данной площади наименьший периметр, т.е. в пределе стремится к кругу. Действие принципа может быть реализовано для получения осадкой круглых в плане поковок из заготовок квадратного поперечного сечения.

Этот принцип позволяет наиболее рационально подбирать форму поперечного сечения исходных заготовок для конкретных случаев пластического деформирования.

Следует отметить, что последние два принципа справедливы для случая, когда трение на поверхностях контакта металла с инструментом изотропно, т.е. одинаково по всем направлениям и значительно.

При осадке заготовки, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда, плоскими бойками при отсутствии контактного трения движение частиц в плоскостях, нормальных к направлению действия внешней силы, носит радиальный характер. Поперечные сечения в процессе деформации будут оставаться подобными исходному сечению (рис. 56).

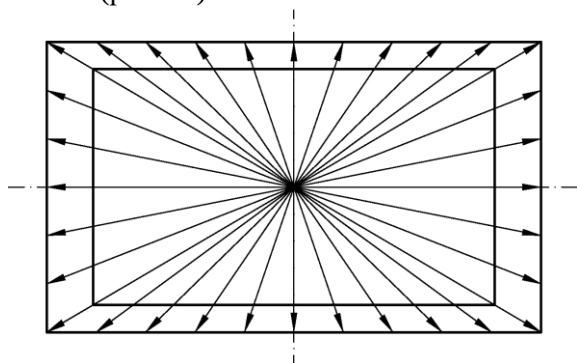


Рис.56. Направление движения точек при осадке заготовки без трения

Из закона наименьшего сопротивления вытекает принцип минимума полной энергии деформации. Его можно сформулировать так:

«Любое ограничение течению металла увеличивает энергию деформации, то есть минимум энергии затрачивается тогда, когда формоизменение происходит без ограничения течению металла по линиям наименьшего сопротивления».

11.3 Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип наименьшего сопротивления.
2. Дайте определение принципа кратчайшей нормали.
3. Изобразите контуры заготовки на различных стадиях осадки призматического тела.
4. Как влияет наличие контактного трения на форму поперечного сечения заготовки в процессе пластического деформирования?
5. Покажите на рисунке движение металла в очаге пластической деформации при прокатке толстых полос.
6. Как связано сопротивление перемещению и расстояние частицы от контура заготовки?
7. Приведите примеры использования принципа наименьшего сопротивления в процессах обработки металлов давлением.
8. Сформулируйте принцип минимума полной энергии деформации.

12 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

12.1 Метод координатной делительной сетки

Для изучения деформации металла наибольшее распространение получил метод координатной делительной сетки. Сущность этого метода заключается в следующем. На меридиональное сечение осесимметричной заготовки наносят систему геометрических

меток определенной конфигурации в виде линий, точек, кругов, квадратов.

Исследуемая заготовка предварительно разрезается, на плоскость разреза наносится сетка (рис. 57). Затем части заготовки составляют вместе по поверхности разъема, предварительно покрытого специальным составом (например, машинное масло, жидкое стекло и т. п.), предохраняющим их от сварки, и подвергают прессованию как цельное металлическое тело. После формоизменения заготовка вновь разламывается и по ней изучают происшедшие на различных участках изменения координатной сетки.

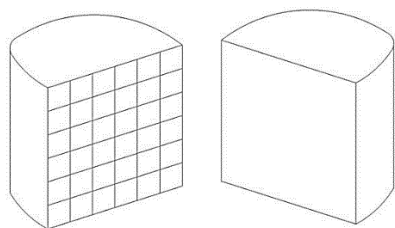


Рис. 57. Эскиз составной круглой заготовки с координатной сеткой

Основные параметры деформации в пределах ячейки координатной сетки определяются путем сопоставления конечной и начальной формы и размерами ячейки. В пределах объема ячейки тело считается изотропным, а деформация однородной. Полученные данные рассматриваются как локальные, отнесенные к центру ячейки.

Пусть исходная ячейка представляет собой квадрат с вписанной окружностью. После деформации ячейка превращается по Зибелю в параллелограмм и эллипс (рис. 58).

Обработка результатов производится в следующей последовательности:

1. Рассчитываются величина главных осей эллипса a_1 и b_1 :

$$a_1 = \sqrt{\frac{c^2 + d^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{c^2 + d^2}{2}\right)^2 - c^2 d^2 \sin 2\gamma}},$$

Здесь в записи формул c и d – конечные размеры ребер, γ – угол между ребрами.

$$e_1 = \ln \frac{a_1}{a_0} e_2 = \ln \frac{b_1}{b_0}.$$

3. Находят с учетом несжимаемости $e_1 + e_2 + e_3 = 0$ интенсивность деформаций $\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_1 e_2}$.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b_1^2}{a_1^2} \right) \operatorname{tg} \gamma - \frac{1}{2} \sqrt{\left(1 - \frac{b_1^2}{a_1^2} \right) t g^2 \gamma - 4 \frac{b_1^2}{a_1^2}}.$$

Рассмотренный метод применим только к тем процессам или их стадиям, которые соответствуют условиям монотонности. По условию монотонности в исследуемом процессе главные оси деформаций или скоростей деформаций должны совпадать с одними и теми же материальными волокнами деформируемого тела. Вид пластической деформации должен оставаться неизменным.

$$V_{\varepsilon} = \text{const} = \frac{e_2 - \frac{e_1 + e_3}{2}}{\frac{e_1 - e_3}{2}} V_{\varepsilon} [-1.1].$$

12.2 Метод визиопластичности

Метод визиопластичности базируется на теории пластического течения и основан на непрерывном наблюдении за изменением формы и размеров ячейки делительной сетки. Как правило, изменения ячеек рассматривают как непрерывные функции некоторого параметра. Чаще всего за параметр принимают время, реже – перемещение.

Метод визиопластичности заключается в том, что экспериментальным путем определяется векторное поле перемещений. На его основании вычисляют скорости течения металла и скорости деформаций, а затем и напряжения.

Если зафиксировать через промежуток времени $\Delta t = t^1 - t$ координаты узла координатной сетки до (i, j) и после деформаций (i^1, j^1) , то легко найти перемещения по осям координат, например, для осесимметричной задачи

$$(R)i^1j^1 - (R)ij = (\Delta U_R)ij(\Delta U_z)ij = (\bar{z})i^1j^1 - (\bar{z})ij$$

и скорости течения

$$(V_R)ij = \frac{(\Delta U_R)ij}{\Delta t}, (V_z)ij = \frac{(\Delta U_z)ij}{\Delta t}.$$

Компоненты тензора скоростей деформаций для осесимметричной задачи

$$\zeta_{\bar{z}} = \frac{\partial V_{\bar{z}}}{\partial \bar{z}}, \quad \zeta_R = \frac{\partial V_R}{\partial R}, \quad \zeta_0 = \frac{V_R}{R}, \quad \zeta_{R\bar{z}} = \frac{\partial V_{\bar{z}}}{\partial R} + \frac{\partial V_R}{\partial \bar{z}}$$

находят методом конечных разностей

$$\zeta_{\bar{z}} = \frac{(V_{\bar{z}})_{ij} - (V_{\bar{z}})_{ij}}{\bar{z}_{ij} - \bar{z}_{ij}}, \quad \zeta_R = \frac{(V_R)_{ij} - (V_R)_{ij}}{R_{ij} - R_{ij}}.$$

Далее ведут расчет интенсивности скоростей деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\zeta_R - \zeta_0)^2 + (\zeta_0 - \zeta_{\bar{z}})^2 + (\zeta_{\bar{z}} - \zeta_R)^2 + \frac{3}{2} \zeta_{R\bar{z}}^2}.$$

12.3 Определение нормальных контактных напряжений

Одним из методов определения нормальных контактных напряжений на границе «металл – инструмент» является метод фольговых датчиков, предложенный Я.М. Охрименко.

На рис. 59,а представлена схема измерения σ_k с помощью фольгового датчика. Для этого перпендикулярно поверхности инструмента просверливаются отверстия малого диаметра 1- 2 мм и закрываются фольгой 2 толщиной 0,1 -0,3мм из достаточно прочного и пластичного металла. После деформации металла на фольге остаются выпуклые отпечатки, по высоте которых h судят о величине нормальных напряжений на поверхности контакта заготовки и инструмента.

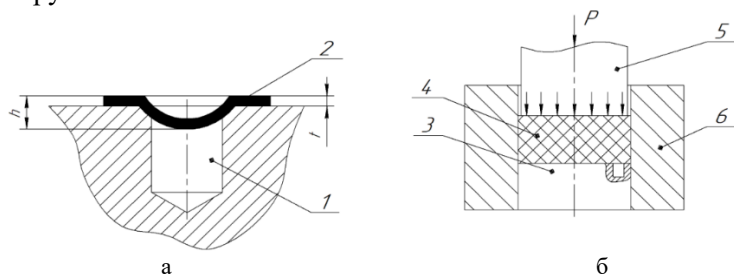


Рис. 59. Схема измерений контактных напряжений с помощью фольговых датчиков:

а – измерение высоты отпечатка; б – тарировка датчиков

Для нахождения σ_k используют тарифовочный график, связывающий величину σ_k с глубиной отпечатка h (рис. 60).

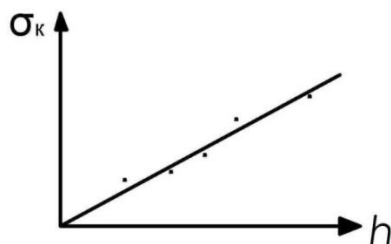


Рис.60. Тарифовочный график

Тарировка датчиков производится полиуретаном 4 в замкнутом объеме при различных значениях гидростатического давления σ . Шайба 3 с отверстиями 1 и с датчиком 3 устанавливается в контейнере 6 (рис. 59,б). При нажатии на пуансон 5 силой P_v закрытой полости контейнера с помощью полиуретана создается гидростатическое давление. Нормальное напряжение σ , действующее на поверхность шайбы, определяется по выражению $\sigma = \frac{P}{F_K}$, а средняя высота лунок

$$h_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^N h_i}{N},$$

где F_K – площадь контактной поверхности, $F_K = \frac{\pi D^2}{4}$;

N – число отверстий на шайбе;

h_i – высота лунки в i -м отверстии;

D – диаметр контейнера для тарировки.

Для определения усилий деформирования или распределения нормальных контактных напряжений успешно используют силоизмерители, получившие название мездозы (рис. 61).

Мездозы преобразуют действующую на них нагрузку P в упругую деформацию, фиксируемую в виде электрического сигнала, получаемого от датчика сопротивления R (рис. 61).

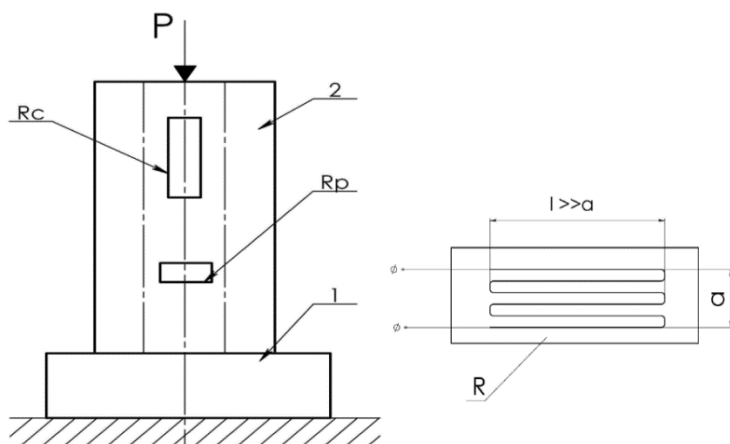


Рис. 61. Мездоза:
1 – основание; 2 – упругий элемент; R – датчик сопротивления;
 R_p – растяжение; R_c – сжатие

Растяжение датчика вдоль горизонтального направления увеличивает его сопротивление, а сжатие – наоборот уменьшает. Датчики подключают в мостовую схему (рис. 62).

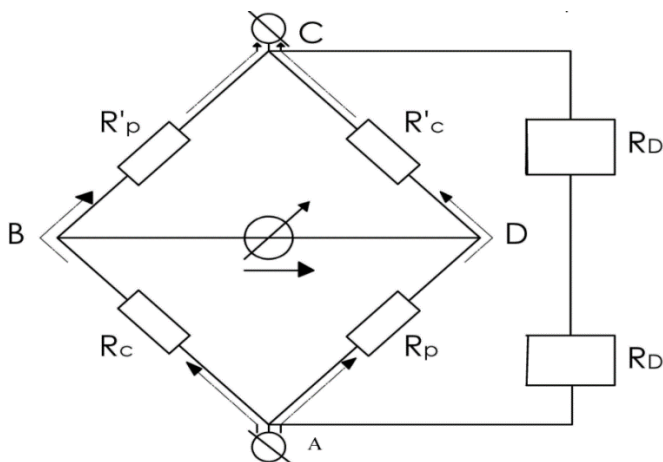


Рис.62. Мостовая схема подключения датчиков

Сила P приводит к уменьшению сопротивления R_C^1 сжатого датчика, наклеенного вдоль образующей упругого элемента 2 и увеличению сопротивления R_P^1 растянутого датчика, наклеенного по окружности. При нагружении мездозы балансировка моста будет нарушена и возникает ток через диагональ ВД, регистрируемый гальванометром. Величину нагрузки P находят по тарифовочному графику, построенному в координатах нагрузка – величина тока.

12.4 Контрольные вопросы

1. В чем сущность метода координатной сетки?
2. Перечислите область применения метода координатной делительной сетки.
3. В какой последовательности проводят обработку искаженной координатной сетки по Зибелю?
4. В чем сущность метода визиопластичности?
5. В чем сущность метода фольговых датчиков?
6. Какое устройство называют мездозой?
7. Как построить тарифовочный график?
8. Каков принцип работы мездозы?
9. Из каких соображений выбирают размеры ячейки координатной сетки?
10. Как располагают датчики в мездозе?
11. Как определяют деформации в пределах ячейки координатной сетки?
12. В каких случаях применяют метод координатной делительной сетки?
13. Как определить векторное поле перемещений и скоростей течения?
14. Используя метод конечных разностей, записать формулы для расчета скоростей деформаций.
15. Как выбрать материал для фольговых датчиков?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аркулис, Г.Э.* Теория пластичности [Текст] / Г.Э. Аркулис, В.Г. Дорогобид. – М.: Металлургия, 1987. – 352 с.
2. *Богатов, А.А.* Механические свойства и моделирование разрушения материала [Текст] / А.А. Богатов. – Екатеринбург: ГОУВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.
3. *Гречников, Ф.В.* Деформирование анизотропных материалов [Текст] / Ф.В. Гречников. – М.: Машиностроение, 1998. – 448 с.
4. *Громов, Н.П.* Теория обработки металлов давлением [Текст] / Н.П. Громов. – М.: Металлургия, 1967. – 340 с.
5. *Губкин, С.И.* Теория обработки металлов давлением [Текст] / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1947. – 352 с.
6. *Гун, Г.Я.* Теоретические основы обработки металлов давлением [Текст] / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
7. *Кириллов, П.Г.* Теория обработки металлов давлением [Текст] / П.Г. Кириллов. – М.: Высшая школа, 1965. – 296 с.
8. *Кучеряев, Б.В.* Механика сплошных сред (Теоретические основы обработки давлением композиционных материалов) [Текст] / Б.В. Кучеряев. – М.: МИСИС, 2000. – 320 с.
9. *Малинин, Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. [Текст] / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
10. *Мастеров, В.А.* Теория пластической деформации и обработки металлов давлением [Текст] / В.А. Мастеров, В.С. Березовский. – М.: Металлургия, 1976. – 352 с.
11. *Покрасс, И.Б.* Теория обработки металлов давлением [Текст] / И.Б. Покрасс, Н.Н. Князева. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2015. – 404 с.
12. *Северденко, В.П.* Теория обработки металлов давлением [Текст] / В.П. Северденко. – Минск: Высш.шк., 1966. – 223 с.
13. *Смирнов, В.С.* Сборник задач по обработке металлов давлением [Текст] / В.С. Смирнов. – М.: Металлургия, 1973. – 191 с.

14. *Смирнов, В.С.* Теория обработки металлов давлением [Текст] / В.С. Смирнов. – М.: Metallurgy, 1973. – 496 с.
15. *Смирнов-Аляев, Г.А.* Механические основы пластической обработки металлов [Текст] / Г.А. Смирнов-Аляев. – М.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
16. *Смирнов-Аляев, Г.А.* Сопротивление материалов пластическому деформированию [Текст] / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
17. *Смирнов-Аляев, Г.А.* Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением [Текст] / Г.А. Смирнов-Аляев, В.П. Чикидовский – Л.: Машиностроение, 1972. – 360 с.
18. *Степанский, Л.Г.* Расчеты процессов обработки металлов давлением [Текст] / Л.Г. Степанский. – М.: Машиностроение, 1979. – 215 с.
19. *Сторожев, М.В.* Теория обработки металлов давлением [Текст] / М.В. Сторожев, Е.А. Попов – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
20. *Томленов, А.Д.* Теория пластического деформирования металлов [Текст] / А.Д. Томленов. – М.: Metallurgy, 1972. – 408 с.
21. *Томсен, Э.* Механика пластических деформаций при обработке металлов [Текст] / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. – М.: Машиностроение, 1968. – 504 с.
22. *Унксов, Е.П.* Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением [Текст] / Е.П. Унксов. – М.: Изд-во Машгиз, 1955. – 271с.
23. *Чертавских, А.К.* Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением [Текст] / А.К. Чертавских, В.К. Белосевич. – М.: Metallurgy, 1968. – 364 с.
24. *Чиченев, Н.А.* Методы исследования процессов обработки металлов давлением [Текст] / Н.А. Чиченев, А.Б. Кудрин, П.И. Полухин. – М.: Metallurgy, 1977. – 311 с.
25. *Шевченко, К.Н.* Основы математических методов в теории обработки металлов давлением [Текст] / К.Н. Шевченко. – М.: Высш.шк., 1970. – 351 с.

Учебное издание

*Каргин Владимир Родионович,
Каргин Борис Владимирович*

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Учебное пособие

Редактор Н.С. Купринова
Компьютерная верстка Л.Р. Дмитриенко

Подписано в печать 23.12.2019. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 7,0.

Тираж 25 экз. Заказ . Арт. – 9(РЗУ) /2019.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

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

