

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Обработка материалов давлением»

М. Н. Верещагин, Ю. Л. Бобарикин

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к курсовой работе по одноименной дисциплине
для студентов специальностей 1-36 20 02
«Упаковочное производство (по направлениям)»,
1-36 01 05 «Машины и технология обработки
материалов давлением», 1-42 01 01 «Металлургическое
производство и материалобработка (по направлениям)»
специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка металлов
давлением» дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2010

УДК 621.77(075.8)
ББК 34.62я73
В31

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 7 от 30.03.2009 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Технология машиностроения» ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук,
доц. М. П. Кульгейко

Верещагин, М. Н.
В31 Теория обработки материалов давлением : метод. указания к курсовой работе по одноим. дисциплине для студентов специальностей 1-36 20 02 «Упаковочное производство (по направлениям)», 1-36 01 05 «Машины и технология обработки материалов давлением», 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка металлов давлением» днев. и заоч. форм обучения / М. Н. Верещагин, Ю. Л. Бобарикин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2010. – 72 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-898-5.

Представлены аналитические зависимости для проведения теоретического анализа основных процессов обработки материалов давлением. Изложена методика расчетов основных геометрических и силовых параметров процессов.

Для студентов инженерно-технических специальностей.

УДК 621.77(075.8)
ББК 34.62я73

ISBN 978-985-420-898-5

© Верещагин М. Н., Бобарикин Ю. Л., 2010
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2010

Предисловие

Курс «Теория обработки материалов давлением» является базовым для обучения студентов по специальностям 1-36 01 05, 1-36 20 02 и 1-42 01 01 дневной и заочной форм обучения, который предваряет основные технологические дисциплины и является основой для их изучения.

Главной задачей теории ОМД является анализ и разработка принципиальных основ обработки материалов давлением для получения изделий требуемой формы и соответствующего качества.

Основной целью является помощь студентам глубоко усвоить научные основы курса «Теория обработки материалов давлением», развить у них инженерное мышление, дать возможность им самостоятельно решать новые задачи, возникающие в процессе изучения других научных дисциплин по специальности, а также в процессе практической деятельности.

Практические задачи и анализ процессов ОМД составлены по всем разделам курса «Теория ОМД» и содержат перечень основных формул, а также примеры анализа процессов ОМД.

В пособии приводятся формулы и примерные расчеты, используемые при анализе процессов ОМД, а также основные формулы для решения практических задач, задания к которым выдаются из практического пособия [1].

Для выполнения работы рекомендуется использовать литературу, приведенную в [1].

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

1. Открытая прошивка

Анализ процесса открытой прошивки начинается с изучения схемы этого процесса и механической схемы деформации (схемы главных напряжений и деформаций), приведенных на рис. 1.1.

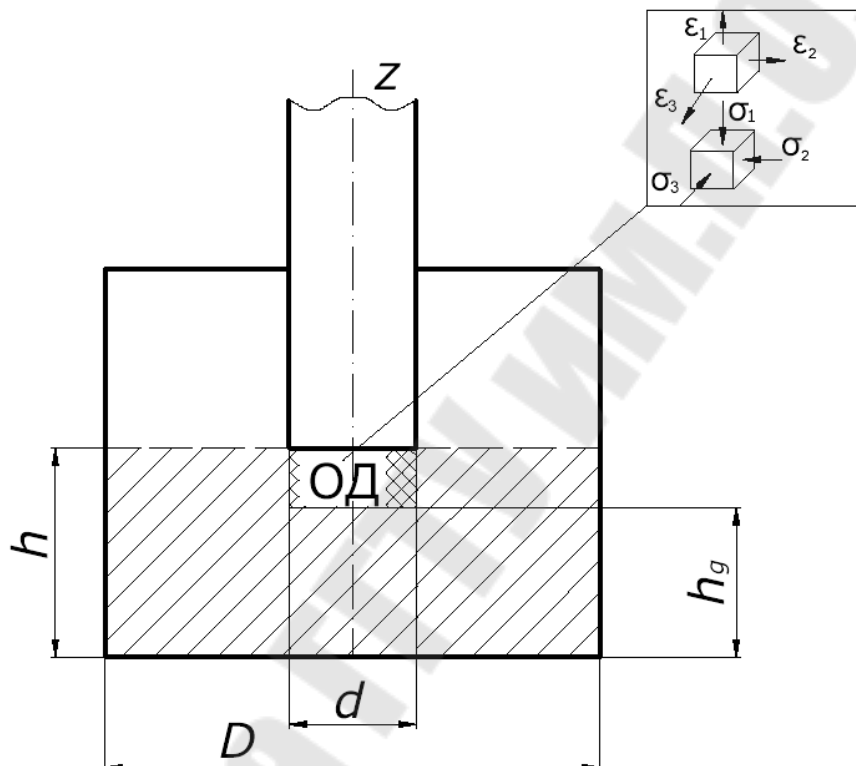


Рис. 1.1. Схема процесса открытой прошивки:
ОД – очаг деформации

Анализ процесса рассматривается на примере, исходные данные для которого следующие:

Диаметр прошивня, мм.....	$d = 30$
Высота заготовки, мм	$h_0 = 100$
Диаметр заготовки, мм	$D = 150$
Температура обработки, °С.....	$T = 1000$
Скорость деформирования, мм/с.....	$V = 25$
Коэффициент контактного трения	$f = 0,25$
Толщина дна	$h_g = 0,4d$
Материал.....	углеродистая сталь (сталь 45)

1.1. Определение распределения нормальных контактных напряжений на торце прошивки

В конце прошивки на торце пуансона следующее распределение нормальных контактных напряжений:

$$\sigma(\rho) = \beta \cdot \sigma_s \cdot \left[1 + 1,1 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) + \frac{0,5 \cdot d - \rho}{h} \right]. \quad (1.1)$$

Определяем сопротивление пластической деформации σ_s при горячей деформации для данных варианта задания по эмпирической формуле [1]:

$$\sigma_s = \frac{1330 \cdot \varepsilon^{0,252} \cdot u^{0,143}}{e^{0,0025 \cdot T}}, \quad (1.2)$$

где ε , u , T – степень деформации, скорость деформации, температура обработки соответственно.

Эмпирические формулы для расчета σ_s других групп сталей и сплавов представлены в работе [1].

Для определения ε и u необходимо знание размеров заготовки на конечной стадии прошивки, а также время деформирования.

Определяем диаметр заготовки после прошивки:

$$D_1 = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{1,5}{h_0} \cdot [V_0 + f_{\Pi} \cdot (h_0 - h_g)] - 0,5 \frac{\pi}{4} D^2}, \quad (1.3)$$

где $V_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_0$ – объем исходной заготовки; $f_{\Pi} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ – площадь прошивки; h_g – высота (толщина) дна.

Высота заготовки после прошивки находится из условия постоянства объема до и после прошивки:

$$V_0 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h_0 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot h, \quad h = \frac{D^2 \cdot h_0}{D_1^2}.$$

Абсолютная и относительная деформации заготовки соответственно равны:

$$\Delta F = \frac{\pi}{4} (D^2 - (D^2 - d^2)), \quad \varepsilon = \frac{\Delta F}{F_0} = \frac{d^2}{D^2}.$$

Время деформации находим из следующего выражения:

$$t = \frac{d}{2V}.$$

Скорость деформации:

$$u = \dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t}.$$

Подставляя найденные значения ε , u , T в формулу (1.2), находим σ_s .

Для нахождения распределения $\sigma(\rho)$ напряжений на торце прошивня по формуле (1.1) необходимо определить $\sigma(\rho)$ в 4–5 точках, подставляя значения радиуса прошивня ρ в диапазоне $[0; \frac{d}{2}]$. После этого строится график зависимости $\sigma_z = f(\rho)$ (рис. 1.2).

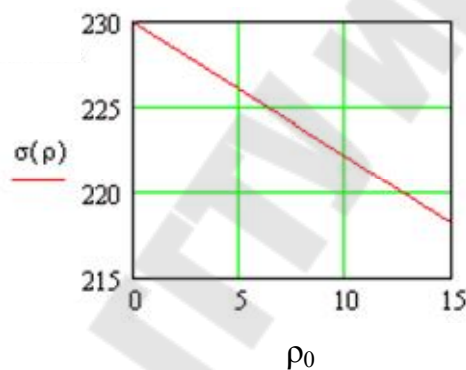


Рис. 1.2. График распределения нормальных контактных напряжений на торце прошивня

1.2. Определение зависимости давления прошивки от перемещения прошивня

При условии $\frac{d}{h} > \sqrt{6}$, когда h изменяется в диапазоне $[0; 0,4d]$, определяем давление прошивки от перемещения прошивня по формуле

$$p_2 = \sigma_s \cdot \left[1 + 1,1 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) + \frac{1}{4,2} \cdot \frac{d}{h} + \frac{h}{d} \right]. \quad (1.4)$$

При условии $\frac{d}{h} \leq \sqrt{6}$, когда h изменяется в диапазоне $[0,4d; h_0]$, определяем давление прошивки от перемещения прошивня по формуле

$$p1 = \sigma s \cdot \left[2 + 1,1 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \right]. \quad (1.5)$$

В данные зависимости необходимо подставить значения перемещения прошивня h из диапазона $[0,2d; h_0]$, разбив их на равное количество интервалов. После чего построить зависимость $p = f(h)$ (рис. 1.3).

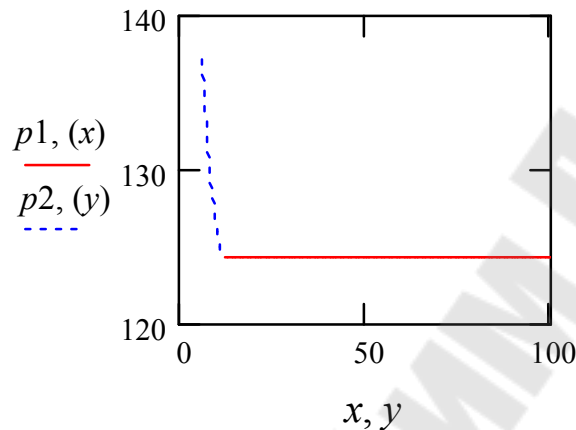


Рис. 1.3. График зависимости давления прошивки от перемещения пуансона $x = [0,4d; h_0]$, $y = [0,2d; 0,4d]$

1.3. Определение зависимости удельного давления прошивки в конце прошивки от отношения D/d

Данную зависимость находим по формуле (1.4). При этом соотношение D/d изменяется в пределах от 1,1 до 10 при постоянном d . По полученным точкам, разбив данный диапазон на ряд равных интервалов, строим искомую зависимость (рис. 1.4).

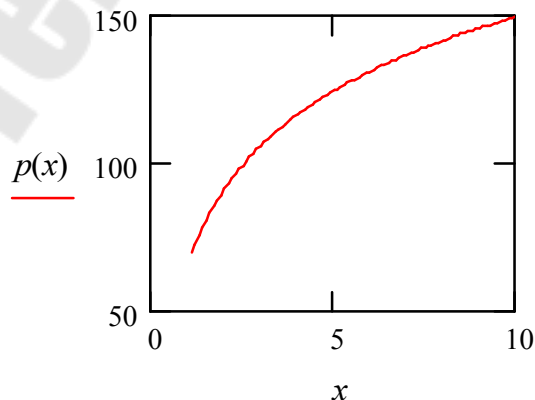


Рис. 1.4. График зависимости удельного давления в конце прошивки от соотношения $D/d = x$

2. Осадка

Анализ процесса осадки прямоугольной полосы начинается с изучения схемы этого процесса и механической схемы деформации (схемы главных напряжений и деформаций), приведенных на рис. 2.1.

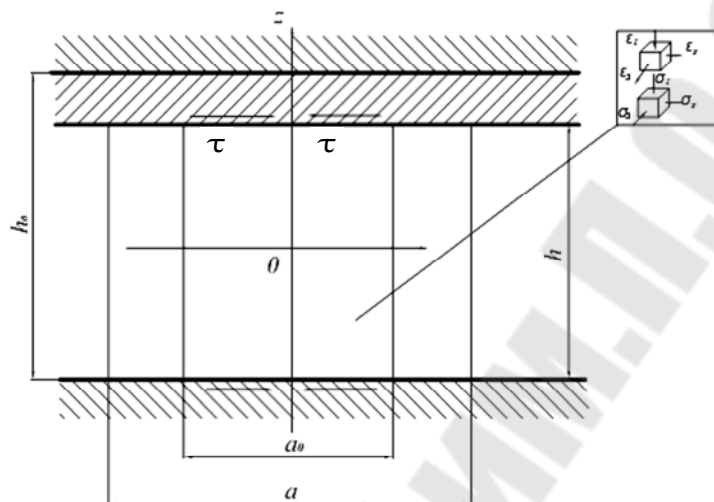


Рис. 2.1. Схема процесса осадки полосы

Анализ процесса рассматривается на примере, исходные данные для которого следующие:

Начальная высота, мм.....	$h_0 = 550$
Ширина полосы, мм.....	$a_0 = 550$
Коэффициент длины полосы.....	$k = 6$
Длина полосы, мм	$ka_0 = 6 \cdot 550 = 3300$
Коэффициент трения.....	$f = 0,3$
Температура обработки, °С.....	$T = 1200^\circ$
Материал.....	сталь X17H2
Время деформирования до последней степени деформации, с.....	$t = 4$

2.1. Осадка прямоугольной полосы неограниченной длины

Полосой неограниченной длины называется прямоугольная призма, длина которой более чем в 5 раза больше ее ширины, т. е. значения k больше 5. При $k = 5$ и меньше полосу принимают конечной длиной. При осадке полосы неограниченной длины величина длины полосы не изменяется, а при осадке полосы конечной длины величина длины полосы увеличивается.

Анализ данного процесса производится с использованием приближенных уравнений равновесия и условия пластичности.

Для точек контактной поверхности имеется приближенное уравнение равновесия:

$$\frac{d\sigma_z}{dx} + \frac{2\tau_k}{h} = 0. \quad (2.1)$$

Принимаем $\tau_k = \mu\sigma_z$, где μ – коэффициент трения.

После интегрирования получаем

$$\sigma_z = C \exp\left(-\frac{2\mu x}{h}\right). \quad (2.2)$$

Находим постоянную интегрирования C . При $x = 0,5a$ величина $\sigma_z = -\sigma_s^*$.

Тогда

$$C = -\sigma_s^* \exp\frac{\mu a}{h}. \quad (2.3)$$

Окончательно имеем:

$$\sigma_z = -\sigma_s^* \exp\frac{2\mu(0,5a-x)}{h}. \quad (2.4)$$

Эпюра напряжений σ_z по уравнению (2.4) представлена на рис. 2.2 кривой $a'b''o'''$. Эпюра касательных напряжений $\tau_k = \mu\sigma_z$ – кривая det . Эпюры вычислены при $a/h = 10$ и $\mu = 0,2$.

Напряжения σ_z и τ_k увеличиваются к оси симметрии по мере удаления от края полосы. В точке b при $x = x_b$ касательное напряжение $\tau_k = \tau_b = 0,5\sigma_s^*$, а нормальное напряжение $\sigma_z = \sigma_b = 0,5\sigma_s^*/\mu$.

При пластической деформации абсолютная величина касательного напряжения не может быть больше $K = 0,5\sigma_s^*$, т. е. $|\mu\sigma_z| < 0,5\sigma_s^*$ или $|\sigma_z| \leq 0,5\sigma_s^*/\mu$. Необходимо соблюсти неравенство

$$\sigma_s^* \exp\frac{2\mu(0,5a-x)}{h} \leq \frac{0,5\sigma_s^*}{\mu}. \quad (2.5)$$

Решение неравенства (2.5) относительно x дает

$$X \geq 0,54 + \frac{h \ln(2\mu)}{2\mu}. \quad (2.6)$$

Обозначим $\ln(2\mu)/2\mu = \Psi$.

Тогда неравенство (2.6) переписывается следующим образом:

$$x \geq 0,5a - \Psi h. \quad (2.7)$$

Значения Ψ , в зависимости от μ , представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Показатель	Значение									
μ	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,5
Ψ	23,0	8,05	4,02	2,30	1,39	0,85	0,51	0,28	0,12	0

Расстояние точки b от края контактной поверхности

$$(0,5a - x_b) = \Psi h. \quad (2.8)$$

Чем больше μ , тем на меньшем участке поверхности действительно выражение $\tau_k = \mu\sigma_s$, и оно достигает предельного значения $|t_k| = 0,5\sigma_s^*$. При $\mu = 0,5$ касательное напряжение получает это предельное на краю заготовки в точке a , т. е. при $x_b = x_a = 0,5a$.

В общем случае в точке b $\tau_k = \text{const} = -0,5\sigma_s^*$.

После подстановки этого выражения в уравнение (2.1) и интегрирования имеем:

$$\sigma_z = \sigma_s^* \frac{x}{h} + c. \quad (2.9)$$

При $x = x_b$ $\sigma_z = \sigma_b$. Следовательно,

$$\sigma_z = \sigma_b - \sigma_s^* \frac{x_b - x}{h}. \quad (2.10)$$

При $\tau_k = \text{const}$ нормальные напряжения изменяются по линейному закону (линия $b'o''$, касательная в точке b' кривой $a'b''o'''$). Так как τ_k имеют разные знаки справа и слева от оси Z , при $x = 0$ τ_k переходит через 0. При $\tau_k = 0$ и $x = 0$ имеем:

$$\frac{d\sigma_z}{dx} = 0. \quad (2.11)$$

Функция σ_z имеет экстремум. Обе ветви σ_z плавно перейдут друг в друга.

На участке OC

$$\tau_k = \tau_c \frac{x}{h}, \quad (2.12)$$

где $\tau_c = -0,5\sigma_s^*$ – касательное напряжение в точке $x = x_c = h^*$.

Нормальное напряжение σ_z находим из уравнения

$$\frac{d\sigma_z}{dx} - \sigma_s^* \frac{x}{h^2} = 0. \quad (2.13)$$

Откуда

$$\sigma_z = 0,5\sigma_s^* \frac{x^2}{h^2} + C. \quad (2.14)$$

При $x = x_c = h$ $\sigma_z = \sigma_c$. Таким образом,

$$\sigma_z = \sigma_c - 0,5\sigma_s^* \frac{h^2 - x^2}{h^2}. \quad (2.15)$$

Нормальное напряжение σ_z изменяется от $\sigma_z = \sigma_c$ при $x_c = h$ до $\sigma_z = \sigma_o = \sigma_z = \sigma_c - 0,5\sigma_s^*$ при $x = 0$ (кривая $c'o'$).

При $x = x_c = h$ получим из (2.15):

$$\sigma_c = \sigma_b - \sigma_s^* \left(\frac{x_b}{h} - 1 \right). \quad (2.16)$$

Если не учитывать падения касательных напряжений, то при $x = 0$:

$$\sigma_{o''} = \sigma_b - \sigma_s^* \frac{x_b}{h}. \quad (2.17)$$

Сравнивая $\sigma_{o''} = \sigma_o = \sigma_c$, можно установить, что

$$\sigma_{o''} - \sigma_o = \sigma_o - \sigma_c = -0,5\sigma_s^*. \quad (2.18)$$

Таким образом, при осадке полосы эпюра напряжений разделяется в общем случае на три зоны (А, Б, В).

Участок А (зона скольжения):

$$[x = 0,5a; x = x_b = 0,5a - \psi h];$$

$$|\tau_k|_{x=0,5a} = \mu\sigma_s^*; |\tau_k|_{x=x_b} = 0,5\sigma_s^*;$$

$$\begin{aligned}\sigma_z &= -\sigma_s^* \exp \frac{2\mu(0,5a-x)}{h}; \\ \sigma_z - \sigma_a &= -\sigma_s^* \Big|_{x=0,5}, \\ \sigma_z = \sigma_b &= -\frac{0,5\sigma_s^*}{\mu} \Big|_{x=x_b}.\end{aligned}\quad (2.19)$$

Участок Б (зона торможения):

$$\begin{aligned}[x = x_b = 0,5a - \psi h; \quad x = x_c = h]; \\ |\tau_k| &= \text{const} = 0,5\sigma_s^*; \\ \sigma_z = \sigma_b - \sigma_s^* \frac{x_b - x}{h}; \\ \sigma_z = \sigma_b &= -\frac{0,5\sigma_s^*}{\mu} \Big|_{x=x_b}; \\ \sigma_z = \sigma_c = \sigma_b - \sigma_s^* \left(\frac{x_b}{h} - 1 \right) \Big|_{x=x_c} &= h.\end{aligned}\quad (2.20)$$

Участок В (зона прилипания):

$$\begin{aligned}[x = x_c = h; \quad x = x_o = 0]; \\ |\tau_k| &= 0,5\sigma_s^* \frac{x}{h}; \\ |\tau_k| = 0,5\sigma_s^* \Big|_{x=x_c=h}; \quad |\tau_k| = 0 \Big|_{x=0}; \\ \sigma_z = \sigma_c - 0,5\sigma_s^* \frac{h^2 - x^2}{h^2}; \\ \sigma_z = \sigma_b - \sigma_s^* \left(\frac{x_b}{h} - 1 \right) \Big|_{x=x_c=h}; \\ \sigma_z = \sigma_o = \sigma_c - 0,5\sigma_s^* \Big|_{k=0}\end{aligned}\quad (2.21)$$

Анализ соотношений (2.19)–(2.21) дает следующие выводы по распределению напряжений в зоне контакта при осадке полосы неограниченной длины:

1) при $\frac{a}{h} \geq 2(1+\psi)$ и $0 < \mu < 0,5$ эпюра напряжений состоит из трех участков А, Б, В (рис. 2.2). Удельное усилие деформирования находится по формуле

$$\rho = \sigma_s^* \frac{h}{\mu a} \left\{ \left(\frac{1}{2\mu} - 1 \right) + \left(\frac{a}{2h} - \varphi \right) \left[1 + \mu \left(\frac{a}{2h} - \psi \right) \right] - \frac{\mu}{3} \right\}; \quad (2.22)$$

2) при $\frac{a}{h} \geq 2$ и $\mu \geq 0,5$ эпюра напряжений состоит из двух участков – Б и В (рис. 2.3).

Удельное усилие деформирования при этом равно

$$\rho = \sigma_s^* \left(1 + \frac{1}{h} \frac{a}{h} - \frac{1}{3} \frac{h}{a} \right) \approx \sigma_s^* \left(1 + \frac{1}{h} \frac{a}{h} \right); \quad (2.23)$$

3) при $2(1+\psi) \geq \frac{a}{h} \geq 2$ и $0 < \mu < 0,5$ эпюра напряжений состоит из двух участков – А, В (рис. 2.4). Удельное усилие находим из соотношения

$$\rho \approx \sigma_s^* \frac{h}{\mu a} \left(\exp \frac{\mu a}{h} - 1 \right); \quad (2.24)$$

4) при $1 \leq \frac{a}{h} \leq 2$ и $\mu > 0$ эпюра напряжений состоит из одного участка – В (рис. 2.5). Удельное усилие равно

$$\rho \approx \sigma_s^* \left(1 + \frac{\mu}{3} \frac{a}{h} \right); \quad (2.25)$$

5) при $\mu = 0$ и любом $\frac{a}{h}$ существует один участок: $\tau_k = 0$ и $\sigma_z = -\sigma_s^*$, т. е. $p = \sigma_s^*$.

Влияние роста коэффициента трения μ в пределах малых значений. При $\mu = 0,25$ кривые p для разных μ стремятся к прямолинейной форме и лежат близко к кривой для $\mu = 0,5$.

Для горячей деформации, когда $\mu = 0,3-0,5$, расчетной формулой для определения удельного усилия деформирования является следующая:

$$p = \sigma_s^* \left(1 + \frac{1}{4} \frac{a}{h} \right). \quad (2.26)$$

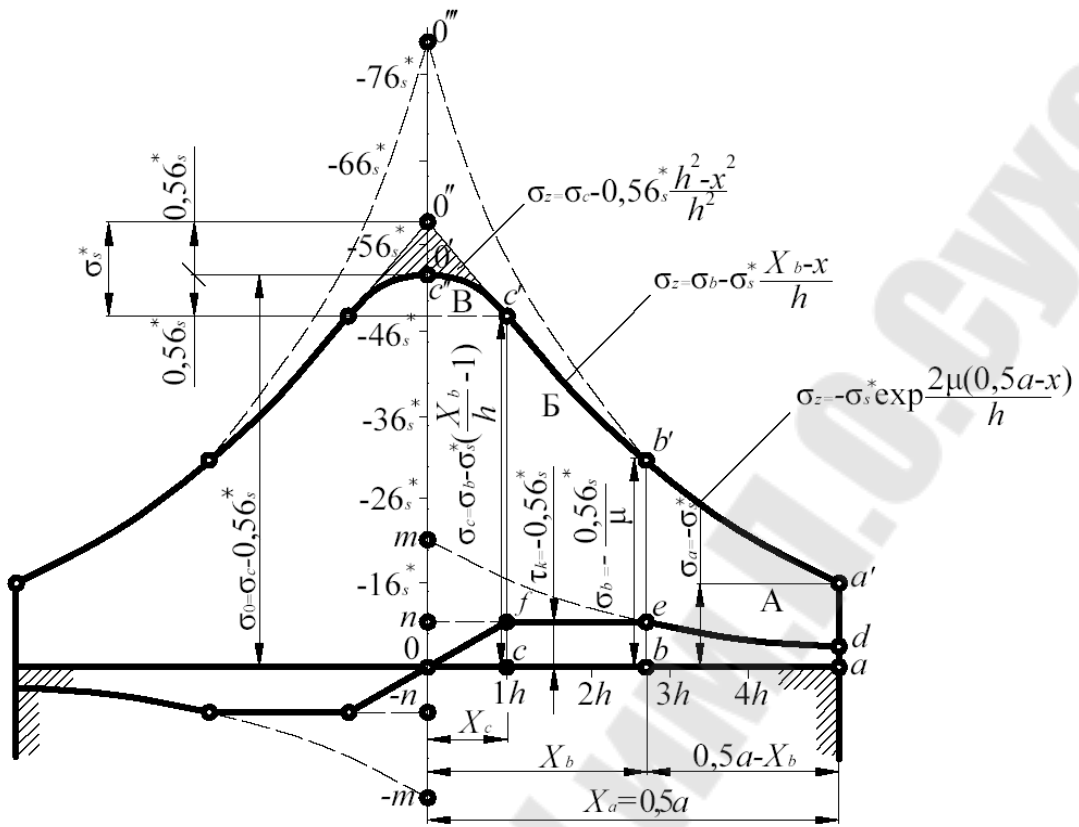


Рис. 2.2. Эпюра напряжений (зоны А, Б, В)

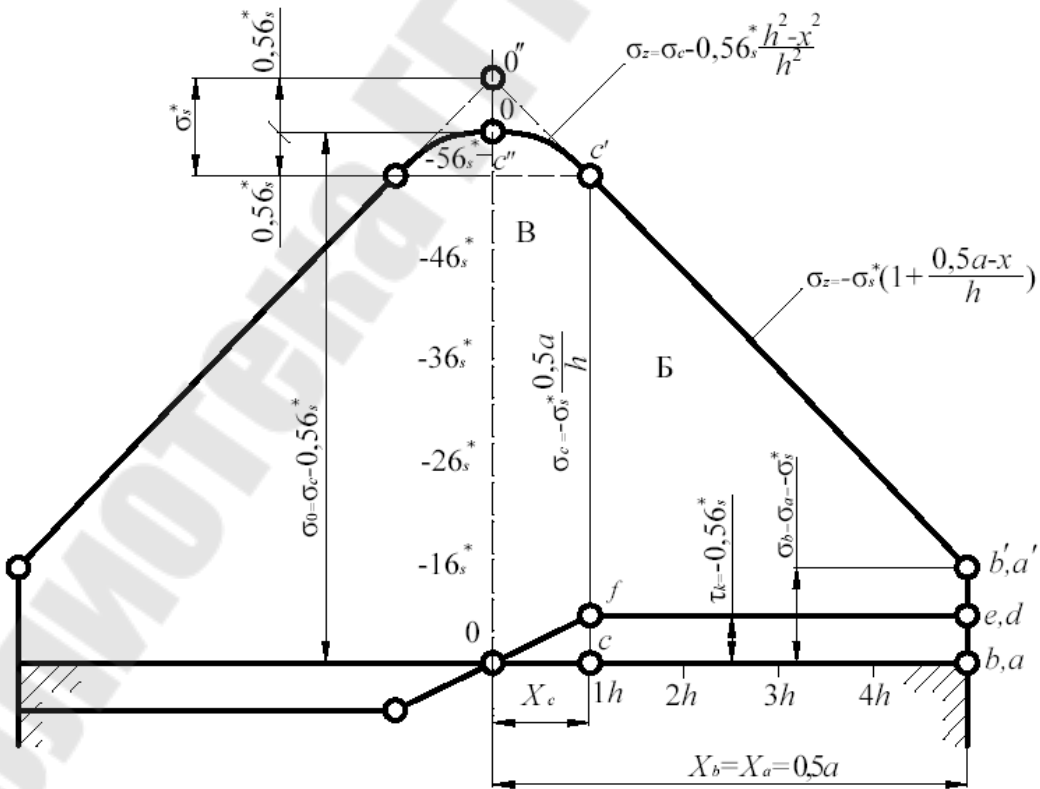


Рис. 2.3. Эпюра напряжений (зоны Б, В)

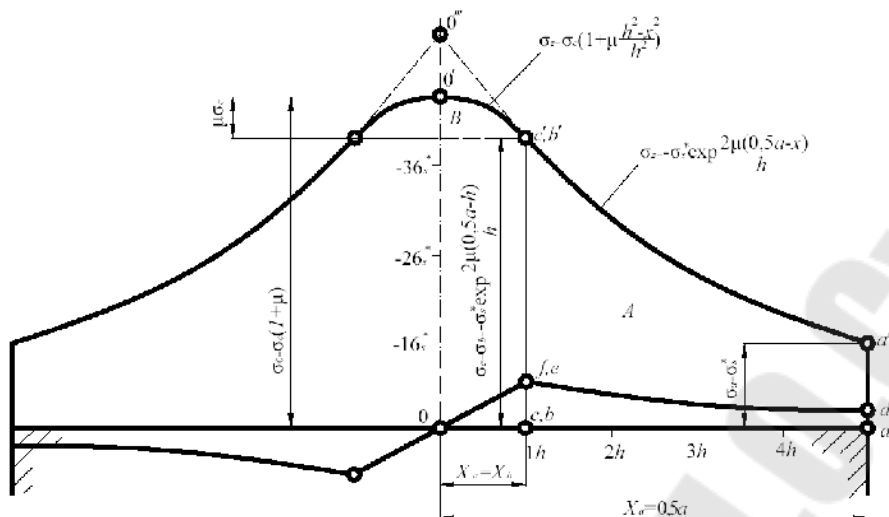


Рис. 2.4. Эпюра напряжений (зоны А, В)

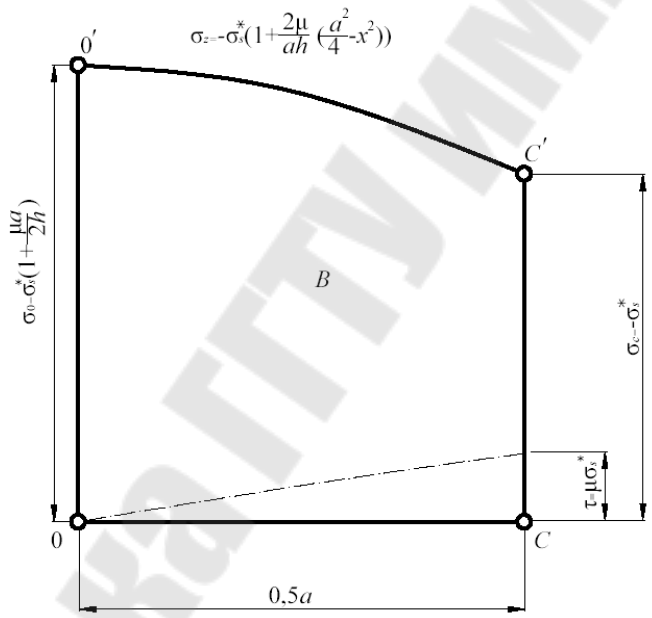


Рис. 2.5. Эпюра напряжений (зона В)

2.2. Осадка цилиндра и полосы конечной длины

Выражения напряжений σ_z в зависимости от координат x будут те же самые, что и для задачи параграфа 2.1, но с разницей, что постоянную σ_s^* необходимо заменить на σ_s из соотношения

$$K = \frac{1}{2} \sigma_s^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s,$$

а размер a для цилиндра заменить на размер d – диаметр цилиндра.

Следовательно, как и в параграфе 2.1, имеем 5 вариантов распределения контактных напряжений:

1) при $\frac{d}{h} \geq 2(1 + \psi)$, $0 < \mu < 0,5$ эпюра напряжений состоит из трех участков А, Б, В (рис. 2.2). Удельное усилие деформирования находим по формуле

$$p = \sigma_s^* \frac{h}{\mu d} \left\{ \left(\frac{1}{2\mu} - 1 \right) + \left(\frac{d}{2h} - \varphi \right) \left[1 + \mu \left(\frac{d}{2h} - \psi \right) \right] - \frac{\mu}{3} \right\}; \quad (2.27)$$

2) при $\frac{d}{h} \geq 2$ и $\mu \geq 0,5$ эпюра напряжений состоит из двух участков – Б и В (рис. 2.3). Удельное усилие деформирования при этом равно

$$p = \sigma_s \left(1 + \frac{1}{6} \frac{d}{h} \right); \quad (2.28)$$

3) при $2(1 + \psi) \geq \frac{d}{h} \geq 2$ и $0 < \mu < 0,5$ эпюра напряжений состоит из двух участков – А, В (рис. 2.4). Удельное усилие находим из соотношения

$$p = 2\sigma_s \frac{h^2}{\mu^2 d^2} \left(\exp \frac{\mu d}{h} - \frac{\mu d}{h} - 1 \right); \quad (2.29)$$

4) при $1 \leq \frac{d}{h} \leq 2$ и $\mu > 0$ эпюра напряжений состоит из одного участка – В (рис. 2.5). Удельное усилие равно

$$p = \sigma_s \left(1 + \frac{\mu}{4} \frac{d}{h} \right); \quad (2.30)$$

5) при $\mu = 0$ и любом $\frac{d}{h}$, а также при $\mu \neq 0$ и любом $\frac{d}{h} \leq 1$ существует один участок: $\tau_k = 0$ и $\sigma_z = -\sigma_s^*$, т. е.

$$p = \sigma_s. \quad (2.31)$$

Для горячей осадки, когда коэффициент трения большой и стремится к 0,5, удельное давление можно рассчитать по приближенной формуле

$$p = \sigma_s \left(1 + \frac{1}{6} \frac{d}{h} \right). \quad (2.32)$$

Далее необходимо определить диапазоны значений степени деформации полосы, для которых характерны три указанные выше разновидности контактных напряжений (зоны A, B, C), (зоны A, B), (зона B). Для этого определяются граничные значения степеней деформации. Для осадки полосы неограниченной длины эти значения равны

$$\varepsilon_2 = \frac{h_0 - \sqrt{a_0 h_0 / 2}}{h_0}, \quad \varepsilon_3 = \frac{h_0 - \sqrt{a_0 h_0 / (2(1 + \psi))}}{h_0}.$$

При осадке со степенью деформации до ε_2 на контакте имеет место эпюра напряжений с одной зоной B . При осадке со степенью деформации из диапазона от ε_2 до ε_3 на контакте имеет место эпюра напряжений с двумя зонами A и B . При осадке со степенью деформации свыше ε_3 на контакте имеет место эпюра напряжений с тремя зонами A, B, C .

В соответствии с исходными данными:

$$\varepsilon_2 = 0,293, \quad \varepsilon_3 = 0,48.$$

Произвольно принимаем следующие значения степеней деформации из полученных трех диапазонов, учитывая, что максимальная степень деформации $\varepsilon_4 = 95\%$:

- из диапазона степени деформации $0-0,293$ принимаем $\varepsilon_1 = 5\%$;
- из диапазона степени деформации $0,293-0,48$ принимаем $\varepsilon_2 = 45\%$;
- из диапазона степени деформации $0,48-0,95$ принимаем $\varepsilon_3 = 75\%$.

2.3. Распределение нормальных контактных напряжений и удельное давление осадки при степени деформации $\varepsilon = 5\%$

В соответствии с исходными данными высота полосы неограниченной длины после деформации:

$$h_1 = h_0(1 - \varepsilon) = 550(1 - 0,05) = 522,5 \text{ мм.}$$

Из условия постоянства объема при неизменной длине полосы после деформации определим ширину заготовки:

$$a_1 = \frac{F}{h_1} = \frac{302500}{522,5} = 578,947 \text{ мм.}$$

При данном соотношении $\frac{a_1}{h_1} = 1,1$ и $\mu = 0,3$ согласно варианту эюр 4 из параграфа 2.2 эюра напряжений состоит из одного участка – *B*.

Выражение для σ_z для зоны прилипания *B* имеет следующий вид:

$$\sigma_z = -\sigma_s \left[1 + \frac{2f}{a_1 h_1} \left(\frac{a_1^2}{4} - x^2 \right) \right] \text{ при } 0 < x \leq 0,5 a_1.$$

Для определения σ_s воспользуемся эмпирической формулой для высоколегированного сплава X17H2:

$$\sigma_s = \frac{7050 \cdot \varepsilon^{0,28} \cdot \nu^{0,087}}{e^{0,0037 \cdot T}},$$

где $\nu = \dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_4}{t} = \frac{0,95}{4} = 0,238 \text{ с}^{-1}$ – скорость деформации;

$$\sigma_s = \frac{7050 \cdot 0,05^{0,28} \cdot 0,238^{0,087}}{e^{0,0037 \cdot 1200}} = 31,719 \text{ МПа.}$$

Эюра напряжений имеет следующий вид (рис. 2.6).

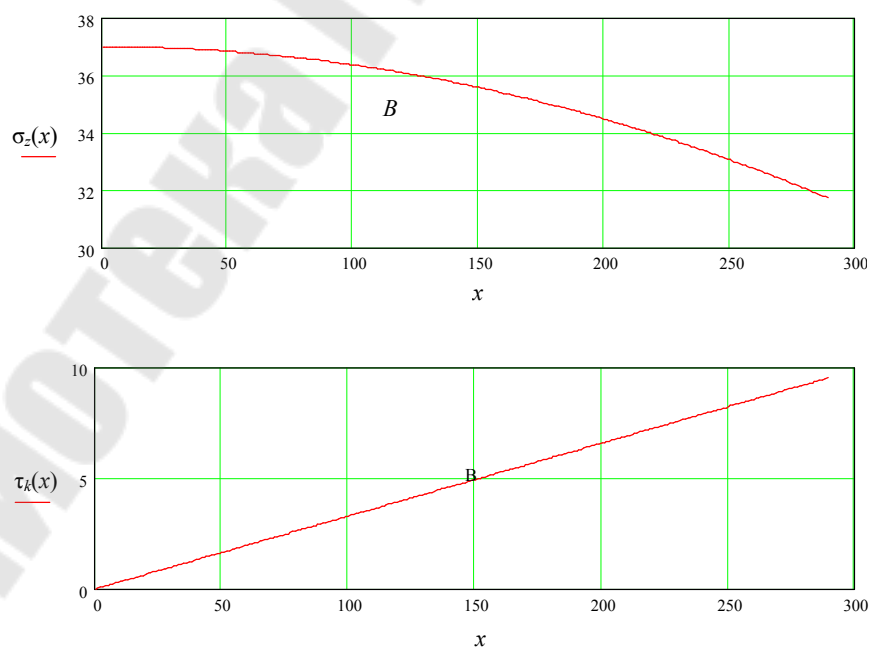


Рис. 2.6. Эюры контактных напряжений для степени деформации $\varepsilon = 5 \%$

2.4. Распределение нормальных контактных напряжений и удельное давление осадки при степени деформации $\varepsilon = 45\%$

Высота заготовки после деформации:

$$h_2 = h_0(1 - \varepsilon) = 550(1 - 0,45) = 302,5 \text{ мм.}$$

Из условия постоянства объема определим ширину заготовки:

$$a_2 = \frac{F}{h_2} = \frac{302500}{302,5} = 1000 \text{ мм.}$$

При данном соотношении $\frac{a_2}{h_2} = 3,306$ и $\mu = 0,3$ согласно параграфу 2.1 эпюра напряжений состоит из двух участков – А, В.

Выражение для σ_z имеет следующий вид:

– в зоне скольжения А:

$$\sigma_z = -\sigma_s \cdot \exp\left(\frac{2f(0,5a_2 - x)}{h_2}\right) \text{ при } h_2 < x \leq 0,5a_2;$$

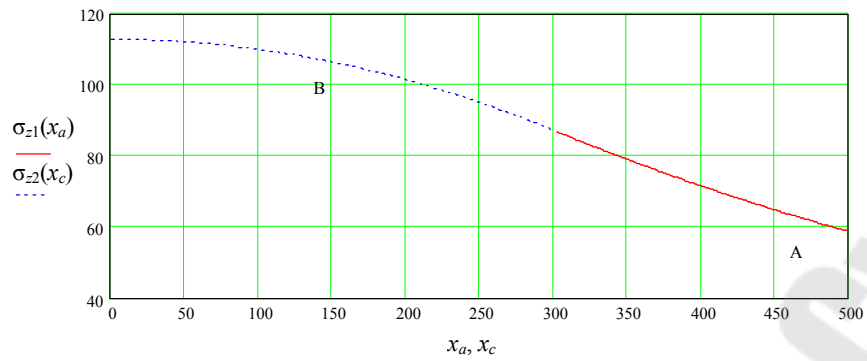
– в зоне прилипания В:

$$\sigma_z = -\sigma_s \cdot \exp\left(\frac{2f(0,5a_2 - h_2)}{h_2}\right) \left[1 + f \left[\frac{(h_2)^2 - x^2}{(h_2)^2} \right]\right] \text{ при } 0 < x \leq h_2.$$

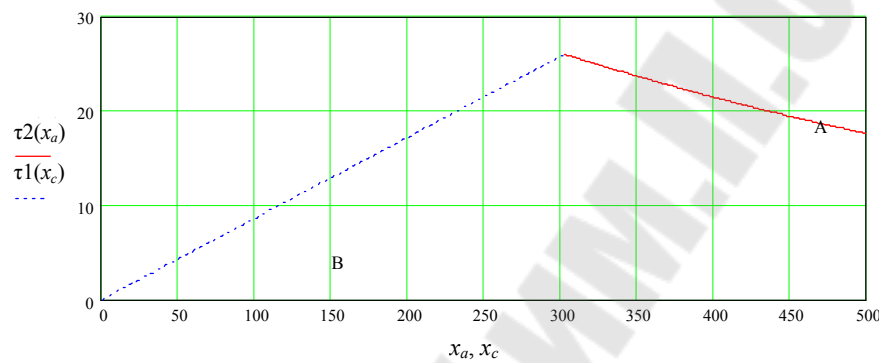
Для определения σ_s воспользуемся эмпирической формулой для высоколегированного сплава Х17Н2:

$$\sigma_s = \frac{7050 \cdot \varepsilon^{0,28} \cdot \nu^{0,087}}{e^{0,0037 \cdot T}};$$
$$\sigma_s = \frac{7050 \cdot 0,45^{0,28} \cdot 0,238^{0,087}}{e^{0,0037 \cdot 1200}} = 58,682 \text{ МПа.}$$

Эпюра напряжений имеет следующий вид (рис. 2.7).



а)



б)

Рис. 2.7. Эпюра напряжений для степени деформации $\varepsilon = 45\%$:
а – для нормальных напряжений; б – для касательных

2.5. Распределение нормальных контактных напряжений и удельное давление осадки при степени деформации $\varepsilon = 75\%$

Высота заготовки после деформации:

$$h_3 = h_0(1 - \varepsilon) = 550(1 - 0,75) = 137,5 \text{ мм.}$$

Из условия постоянства объема определим ширину заготовки:

$$a_3 = \frac{F}{h_3} = \frac{302500}{137,5} = 2200 \text{ мм.}$$

При данном соотношении $\frac{a_3}{h_3} = 16$ и $\mu = 0,3$ согласно параграфа

фу 2.1 эпюра напряжений состоит из трех участков – А, Б, В.

Выражение для σ_z имеет следующий вид:

– в зоне скольжения А:

$$\sigma_z = -\sigma_s \cdot \exp \frac{2\mu(0,5d_3 - x)}{h_3} \text{ при } 0,5d_3 - \psi h_3 < x \leq 0,5d_3;$$

– в зоне торможения Б:

$$\sigma_z = -\frac{0,5\sigma_s}{\mu} - \sigma_s \cdot \frac{(0,5d_3 - \psi h_3) - x}{h_3} \text{ при } h_3 < x \leq 0,5d_3 - \psi h_3;$$

– в зоне прилипания В:

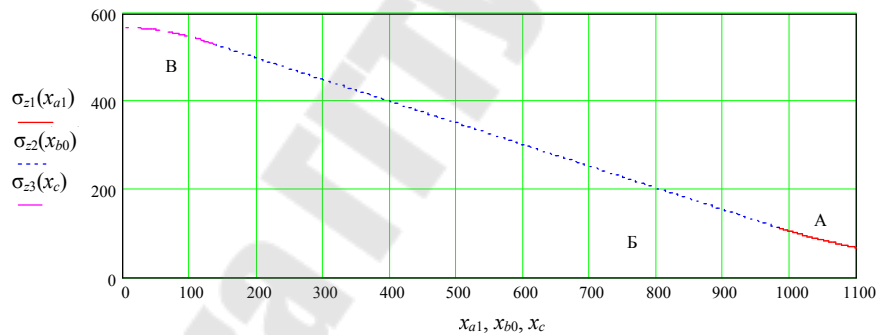
$$\sigma_z = -\frac{0,5\sigma_s}{\mu} - \sigma_s \cdot \frac{(0,5d_3 - \psi h_3)}{h_3} - 1 - 0,5\sigma_s \left(\frac{h_3^2 - x^2}{h_3^2} \right) \text{ при } 0 < x \leq h_3.$$

Для определения σ_s воспользуемся эмпирической формулой для высоколегированного сплава X17H2:

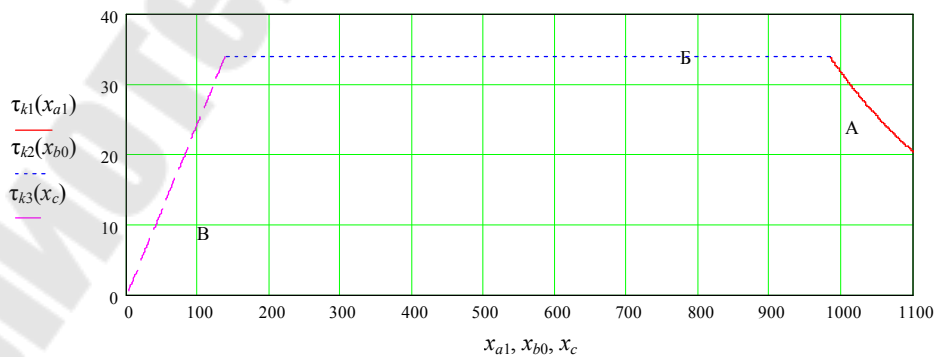
$$\sigma_s = \frac{7050 \cdot \varepsilon^{0,28} \cdot \nu^{0,087}}{e^{0,0037 \cdot T}};$$

$$\sigma_s = \frac{7050 \cdot 0,75^{0,28} \cdot 0,238^{0,087}}{e^{0,0037 \cdot 1200}} = 67,705 \text{ МПа.}$$

Эпюра напряжений имеет следующий вид (рис. 2.8).



а)



б)

Рис. 2.8. Эпюры контактных напряжений для степени деформации $\varepsilon = 75 \%$

В соответствии с зависимостями для давления осадки, приведенными в параграфе 2.1, величина давления осадки в диапазоне степени деформации от 0 до 95 % имеет изменение, представленное на рис. 2.9.

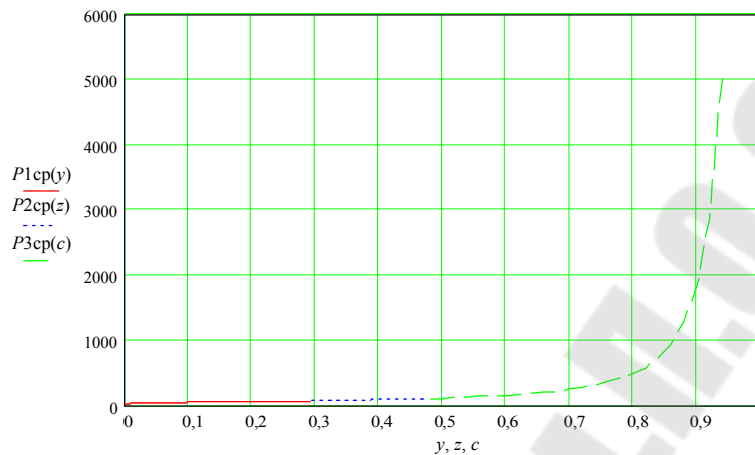


Рис. 2.9. Зависимость давления осадки полосы неограниченной длины от степени деформации:

$P1$ – для осадки с наличием зоны В для степени деформации $\varepsilon = y$ от 0 до $\varepsilon_2 = 0,293$; $P2$ – для осадки с наличием зон А и В для степени деформации $\varepsilon = z$ от $\varepsilon_2 = 0,293$ до $\varepsilon_3 = 0,48$; $P3$ – для осадки с наличием зон А, Б и В для степени деформации $\varepsilon = c$ от $\varepsilon_3 = 0,48$ до 0

3. Листовая вытяжка

Анализ процесса листовой вытяжки начинается с изучения схемы этого процесса и механической схемы деформации (схемы главных напряжений и деформаций), приведенных на рис. 3.1.

Анализ процесса рассматривается на примере, исходные данные для которого следующие:

Исходный радиус заготовки, мм $R_0 = 60$

Радиус пуансона, мм $R_p = 45$

Толщина заготовки, мм $S = 4$

Радиус матрицы и пуансона, мм $R_n = r_m$

Коэффициент трения, $f = 0,05$

Материал сталь 20

Температура обработки, °С $T = 20$

$\sigma_t = 245$ МПа – напряжение текучести материала;

$\sigma_b = 412$ МПа – предел прочности материала;

$\psi_0 = 0,55$ – предел относительного сужения площади поперечного сечения образца при шейкообразовании.

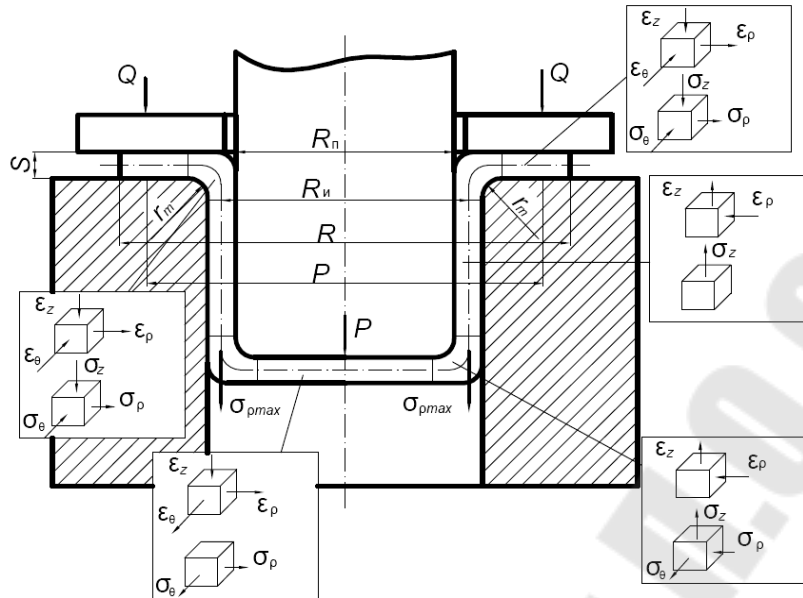


Рис. 3.1. Схема процесса листовой вытяжки

При вытяжке плоской заготовки (рис. 3.1) пластическую деформацию получает фланец заготовки и часть заготовки на скругленной кромке матрицы. Остальная часть заготовки деформируется упруго.

3.1. Определение радиальных напряжения в опасном сечении

Радиальные напряжения $\sigma_{\rho \max}$ определяются следующим образом:

$$\sigma_{\max}(R) = \sigma_t \cdot \left[\ln \left(\frac{R}{R_{\text{и}}} \right) + \frac{H}{\sigma_t} \cdot \ln \left[\frac{R \cdot (R_{\text{и}} + \sqrt{R_0^2 + R_{\text{и}}^2 - R^2})}{R_{\text{и}} \cdot (R_0 + R)} \right] + T \right] \times$$

$$\times \frac{(1 + 1,6 \cdot f)}{\left(1 - 0,2 \cdot K \cdot \frac{R_{\text{и}}}{R} \cdot m^2 \cdot f \right)};$$

$$R_{\text{и}} = R_p + \frac{S}{2}; \quad H = \frac{\sigma_b}{(1 - \psi)^2}; \quad T = \frac{s}{2 \cdot r_m + s};$$

$$r_m = 7 \cdot m; \quad m = \frac{R_0}{R_{\text{и}}}; \quad K = \left(1 - 9 \cdot \frac{m}{m - 1} \cdot \frac{s}{R_0} \right), \quad (3.1)$$

где R – переменный радиус в диапазоне от $R_{\text{и}}$ до R_0 .

Для определения экстремального значения $\sigma_{e \max}$ строим график зависимости σ_{\max} в функции от R .

Данный диапазон для R разбивается на 4–5 точек, и рассчитывается величина σ_{\max} по выражению (3.1), после чего строится зависимость $\sigma_{\max} = f(R_i)$ (рис. 3.2).

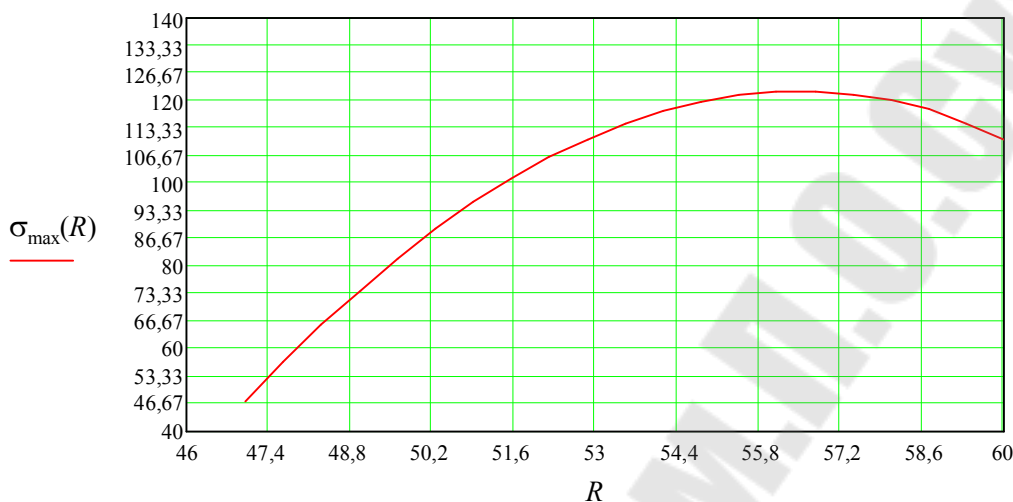


Рис. 3.2. График зависимости $\sigma_{\max} = f(R_i)$

Из рис. 3.2 определяем экстремальное значение радиального напряжения в опасном сечении $\sigma_{e\max} = 122$ МПа, которому соответствует экстремальное значение радиуса $R_e = 56,5$ мм.

3.2. Определение усилия прижима

Минимальная величина усилия прижима, необходимого для предотвращения складкообразования при вытяжке цилиндрических стаканов:

$$Q = 0,1 \cdot \left[1 - 9 \cdot \frac{m}{(m-1)} \cdot \frac{s}{R_0} \right] \cdot m^2 \cdot \pi \cdot R_{\text{н}} \cdot s \cdot \sigma_{e\max};$$

$$Q = 20780 \text{ Н.} \quad (3.2)$$

3.3. Распределение контактных напряжений на прижиме

Данное распределение определим для стадии вытяжки, когда возникает экстремальное значение радиального напряжения в опасном сечении $\sigma_{e\max} = 122$ МПа, которому соответствует экстремальное значение радиуса $R_e = 56,5$ мм.

$$\sigma(\rho) = \sigma_t \cdot \left[\ln\left(\frac{R_e}{\rho}\right) + \frac{H}{\sigma_t} \cdot \ln\left[\frac{R_e \cdot \left(\rho + \sqrt{R_0^2 + \rho^2 - R_e^2}\right)}{\rho \cdot (R_0 + R_e)}\right] + F + T \right] \times (1 + 1,6 \cdot f);$$

$$F = f \cdot \frac{Q}{\pi \cdot R_e \cdot s \cdot \sigma_t}. \quad (3.3)$$

Переменная величина ρ изменяется в диапазоне $[R_{и}; R_e]$.

В соотношении (3.1) для установления зависимости необходимо вместо ρ подставить 4–5 значений радиуса на прижиме из указанного диапазона и построить требуемый график (рис. 3.3).

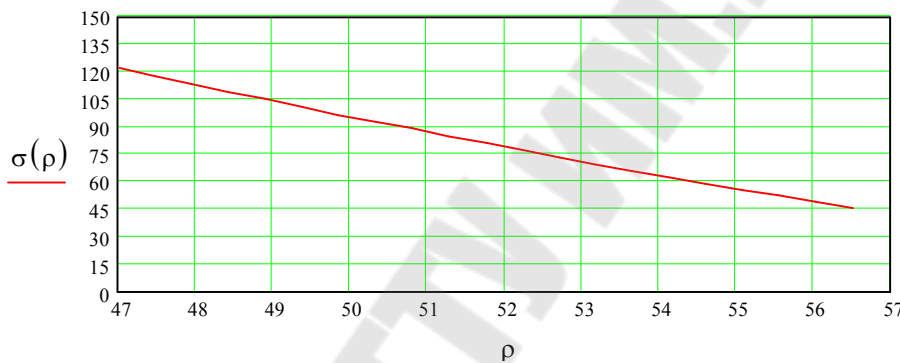


Рис. 3.3. Распределение контактных напряжений на прижиме

3.4. Определение зависимости усилия вытяжки от хода пуансона

Зависимость усилия вытяжки без упрочнения от пути пуансона при малых по сравнению с размерами заготовки значениями R_n и r_m записывается в виде:

$$P(h) = 2 \cdot \pi \cdot R_{и} \cdot s \cdot \sigma_t \cdot \left(\ln\left(\frac{\sqrt{R_0^2 - 2R_{и} \cdot h}}{R_{и}}\right) + f \cdot \frac{Q}{\pi \cdot s \cdot \sigma_s \cdot \sqrt{R_0^2 - 2R_{и} \cdot h}} + T \right) \times (1 + 1,6 \cdot f). \quad (3.4)$$

В данном выражении необходимо найти конечную высоту стакана h_k , вытягиваемого из заготовки диаметром $D_0 = 2R_0$, для построения графика $P = f(h)$. Максимальная величина хода пуансона будет равна этой высоте. Величину h_k определяем по формуле

$$h_k = R_0 - R_p. \quad (3.5)$$

В результате подстановки численных значений находим $h = 15$ мм.

В зависимость (3.4) подставляем значения высоты стакана в диапазоне $[0; h_r]$, разбив его на равное количество интервалов. После чего можно построить зависимость $P = f(h)$ (рис. 3.4).

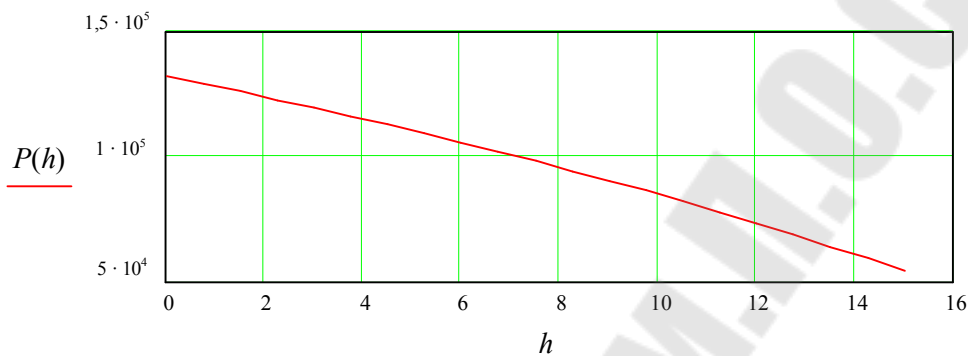


Рис. 3.4. Зависимость усилия вытяжки от хода пуансона

4. Прямое выдавливание

Анализ процесса прямого выдавливания круглого профиля начинается с изучения схемы этого процесса и механической схемы деформации (схемы главных напряжений и деформаций), приведенных на рис. 4.1.

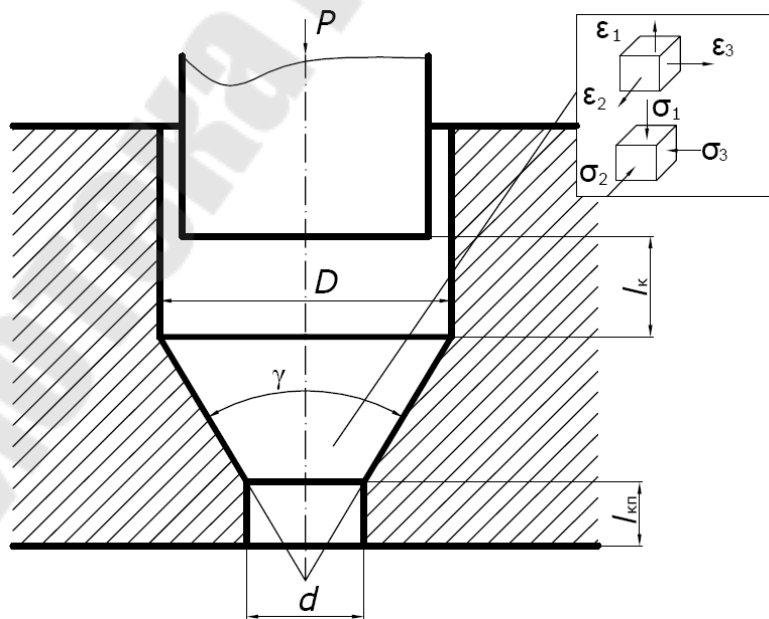


Рис. 4.1. Схема процесса

Анализ процесса рассматривается на примере, исходные данные для которого следующие:

Исходный диаметр заготовки, мм.....	$D = 40$
Конечный диаметр профиля, мм.....	$d = 30$
Скорость деформирования, мм/с.....	$V = 7$
Длина контейнера, мм.....	$l_k = 130$
Длина калибрующего пояса, мм.....	$l_{кп} = 30$
Температура обработки, °С.....	$T = 20$
Материал.....	сталь 18ХГТ
Предел текучести стали 18ХГТ, МПа.....	$\sigma_t = 883$
Предел прочности стали 18ХГТ, МПа.....	$\sigma_b = 981$
Предел относительного сужения площади поперечного сечения образца при шейкообразовании, %.....	$\psi = 50$
Коэффициент трения.....	$f = 0,1$

4.1. Определение оптимального угла конуса матрицы

Для определения оптимального угла конуса матрицы γ , соответствующего минимальному удельному давлению выдавливания, необходимо в выражение (4.1) для удельного давления выдавливания последовательно подставить значение полуугла конической зоны матрицы γ в диапазоне $[1^\circ; 90^\circ]$, разбив его на ряд равных интервалов, и построить искомую зависимость $p = f(\gamma)$.

$$P = \sigma_s \left[\left(\frac{4}{1 + \cos(\gamma)} + \frac{2f}{\sin(\gamma)} \right) \ln \frac{D}{d} + \frac{4fl_{кп}}{d} + \frac{4fl_k}{D} \right]. \quad (4.1)$$

Определим сопротивление пластической деформации для данного варианта задания по эмпирическим формулам [1], в зависимости от температуры обработки.

Холодное выдавливание

$$\sigma_s = \sigma_t + \left(\frac{\sigma_b}{1 - \psi_0} - \sigma_t \right) \left(\frac{\psi}{\psi_0} \right)^{\frac{\sigma_b \psi_0}{(1 - \psi_0)[\sigma_b - \sigma_t(1 - \psi_0)]}}. \quad (4.2)$$

Здесь $\psi = \frac{D^2 - d^2}{D^2} = 0,438$ – относительное уменьшение площади поперечного сечения.

Подставив известные значения величин, входящих в (4.2), находим $\sigma_s = 1,729 \cdot 10^3$ МПа.

Горячее выдавливание

Сопротивление пластической деформации σ_s при горячей деформации для данной стали находим из выражения [1]:

$$\sigma_s = \frac{2300 \cdot \varepsilon^{0,252} \cdot u^{0,143}}{e^{0,0029 \cdot T}}. \quad (4.3)$$

Здесь ε, u, T – степень деформации, скорость деформации, температура деформации соответственно. Эмпирические формулы для расчета σ_s других групп сталей и сплавов представлены в работе [1].

Степень деформации ε находим следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{F_0 - F}{F_0} = \frac{D^2 - d^2}{D^2}.$$

Для определения скорости деформации u необходимо значение времени деформирования:

$$t = \frac{D - d}{V}.$$

Тогда

$$u = \dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t}.$$

Подставив значения ε, u, T в (4.3), находим σ_s .

Искомую зависимость $p = f(\gamma)$ строим с учетом найденных значений сопротивления пластической деформации и с учетом того, что заданному значению l_k соответствует начало процесса выдавливания.

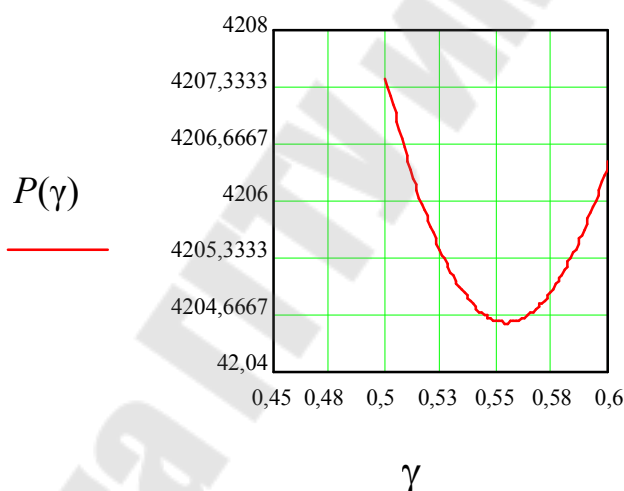
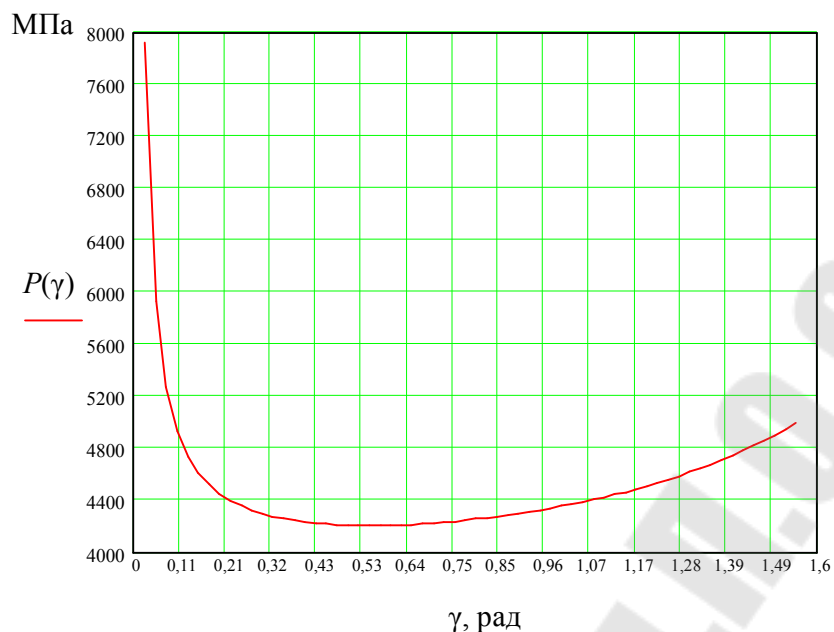


Рис. 4.2. Определение оптимального угла конуса матрицы

Из рис. 4.2 находим, что $p_{\min} = 4,204 \cdot 10^3$ МПа при полуугле конуса матрицы $\gamma = 0,56$ рад или $\gamma = 32^\circ$. Полученный угол фиксируется как постоянный для дальнейшего анализа процесса.

4.2. Определение степени влияния параметров d и $l_{\text{кп}}$ в пределах $\pm 10\%$ от их номинального значения

Анализ влияния параметров d и $l_{\text{кп}}$ на удельное давление выдавливания ведем по выражению (4.1) при найденном оптимальном угле $\gamma = 0,56$ рад.

При анализе влияния параметра d в выражении (4.1) необходимо учитывать влияние d на значение σ_s .

Диапазон изменения параметров d и $l_{кп}$ в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения и составляет соответственно: $l_{кп} - [27; 33]$ и $d - [27; 33]$.

Фиксируя один из параметров, строим соответствующий график, разбивая диапазон d и $l_{кп}$ на ряд равных интервалов (рис. 4.3 и 4.4).

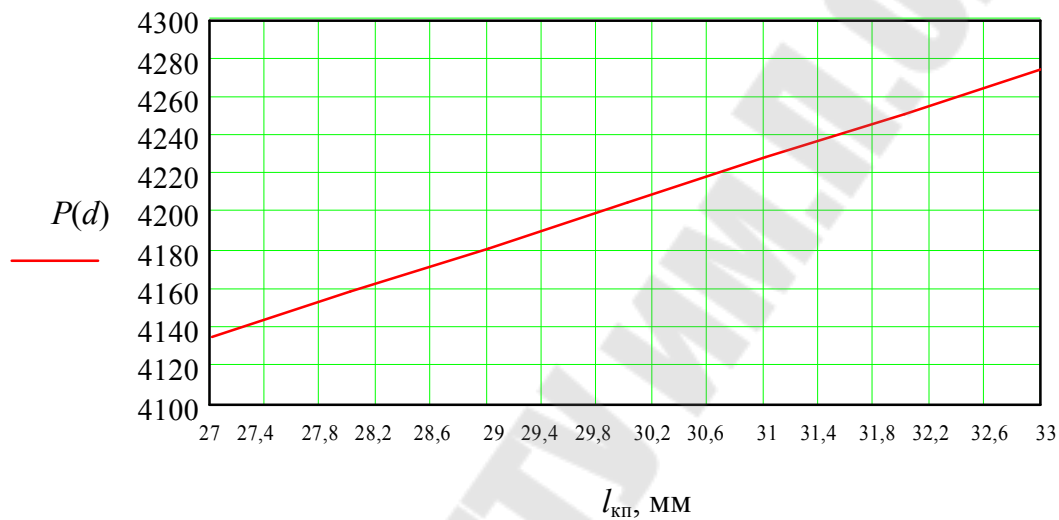


Рис. 4.3. Зависимость p удельного давления выдавливания от $l_{кп}$ при $d = \text{const}$

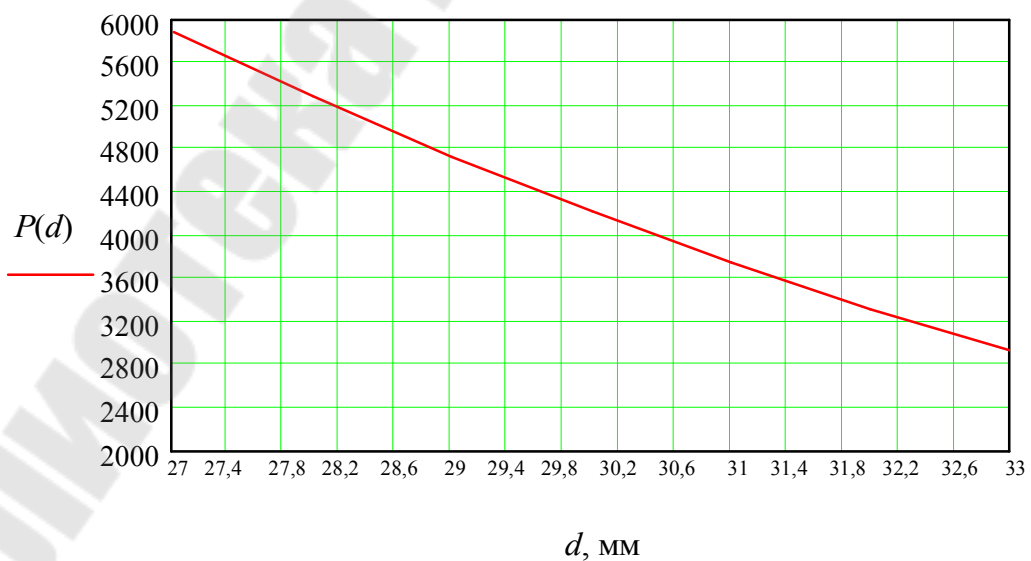


Рис. 4.4. Зависимость p удельного давления выдавливания от d при $l_{кп} = \text{const}$

4.3. Определение зависимости удельного давления выдавливания от перемещения пуансона

В качестве исходной зависимости выбирается уравнение (4.1), в котором все технические параметры фиксируются равными номинальным значениям по заданию, а изменяется параметр l_k в диапазоне $[0; l_k]$. Полуугол конуса матрицы γ равен своему оптимальному значению. Разбивая его на 4–5 равных интервала и подставляя значения l_k в (4.1), находят текущие значения $p = f(l_k)$, по которым строится искомый график (рис. 4.5).

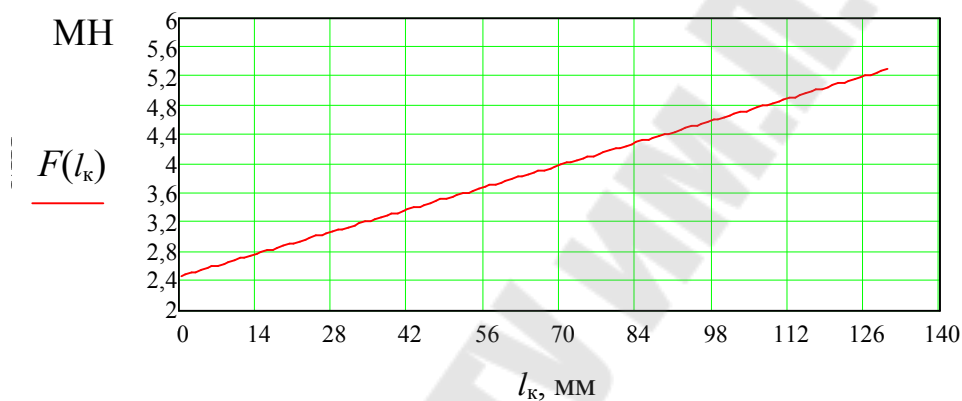


Рис. 4.5. Зависимость p удельного давления выдавливания от l_k при $l_k = \text{const}$, $d = \text{const}$, $\gamma = \text{const}$

5. Объемная штамповка

В процессе штамповки круглой поковки в открытых штампах имеют место два основных периода: заполнение полости штампа с одновременным вытеканием заусенца, обусловленным условиями процесса, и вытекание в заусенец излишков металла со штамповкой поковки по высоте. На рис. 5.1 представлена схема процесса и механическая схема деформации.

Деформирующая сила, необходимая для осуществления деформации, в конечный момент времени штамповки представляет сумму двух слагаемых:

$$P = P_3 + P_{\text{ш}}, \quad (5.1)$$

где P_3 – усилие, необходимое для деформации металла в заусенце; $P_{\text{ш}}$ – усилие, необходимое для деформации металла в штампе.

В открытых штампах сжатие заусенца происходит в зоне мостика шириной S и высотой h_3 , определяющей толщину заусенца (рис. 5.1). Величина h_3 в процессе штамповки является переменной. В магазине размещается излишек металла.

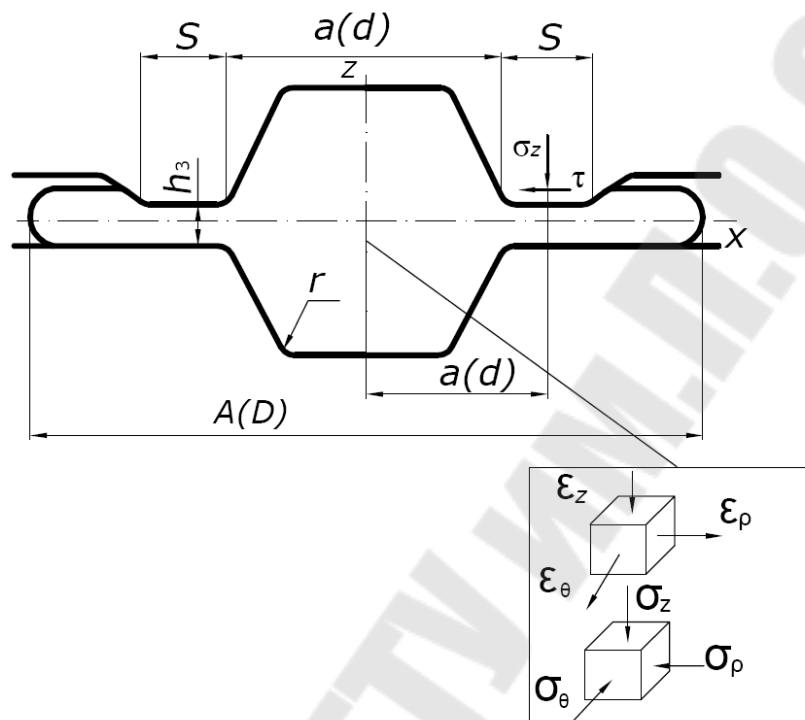


Рис. 5.1. Схема процесса

За второй период штамповки пластической деформацией будет охвачен относительно небольшой объем металла по обе стороны от плоскости разъема штампа высотой h_0 (рис. 5.2).

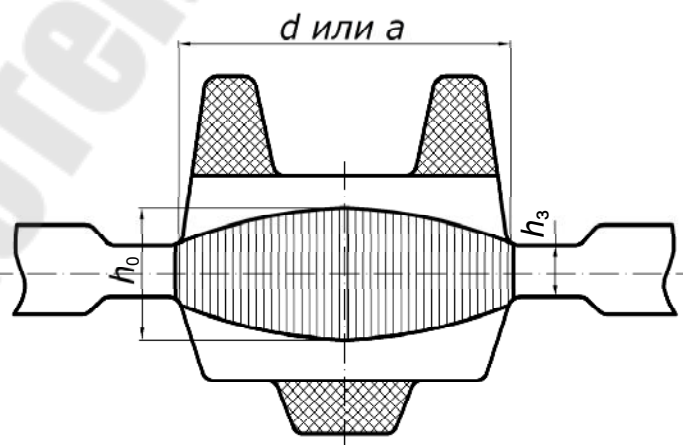


Рис. 5.2. Очаг деформации при формоизменении в полости штампа

Очаг интенсивной деформации имеет линзообразную форму. Величина отношения толщины линзы h_0 к толщине заусенца h_3 увеличивается с увеличением $\frac{a}{h_3}$, или $\frac{d}{h_3}$. При $\frac{a}{h_3} \approx 20$ значение $\frac{h_0}{h_3}$ достигает примерно величины 5. При изменении отношения $\frac{a}{h_3}$ происходит качественное изменение формы очага интенсивной деформации. До окончания $\frac{a}{h_3} \approx 3$ очаг деформации имеет форму двояковыпуклой линзы. При больших отношениях $\frac{a}{h_3}$ «линза» становится двояковыпуклой. При малых отношениях $\frac{a}{h_3}$ происходит выдавливание заусенца и доштамповка, а высадка участка заготовки, т. е. осадка в кольцах.

Процесс деформации заусенца в зоне мостика – осадка. Вследствие больших контактных усилий на мостике можно считать, что контактные касательные напряжения постоянны и равны

$$\tau_k = -\mu_s \sigma_s.$$

В поковках прямоугольной формы металл, находящийся в магазине, не препятствует течению металла в зоне мостика. Для поволок удлиненной формы, имеющих в плане форму прямоугольника или близкую к ней, уравнение, определяющее распределение и величину напряжений σ_{z3} записывается в виде

$$\sigma_{z3} = \beta \sigma_s \left[1 + \frac{2f_s(0,5a + S - x)}{h_3} \right]. \quad (5.2)$$

Максимальное напряжение σ_{z3} будет находиться в плоскости разъема поковки, т. е. при $x = 0,5a$

$$\sigma_{z3} = \beta \sigma_s \left[1 + \frac{2f_s S}{h_3} \right]. \quad (5.3)$$

Удельное усилие деформирования заусенца

$$p_3 = \beta \sigma_s \left[1 + f \frac{S}{h_3} \right].$$

Удельное усилие круглых в плане поковок, участок заусенца, деформируемого мостиком, окружен кольцом металла, находящегося в магазине. Это кольцо будет затруднять вытекание металла из зоны мостика и деформироваться под давлением со стороны последнего.

Напряжение на пограничной поверхности мостика и магазина находится следующим образом:

$$\sigma_{z3} = \beta \sigma_s \left[1,5 + \frac{2f(0,5d + S - \rho)}{h_3} \right]. \quad (5.4)$$

Максимальное значение σ_{z3} при $\rho = 0,5d$:

$$\sigma_{z3} = \sigma_s \left[1,5 + \frac{2a_s S}{h_3} \right].$$

Удельное усилие деформирования заусенца в поковках круглых в плане равно

$$p_3 = \beta \sigma_s \left[1,5 + f \frac{S}{h_3} \right]. \quad (5.5)$$

Напряжение $\sigma_{zп01}$ в полости штампа для круглых в плане поковок находим из выражения

$$\sigma_{zп} = \beta \sigma_s \left[1 + 1,25 \ln \left(\frac{d_{п}}{h_3} - \frac{\rho}{0,5h_3} \right) \right]. \quad (5.6)$$

Удельное давление деформирования металла поковки в полости штампа для удлиненной в плане поковок равно

$$p_{п} = \sigma_s \left[\frac{2fS}{h_p} - 0,25 + 1,25 \ln \frac{a}{h_3} \right]. \quad (5.7)$$

Для осесимметричных поковок это давление находится из выражения

$$p_{п} = \sigma_s \left[\frac{2fS}{h_p} - 0,375 + 1,25 \ln \frac{d}{h_3} \right]. \quad (5.8)$$

Полное усилие штамповки $P = P_3 + P_{п}$ определяется формулами:

1) поковки удлиненного типа:

$$P_{\Pi} = \sigma_s \left\{ \left[1 + f \frac{S}{h_3} \right] F_3 + \left[\frac{2fS}{h_3} - 0,25 + 1,25 \ln \frac{a}{h_3} \right] F_{\Pi} \right\}; \quad (5.9)$$

2) для круглых в плане поковок:

$$P = \sigma_s \left\{ \left[1,5 + f \frac{S}{h_3} \right] F_3 + \left[\frac{2fS}{h_3} - 0,375 + 1,25 \ln \frac{d}{h_3} \right] F_{\Pi} \right\}, \quad (5.10)$$

где F_{Π} – площадь проекции поковки в плоскости разреза; F_3 – площадь проекции мостика заусенца.

Предельное усилие штамповки для поковок:

а) удлиненных в плане:

$$P_{\text{пред}} = 1,15 \sigma_s \left[1 + 0,25 \frac{a + 2S}{h_3} \right];$$

б) круглых в плане:

$$P_{\text{пред}} = \sigma_s \left[1 + 0,17 \frac{d + 2S}{h_3} \right].$$

Анализ процесса рассматривается на примере, исходные данные для которого следующие:

Высота исходной заготовки, мм.....	$h_0 = 120$
Диаметр поковки, мм.....	$d_{\Pi} = 210$
Высота поковки, мм.....	$h_{\Pi} = 80$
Скорость деформирования, мм/с.....	$V = 6$
Температура обработки, °С.....	$T = 1200$
Материал.....	сталь 45
Коэффициент трения.....	$f = 0,3$
Ширина мостика облойной канавки, мм.....	$S = 22$

5.1. Определение оптимальной высоты мостика заусенечной канавки

Так как объемная штамповка поковок относится, как правило, к горячей деформации, по данным задания из работы [1] находим сопротивление пластической деформации σ_s для данной стали 45. Для других сталей и сплавов используются эмпирические формулы, представленные в работе [1].

Для стали 45 имеем:

$$\sigma_s = \frac{1330 \cdot \varepsilon^{0,252} \cdot u^{0,143}}{e^{0,0025 \cdot T}}. \quad (5.11)$$

Здесь ε, u, T – степень, скорость и температура деформации соответственно.

Степень деформации:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_{\text{п}}}{h_0} = \frac{120 - 80}{120} = 0,33.$$

Для нахождения $u = \dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t}$ необходимо найти время деформирования t .

$$t = \frac{h_0 - h_{\text{п}}}{V} = \frac{40}{6} = 6,6 \text{ с.}$$

Откуда

$$u = \dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t} = 0,05 \text{ с}^{-1}.$$

Подставляя ε, u и T в выражение (5.11), находим $\sigma_s = 32,71$ МПа.

Для определения оптимальной высоты мостика заусенечной канавки необходимо в выражение (5.10) для усилия штамповки P последовательно подставить значение высота h_3 в диапазоне $[0,1; 3,6]$, разбив его на ряд равных интервалов и находя P , построить искомую зависимость $P = f(h_3)$. На полученной зависимости фиксируем $h_{3 \text{ min}}$, соответствующего точке перегиба полученной кривой (рис. 5.3).

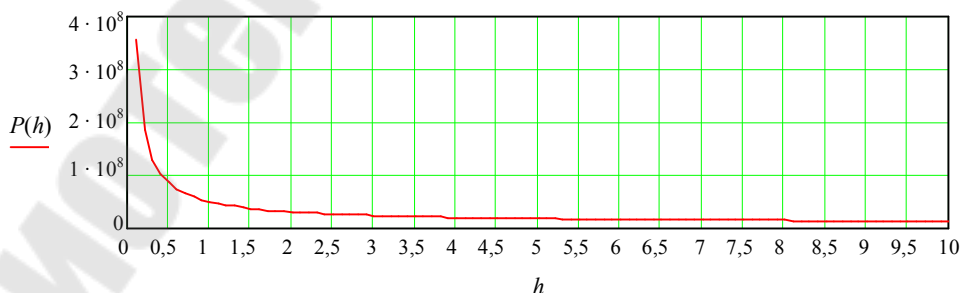


Рис. 5.3. Зависимость $P = f(h_3)$ для определения оптимальной высоты мостика заусенечной канавки

Из рис. 5.3 находим $h_{3 \text{ min}} = 3$ мм, т. к. при увеличении этого значения высоты мостика усилие осадки существенно не уменьшается.

5.2. Распределение нормальных напряжений на участке мостика облойной канавки и в полости штампа

Для построения зависимости $\sigma_{z3} = f(\rho)$ и $\sigma_{zII} = f(\rho)$ напряжений на пограничной поверхности мостика и магазина облойной канавки и напряжений в поковке соответственно необходимо взять выражения (5.4) и (5.6), подставив сюда значения параметра ρ в соответствующих диапазонах. Для облоя данный диапазон равен $[\frac{d_{II}}{2}; \frac{d_{II}}{2} + S]$ или $[105; 127]$, а для полости поковки $[0; \frac{d_{II}}{2}]$ или $[0; 105]$. Разбив диапазоны на ряд равных интервалов, строим искомые зависимости (рис. 5.4).

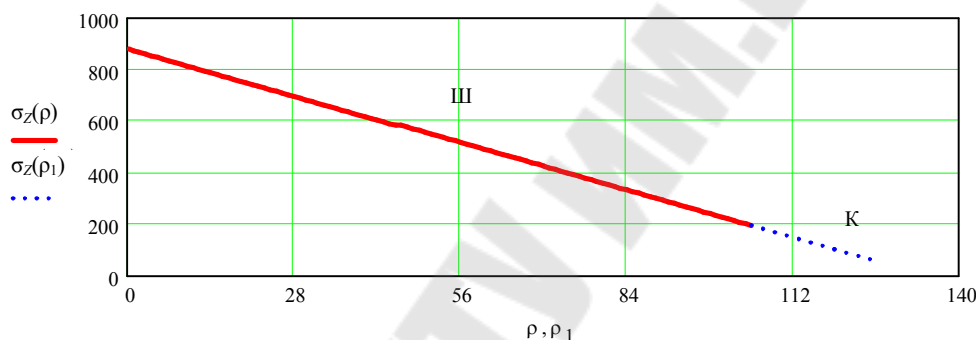


Рис. 5.4. Распределение нормальных напряжений на участке мостика облойной канавки (линия К) и в полости штампа (линия Ш)

5.3. Определение зависимости усилия деформирования

от отношения $\frac{S}{h_3}$

Для построения зависимостей $P_3 = f\left(\frac{S}{h_3}\right)$, $P_{III} = f\left(\frac{S}{h_3}\right)$ и $P = f\left(\frac{S}{h_3}\right)$ необходимо воспользоваться выражением (5.10). Здесь первое слагаемое определяет зависимость P_{III} от $\frac{S}{h_3}$, второе – зависимость P_3 от $\frac{S}{h_3}$, а сумма – зависимость P от $\frac{S}{h_3}$.

$$\text{Находим } F_{II} = \frac{\pi d_{II}^2}{4}; F_3 = \frac{\pi[(d_{II} + 2S)^2 - d_{II}^2]}{4}.$$

Подставив $d_{\text{п}}$ и S , находим площади: $F_{\text{п}} = 69270 \text{ мм}^2$, $F_3 = 16026,6 \text{ мм}^2$.

Параметр $\frac{S}{h_3}$ изменяется в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения при $S = \text{const}$.

Находим $\frac{S}{h_3} = \frac{22}{0,8} = 28$. Тогда данный параметр по условию задания изменяется в диапазоне $\frac{S}{h_3} [25; 31]$. Разбив его на равные интервалы и подставляя в выражение последовательно для P_3 , $P_{\text{ш}}$, P , строим искомую зависимость (рис. 5.5).

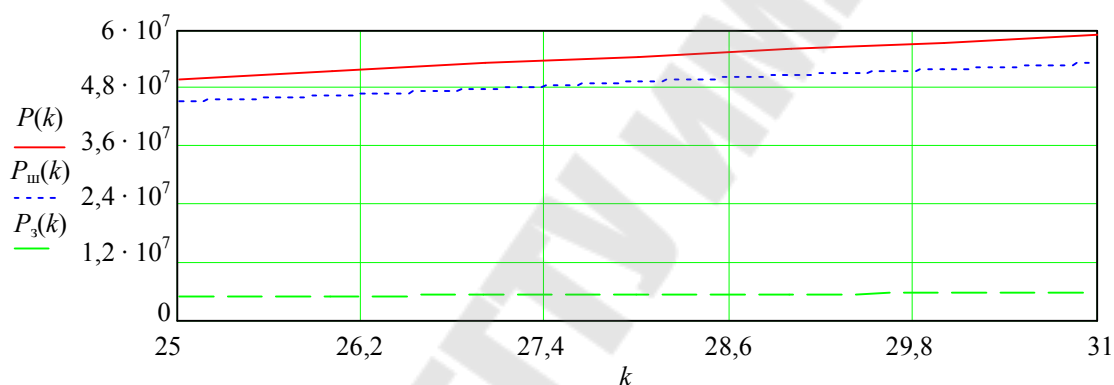


Рис. 5.5. Зависимость P_3 , $P_{\text{ш}}$ и P от параметра $\frac{S}{h_3} = k$

6. Закрытая прошивка

Анализ процесса закрытой прошивки цилиндрической заготовки начинается с изучения схемы этого процесса и механической схемы деформации (схемы главных напряжений и деформаций), приведенных на рис. 6.1.

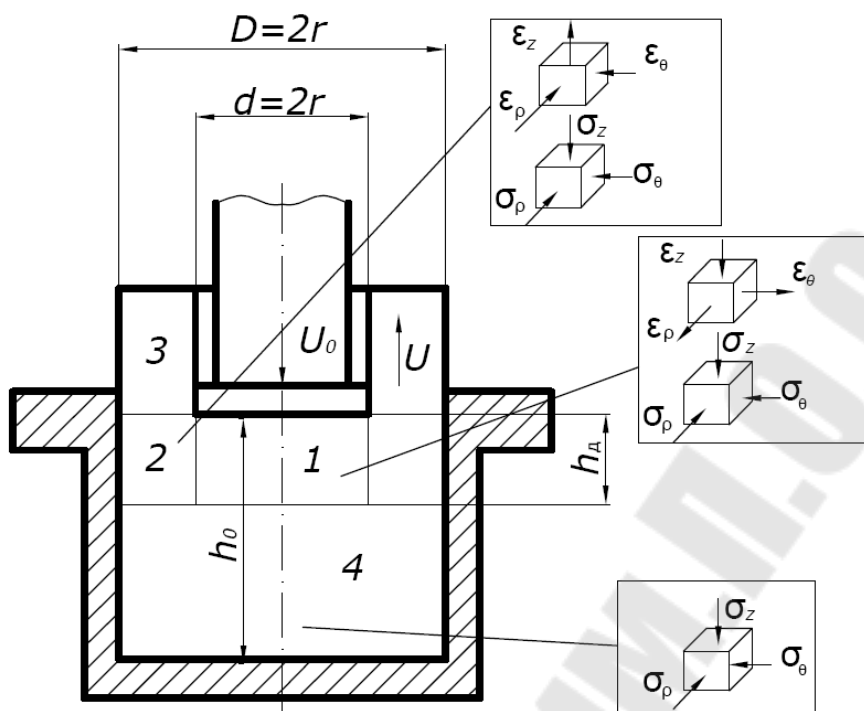


Рис. 6.1. Схема процесса закрытой прошивки

Анализ процесса рассматривается на примере, исходные данные для которого следующие:

Диаметр заготовки, мм	$D = 150$
Высота заготовки, мм	$h_0 = 100$
Диаметр прошивня, мм.....	$d = 130$
Скорость деформирования, мм/с.....	$V = 5$
Температура обработки, °С.....	$T = 1150$
Коэффициент трения.....	$f = 0,25$
Материал.....	сталь ЭИ602

6.1. Определение размеров поковки после прошивки и сопротивления пластической деформации

В процессе прошивки высота очага деформации в поковке определяется из соотношения

$$h_d = d \frac{1 - \frac{d}{D}}{\sqrt{3 \frac{d}{D} \left(1 + \frac{d}{D}\right)}}. \quad (6.1)$$

Подставляя в (6.1) исходные данные, получаем $h_d = 7,9$ мм. Учитывая, что заготовка цилиндрическая, вычисляем ее объем:

$$V_3 = \frac{\pi D^2}{4} h_0 = \frac{\pi \cdot 150^2}{4} \cdot 100 = 17,6 \cdot 10^6 \text{ мм}^3. \quad (6.2)$$

Высоту поковки после прошивки $h_{\text{п}}$ находим из закона постоянства объема (рис. 6.2): $V_3 = V_{\text{п}}$.

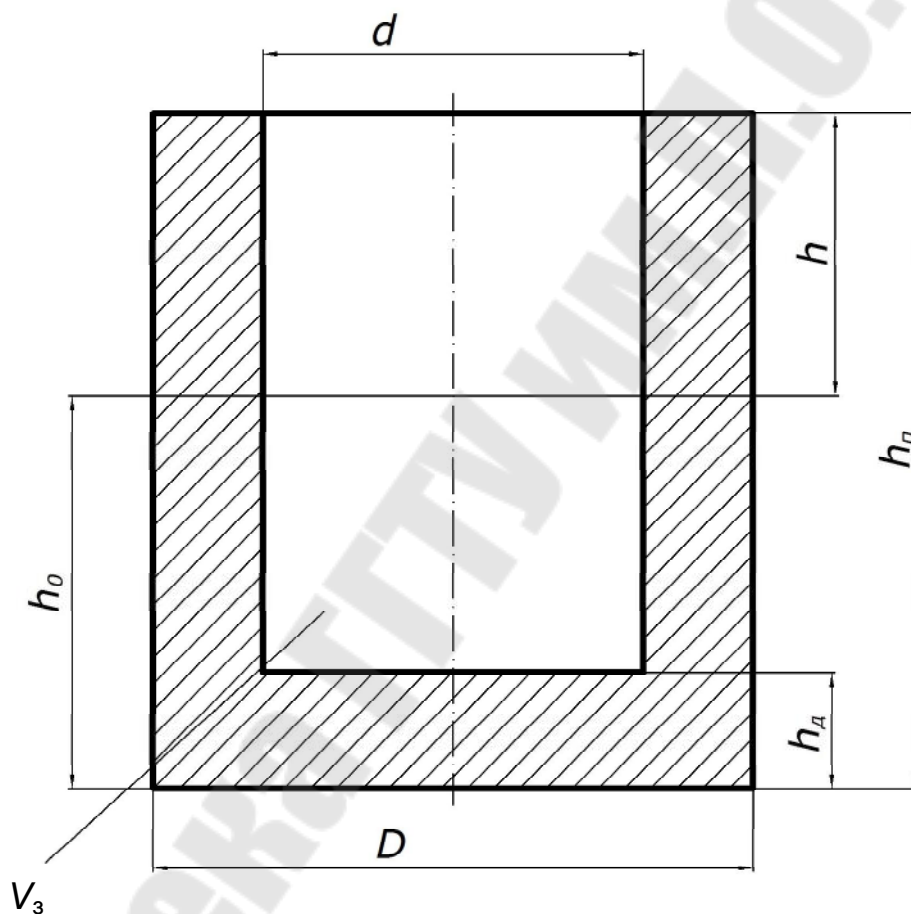


Рис. 6.2. Схема к определению размеров поковки после прошивки

Объем поковки после прошивки находим следующим образом:

$$V_{\text{п}} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} h_{\text{п}} + \frac{\pi d^2}{4} h_d. \quad (6.3)$$

Приравнявая (6.2) и (6.3), получаем $h_{\text{п}}$:

$$\frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} h_{\text{п}} + \frac{\pi d^2}{4} h_d = \frac{\pi D^2}{4} h_0.$$

Откуда

$$h_{\text{п}} = \frac{D^2 h_0 - d^2 h_{\text{д}}}{D^2 - d^2} = 378 \text{ мм.} \quad (6.4)$$

Находим степень деформации и скорость деформации при закрытой прошивке:

$$\varepsilon = \frac{h_{\text{п}} - h_0}{h_{\text{п}}} = \frac{378 - 100}{378} = 0,73.$$

Время деформирования находим исходя из пройденного расстояния прошивнем на конечной стадии формоизменения ($h_0 - h_{\text{д}}$) и скорости деформирования V :

$$t = \frac{h_0 - h_{\text{д}}}{V} = \frac{100 - 8}{5} = 18,4 \text{ с.}$$

$$\text{Скорость деформации } u = \dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t} = \frac{0,73}{18,4} = 0,039 \text{ с}^{-1}.$$

Сопротивление пластической деформации σ_s находим по уравнению [1]. Для других групп сталей и сплавов используются эмпирические формулы, представленные в работе [1].

$$\sigma_s = \frac{11000 \cdot \varepsilon^{0,35} \cdot u^{0,098}}{e^{0,0032 \cdot T}}. \quad (6.5)$$

Здесь ε, u, T – степень, скорость и температура деформации соответственно.

Подставляя ε, u, T в выражение (6.5), находим $\sigma_s = 231,7 \text{ МПа}$.

6.2. Распределение нормальных напряжений на торце прошивня

$$\sigma_z(\rho) = \beta \sigma_s \left[\ln \left(\frac{R}{r} \right) + \frac{r - \rho}{h_{\text{д}}} + 3 \right], \quad (6.6)$$

где ρ, r, R – текущий и конечный радиусы прошивня, радиус исходной заготовки; $\beta = 1,1$ – коэффициент Лоде.

Для нахождения распределения $\sigma_z(\rho)$ напряжений на торце прошивня по соотношению (6.6) необходимо определить $\sigma_z(\rho)$ в 4–5 точ-

ках, подставляя значение текущего радиуса прошивня ρ в диапазоне $[0; d/2]$ или $[0; 65]$. После этого строится график зависимости $\sigma_z(\rho) = f(\rho)$ (рис. 6.3).

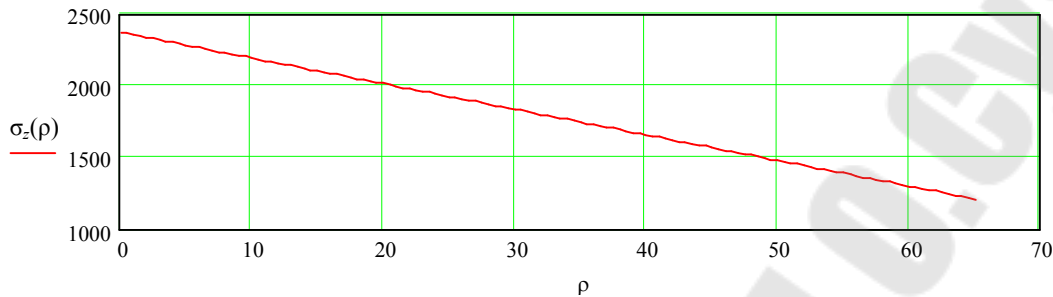


Рис. 6.3. Распределение нормальных контактных напряжений на торце прошивня

6.3. Определение зависимости давления прошивки от перемещения прошивня

Удельное усилие, необходимое для деформирования осадкой зоны 1:

$$p_1 = \beta \sigma_s. \quad (6.7)$$

Удельное усилие, необходимое для деформирования осадкой зоны 2:

$$p_2 = \beta \sigma_s \left(0,5 + \frac{1}{1 - \frac{d^2}{D^2}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \right). \quad (6.8)$$

Удельное усилие, необходимое для преодоления трения по цилиндрической контактной поверхности между зоной 2 и матрицей 5:

$$p_3(h_i) = \beta \sigma_s \cdot \frac{h_{\pi}}{d} \cdot \frac{\frac{D}{d}}{\frac{D^2}{d^2} - 1}. \quad (6.9)$$

Удельное усилие, необходимое для осуществления сдвига по цилиндрической контактной поверхности разрыва между зонами 2 и 1:

$$p_4(h_i) = \beta \sigma_s \cdot \frac{h_{\pi}}{d} \cdot \frac{1}{1 - \frac{D^2}{d^2}}. \quad (6.10)$$

Удельное усилие, необходимое для преодоления трения между торцом пуансона и зоной 1 и сдвига по поверхности разрыва между зоной 1 и 4:

$$p_5(h_i) = \beta \sigma_s \cdot \frac{d}{h_i} \cdot \frac{1}{6}. \quad (6.11)$$

Удельное усилие, необходимое для осуществления сдвига по кольцевым поверхностям разрыва между зоной 2 и зонами 3 и 4:

$$p_6(h_i) = \beta \sigma_s \cdot \frac{d}{h_d} \cdot \frac{\frac{1}{3} \cdot \frac{d^3}{D^3} - \frac{d}{D} + \frac{2}{3}}{2 \cdot \frac{d}{D} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)}. \quad (6.12)$$

Удельное усилие P на пуансоне можно представить как сумму:

$$P(h_i) = p_1 + p_2 + p_3(h_d) + p_4(h_d) + p_5(h_d) + p_6(h_d). \quad (6.13)$$

Для определения зависимости удельного усилия прошивки от перемещения прошивня необходимо воспользоваться выражениями (6.7)–(6.12).

Диапазон перемещения прошивня $[0,5h_d; h_0]$ разбивается на 4–5 равных интервала как значения текущей глубины прошивки h . Выполняется суммирование значений по (6.13). В интервале $[0,5h_d; h_d]$ величина h влияет на p . В интервале $[h_d; h_0]$ величина h не влияет на p . После чего строится график зависимости $p = f(h)$ (рис. 6.4).

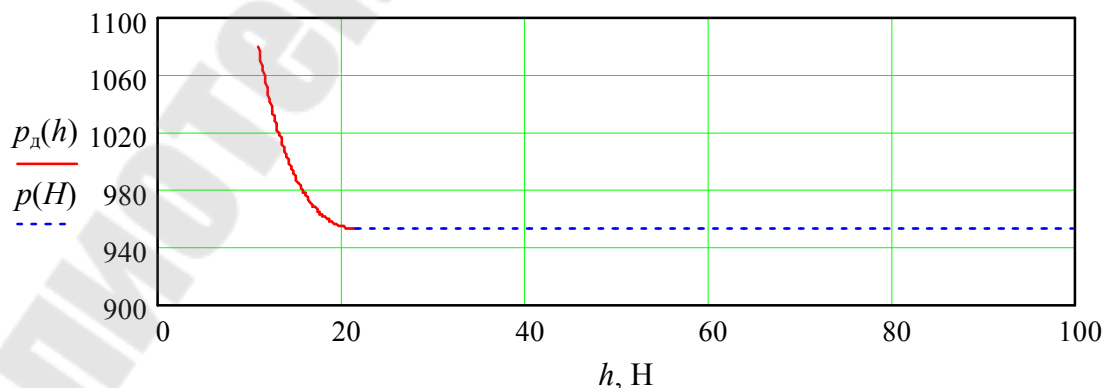


Рис. 6.4. Зависимость удельного давления прошивки от перемещения прошивня

6.4. Определение зависимости давления прошивки от отношения D/d

Определяем давление прошивки от отношение D/d по формуле

$$p = \beta \sigma_s \left[1,5 + \frac{1}{1 - \frac{d^2}{D^2}} \ln \frac{D}{d} + \frac{2}{\sqrt{3 \frac{d}{D} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)}} \right]. \quad (6.14)$$

В данном выражении соотношение D/d изменяется в пределах от 1,1 до 10 при постоянном d . Разбив данный диапазон на ряд равных интервалов, подставляем их значения в (6.14) и находим p_i . По полученным точкам строим искомую зависимость $p = f\left(\frac{D}{d}\right)$ (рис. 6.5).

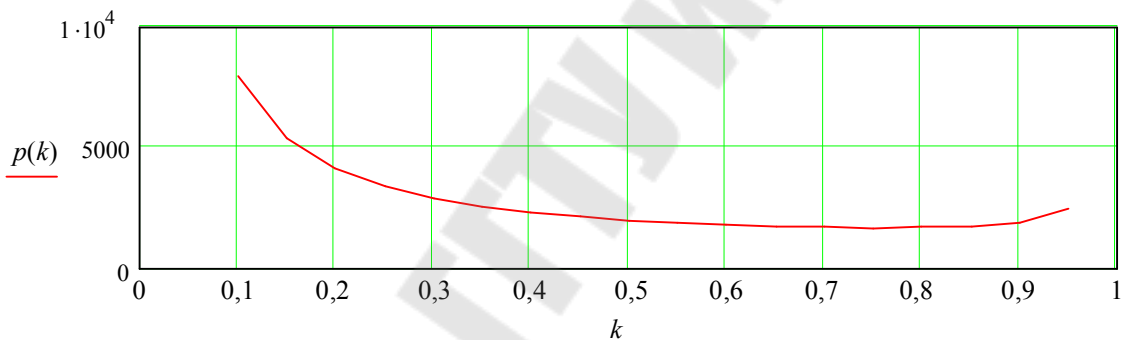


Рис. 6.5. Зависимость удельного давления прошивки от параметра D/d

7. Прокатка

Анализ процесса прокатки полосы начинается с изучения схемы этого процесса и механической схемы деформации (схемы главных напряжений и деформаций), приведенных на рис. 7.1.

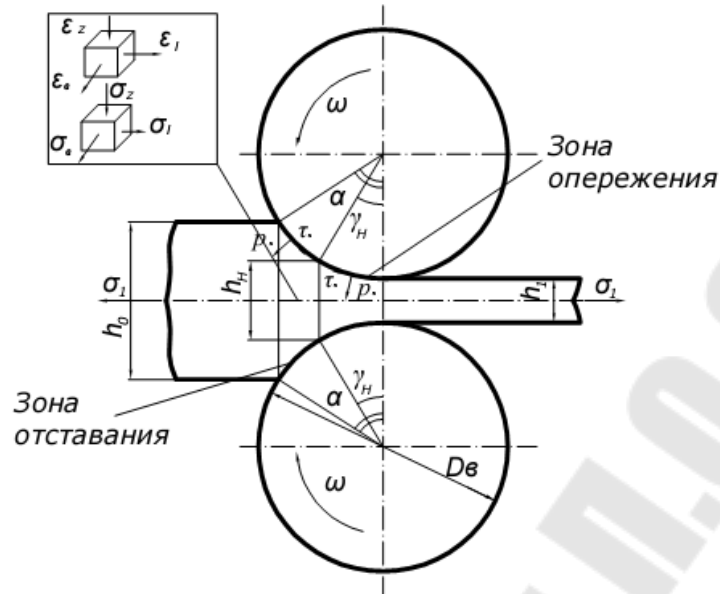


Рис. 7.1. Схема процесса прокатки полосы

Анализ процесса рассматривается на примере, исходные данные для которого следующие:

Начальная толщина полосы, мм.....	$h_0 = 7$
Конечная толщина полосы, мм.....	$h_1 = 5,7$
Ширина полосы перед прокаткой, мм	$b = 50$
Диаметр валков, мм.....	$D = 200$
Линейная скорость вращения валков, мм/с	$V = 9$
Заднее натяжение, МПа	$\sigma_0 = 3$
Переднее натяжение, МПа.....	$\sigma_1 = 3$
Коэффициент контактного трения	$f = 0,1$
Температура обработки, °С.....	$T = 30$
Материал.....	сталь 20

7.1. Определение сопротивления пластической деформации

Для данных варианта задания находим σ_s по зависимости

$$\sigma_s = \sigma_T + \left(\frac{\sigma_b}{1 - \psi_{ш}} - \sigma_T \right) \left(\frac{\psi}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\sigma_b \psi_{ш}}{(1 - \psi_{ш})[\sigma_b - \sigma_T (1 - \psi_{ш})]}}. \quad (7.1)$$

Для стали 20 имеем $\sigma_b = 412$ МПа, $\sigma_T = 245$ МПа, $\psi_0 = 55$ % .
Относительное удлинение площади поперечного сечения:

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} = \frac{bh_0 - bh}{bh_0} = 18,6 \%$$

Подставив известные значения величин, входящих в (7.1), находим $\sigma_s = 824$ МПа.

Среднее напряжение текучести:

$$\sigma_{T1} = \frac{\sigma_T - \sigma_s}{2} = 534,5 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{s1} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s = 851,5 \text{ МПа}.$$

7.2. Определение распределения нормальных и касательных контактных напряжений в очаге деформации

Абсолютная деформация при прокатке:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 1,3 \text{ мм}.$$

Зависимость между углом захвата α , абсолютной деформацией Δh и диаметром вала D определяется зависимостью

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right) = 0,114. \quad (7.2)$$

Давление металла на валки определяется методом совместного решения приближенного уравнения равновесия и уравнения пластичности.

Для зоны отставания имеем:

$$P_{x_{от}} = \left(\frac{\beta \sigma_{T1}^*}{\delta_0}\right) \left[(\xi_0 \delta_0 - 1) \left(\frac{h_0}{h_H}\right)^{\delta_0} + 1 \right]. \quad (7.3)$$

Для зоны опережения получаем:

$$P_{x_{от}} = \left(\frac{\beta \sigma_{T1}^*}{\delta_1}\right) \left[(\xi_1 \delta_1 + 1) \left(\frac{h_x}{h_1}\right)^{\delta_1} - 1 \right]. \quad (7.4)$$

Коэффициенты ξ_i и δ_i находятся из следующих соотношений:

$$\xi_0 = \frac{\beta \sigma_T - \sigma_0}{\beta \sigma_{s1}} = \frac{11 \cdot 534,5 - 3}{11 \cdot 951,5} = 0,559; \quad (7.5)$$

$$\xi_1 = \frac{\beta\sigma_T - \sigma_1}{\beta\sigma_{s1}} = \frac{1,1 \cdot 534,5 - 3}{1,1 \cdot 951,5} = 0,559; \quad (7.6)$$

$$\delta_0 = \delta_1 = \delta = \frac{f}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{0,1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = 3,505. \quad (7.7)$$

Высота нейтрального сечения, где $P_{\text{хот}} = P_{\text{хн}}$, находим из выражения

$$h_{\text{н}} = h_1 \cdot \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\xi_0\delta - 1)(\xi_1\delta + 1)(h_0/h_1)^\delta}}{\xi_1\delta + 1} \right]^{\frac{1}{\delta}}. \quad (7.8)$$

Подставив в (7.8) значения параметров ξ_0 , ξ_1 , δ , h_0 и h_1 , находим $h_{\text{н}} = 5,97$ мм.

Распределение касательных контактных напряжений в очаге деформации находится следующим образом:

– для зоны отставания:

$$\tau_{\text{хот}} = fP_{\text{хот}}; \quad (7.9)$$

– для зоны опережения:

$$\tau_{\text{хот}} = -fP_{\text{хон}}. \quad (7.10)$$

Для построения эпюры распределения нормальных и касательных контактных напряжений в зоне отставания (формулы (7.3) и (7.9)) и зоне опережения (формулы (7.4) и (7.10)) необходимо в соответствующие формулы подставить значения 4–5 точек в диапазоне $[h_0; h_{\text{н}}]$ или $[7; 6,03]$ для зоны отставания и 4–5 точек в диапазоне $[h_{\text{н}}; h_1]$ или $[6,03; 5,7]$ для зоны опережения.

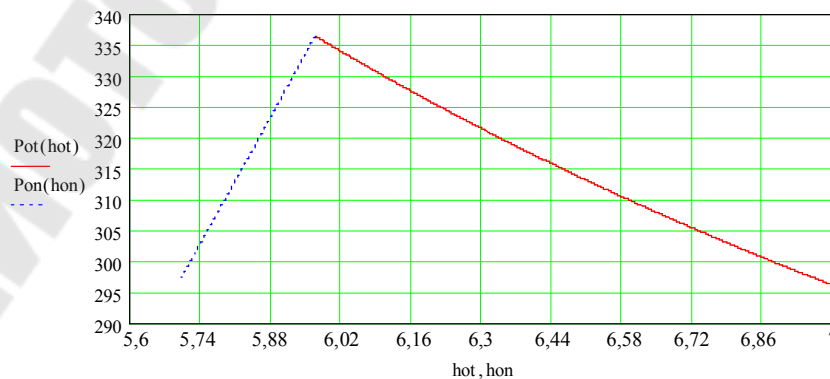


Рис. 7.2. Эпюра распределения нормальных контактных напряжений в очаге деформации

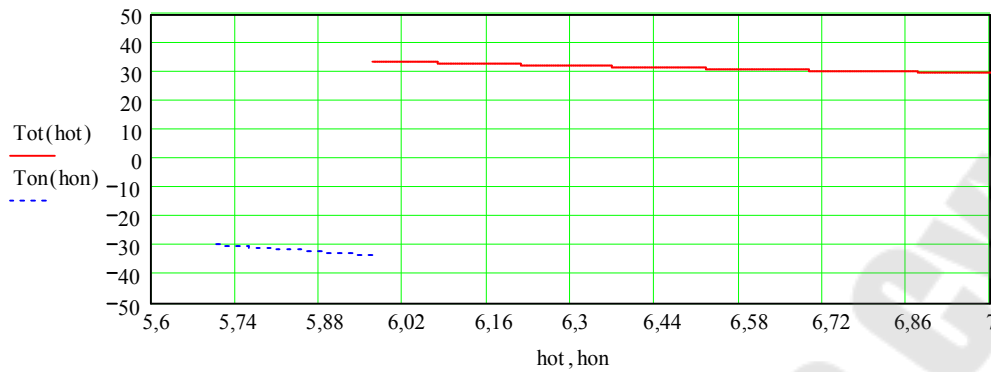


Рис. 7.3. Эпюра распределения касательных контактных напряжений в очаге деформации

7.3. Определение степени влияния изменения параметров h , σ_0 , σ_1 на усилие прокатки

Уравнения для среднего удельного давления прокатки для соответствующих зон записывается следующим образом:

– зона отставания:

$$p_{cp}(\sigma_{0x}) = \frac{\sigma_s}{\Delta h} \left[\frac{(\beta\sigma_{T1} - \sigma_{0x})}{\beta\sigma_{s1}} \cdot \frac{h_0}{(\delta - 2)} \cdot \left[\left(\frac{h_0}{h_H} \right)^{\delta-2} - 1 \right] + \xi_1 \cdot \frac{h_1}{\delta + 2} \cdot \left[\left(\frac{h_H}{h_1} \right)^{\delta+2} - 1 \right] \right]; \quad (7.11)$$

– зона опережения:

$$p_{cp}(\sigma_{1x}) = \frac{\sigma_s}{\Delta h} \left[\xi_0 \cdot \frac{h_0}{(\delta - 2)} \cdot \left[\left(\frac{h_0}{h_H} \right)^{\delta-2} - 1 \right] + \frac{(\beta\sigma_{T1} - \sigma_{1x})}{\beta\sigma_{s1}} \cdot \frac{h_1}{(\delta + 2)} \cdot \left[\left(\frac{h_H}{h_1} \right)^{\delta-2} - 1 \right] \right]. \quad (7.12)$$

Площадь контакта валка с материалом при прокатке полосы:

$$F_k = B \sqrt{\frac{D}{2}} \cdot \Delta h = 570,1 \text{ мм}^2. \quad (7.13)$$

Усилие прокатки для зоны отстаивания и зоны опережения соответственно запишутся в виде:

$$P(\sigma_{0x}) = p_{cp}(\sigma_{0x})F_k; \quad (7.14)$$

$$P(\sigma_{1x}) = p_{cp}(\sigma_{1x})F_k. \quad (7.15)$$

Влияние заднего (σ_0) и переднего (σ_1) напряжения на усилие прокатки находим, варьируя соответствующие параметры в пределах $\pm 10\%$ от их номинального значения и подставляя точки из данного интервала, разбив его на ряд равных промежутков.

Для параметра σ_0 диапазон варьирования равен $[2,7; 3,3]$, а для параметра σ_1 – $[2,7; 3,5]$, т. к. по условию задания $\sigma_0 = \sigma_1$. В общем случае данные параметры отличаются друг от друга.

Подстановка точек из диапазона $[2,7; 3,5]$ в выражение (7.14), а из диапазона $[2,7; 3,3]$ в выражение (7.15) позволяет построить искомую зависимость (рис. 7.4).

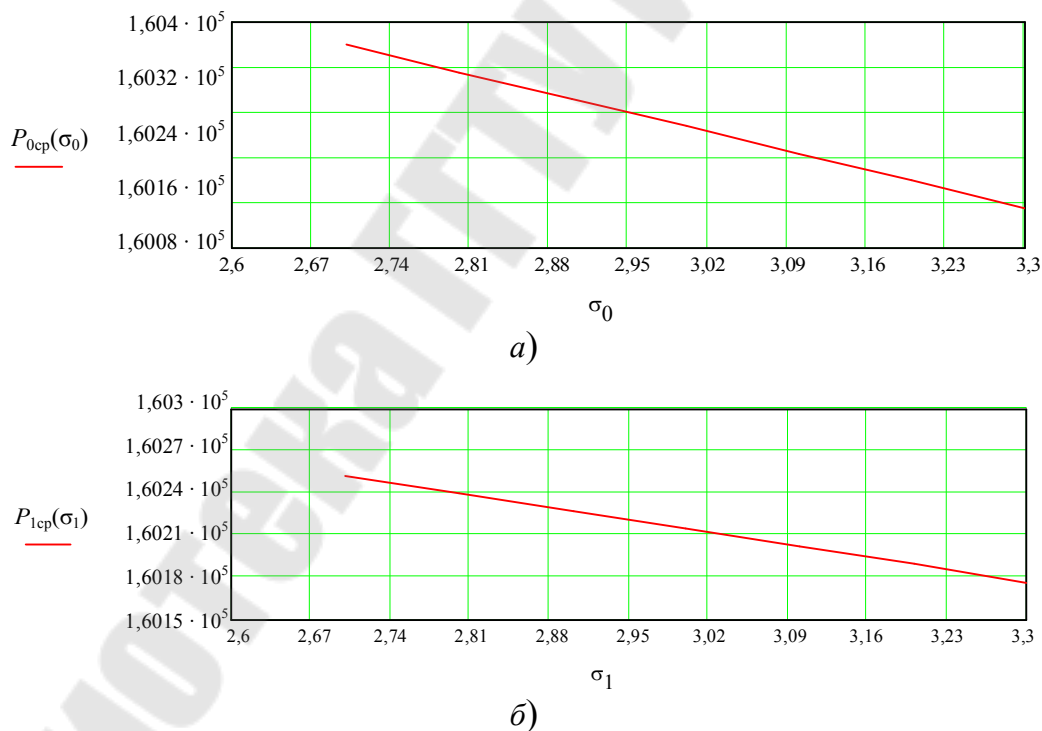


Рис. 7.4. Степень влияния заднего натяжения σ_0 (а) и переднего натяжения σ_1 (б) на усилие прокатки при их изменении на $\pm 10\%$ от номинального значения

Для построения зависимости влияния изменения конечной толщины полосы h_1 на усилие прокатки в пределах $\pm 10\%$ от номиналь-

ного значения поступаем аналогичным образом, как для параметров σ_0 и σ_1 . Длина зон варьирования $h_1 - [4,41; 5,39]$.

Усилия прокатки для опережения:

$$P(h_{x1}) = p_{cp}(h_{x1})F_k. \quad (7.16)$$

Здесь $p_{cp}(h_{x1})$ – среднее удельное давление в зоне опережения.

$$p_{cp}(h_{x1}) = \frac{\sigma_s}{\Delta h} \left[\xi_0 \cdot \frac{h_0}{(\delta - 2)} \cdot \left[\left(\frac{h_0}{h_H} \right)^{\delta - 2} - 1 \right] + \xi_1 \frac{h_1}{(\delta + 2)} \cdot \left[\left(\frac{h_H}{h_1} \right)^{\delta - 2} - 1 \right] \right]. \quad (7.17)$$

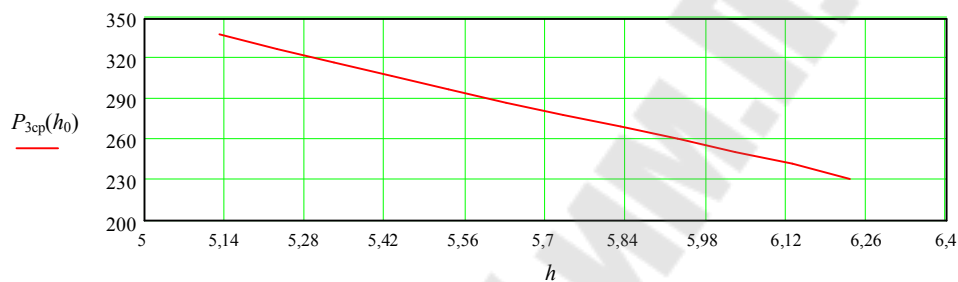


Рис. 7.5. Степень влияния толщины h_1 на усилие прокатки при его изменении на $\pm 10\%$ от номинального значения

8. Волочение круглого профиля

Анализ процесса волочения круглого профиля начинается с изучения схемы этого процесса и механической схемы деформации (схемы главных напряжений и деформаций), приведенных на рис. 8.1.

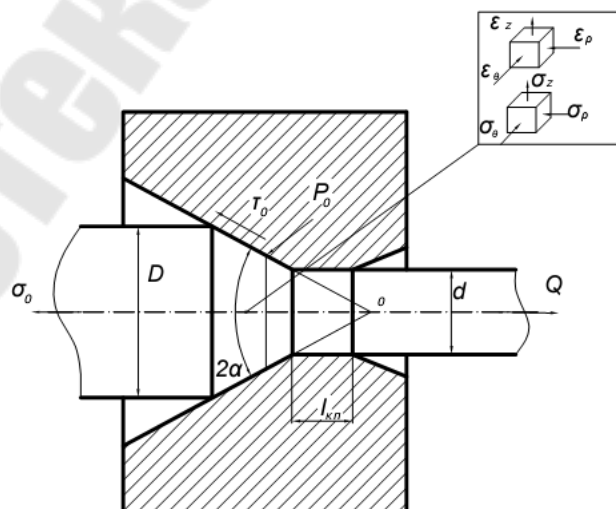


Рис. 8.1. Схема процесса волочения

Анализ процесса рассматривается на примере, исходные данные для которого следующие:

Исходный диаметр заготовки, мм	$D = 8$
Диаметр изделия, мм	$d = 7,6$
Длина калибрующего пояса, мм.....	$l_k = 7$
Напряжение заднего натяжения, МПа	$\sigma_0 = 10$
Температура обработки, °С.....	$T = 20$
Коэффициент контактного трения	$f = 0,1$
Материал.....	сталь 80

8.1. Определение сопротивления пластической деформации

Для данных варианта задания находим σ_s по зависимости (7.1) [1].

Для стали 80 имеем $\sigma_b = 1079$ МПа; $\sigma_T = 932$ МПа; $\psi_0 = 30\%$.

Относительное уменьшение площади поперечного сечения:

$$\psi = \frac{F_0 - F}{F_0} = \frac{D^2 - d^2}{D^2} = \frac{8^2 - 7,6^2}{8^2} = 9,75\%.$$

Подставив известные значения величин, входящих в (7.1), находим $\sigma_s = 1112$ МПа.

Среднее напряжение текучести:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_T + \sigma_s}{2} = 1022 \text{ МПа.}$$

8.2. Определение оптимального полуугла конуса волокна

Для определения оптимального полуугла конуса волокна, которое соответствует минимальному усилию волочения, необходимо в (8.1) для усилия волочения последовательно подставить значения угла α в диапазоне $[10^\circ; 90^\circ]$, разбив его на равные интервалы, после чего построить искомую кривую (рис. 8.2):

$$Q(\alpha) = \frac{\pi d^2}{4} \left\{ \sigma_{cp} \frac{b(\alpha)}{a(\alpha)} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^{2a(\alpha)} \right] + \sigma_0 \left(\frac{d}{D} \right)^{2a(\alpha)} \right\} \left(1 - \frac{4fl_k}{d} \right) + \sigma_s \frac{4fl_k}{d}, \quad (8.1)$$

где

$$a(\alpha) = \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \frac{\alpha}{2}} - 1; \quad b(\alpha) = \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}.$$

Из построенной кривой находим оптимальное значение угла $\alpha_{\text{оп}} = 19,5^\circ = 0,34$ рад. Оптимальным значением угла принимаем такую его величину, при которой на кривой линии графика имеется центр первого изгиба этой линии, а не минимальное усилие волочения. Это связано с отсутствием учета в (8.1) способности волокна к захвату смазки, которая возрастает с уменьшением угла. Для $\alpha_{\text{оп}}$ соответствует приблизительное значение усилия волочения $Q_{\text{оп}} = 23000$ Н.

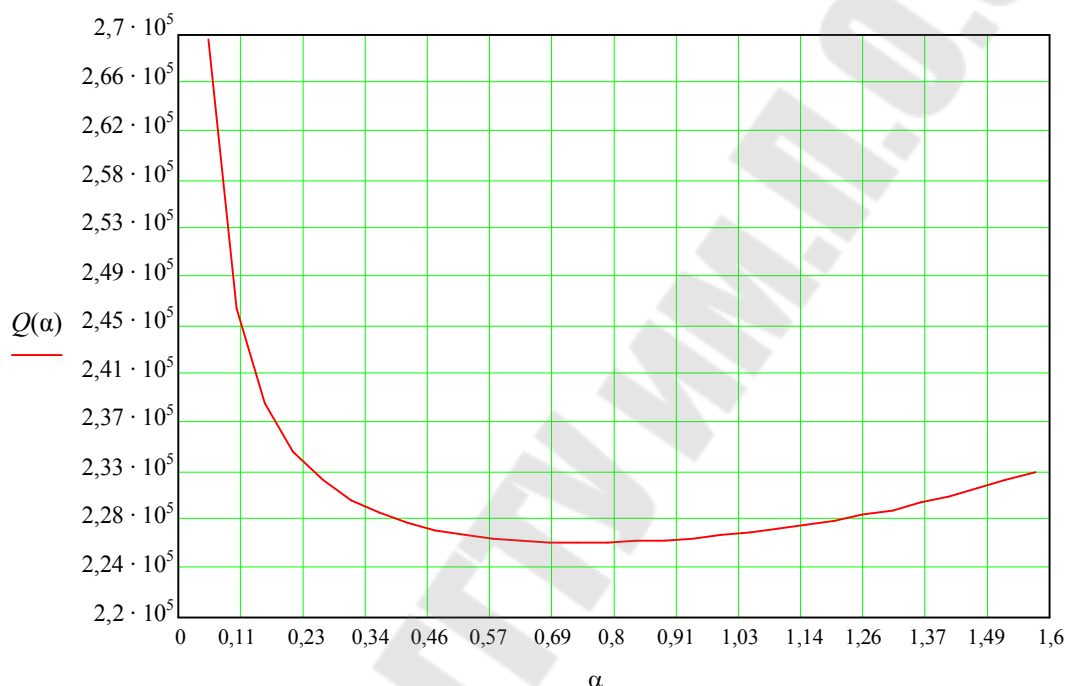


Рис. 8.2. Влияние полуугла волокна на усилие волочения

8.3. Определение распределения осевых напряжений вдоль очага деформации.

Подстановка в уравнение (8.2) значений диаметра d через равные промежутки позволяет найти осевое напряжение $\sigma_x(d_x)$ в соответствующей точке очага деформации, что позволяет построить зависимость σ_x от d , изменяемой в диапазоне $[d; D]$ или $[7,6; 8]$ (рис. 8.3).

$$Q(D) = \left\{ \sigma_{\text{сп}} \frac{b}{a} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^{2a} \right] + \sigma_0 \left(\frac{d}{D} \right)^{2a} \right\} \left(1 - \frac{4fl_{\text{KH}}}{d} \right) + \sigma_s \frac{4fl_{\text{KH}}}{d}. \quad (8.2)$$

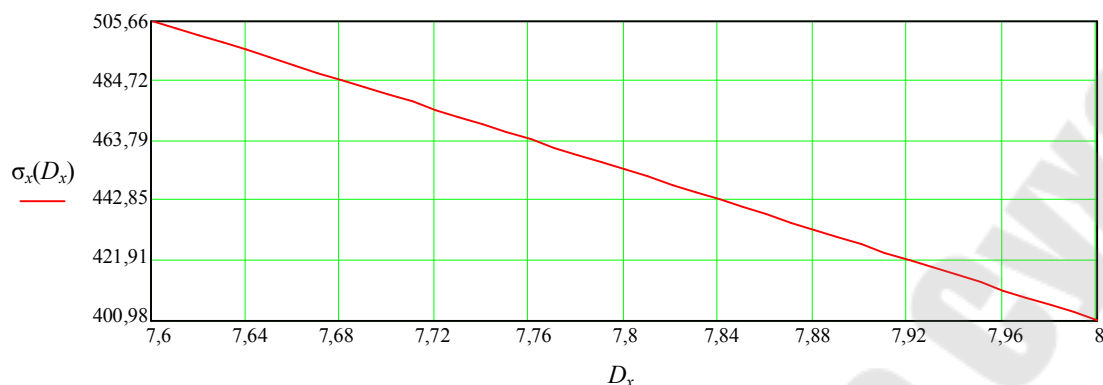


Рис. 8.3. Распределение осевых напряжений σ_x по длине очага деформации

8.4. Определение степени влияния изменения параметров d, l_k, σ_0 в пределах $\pm 10\%$ от их номинального значения на усилие волочения

Анализ влияния параметров d, l_k, σ_0 на усилие волочения ведем по выражению (8.1). Здесь $\alpha = \text{const}$. Значения σ_{cp} и σ_s определены ранее. Диапазон изменения параметров d, l_k, σ_0 находятся в пределах $\pm 10\%$ от номинального значения и составляет соответственно: $\sigma_0 - [9; 11]$ МПа, $l_{кн} - [6,3; 7,7]$ мм, $d - [7,52; 7,7]$ мм. Фиксируя два из трех параметров на уровне их номинального значения, строим соответствующий график, разбивая его диапазон на равные интервалы и определяя значения усилия волочения Q (рис. 8.4–8.6).

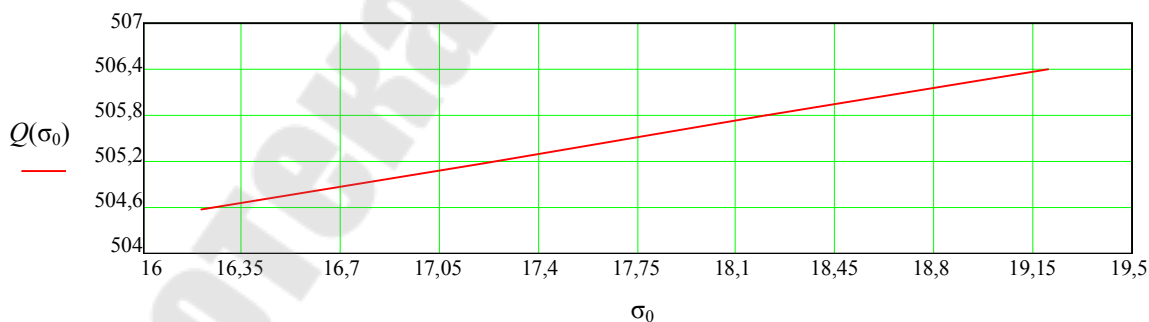


Рис. 8.4. Зависимость Q усилия волочения от σ_0 МПа при $l_k = \text{const}$, $d = \text{const}$, $\alpha = \alpha_{оп}$

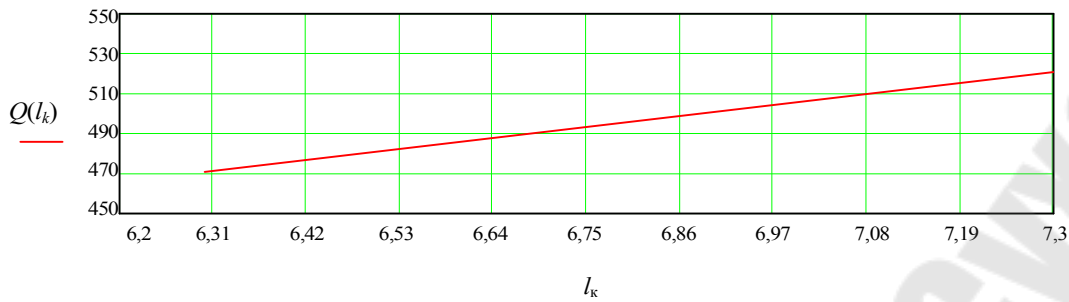


Рис. 8.5. Зависимость Q усилия волочения от l_k при $\sigma_0 = \text{const}$, $d = \text{const}$, $\alpha = \alpha_{\text{оп}}$

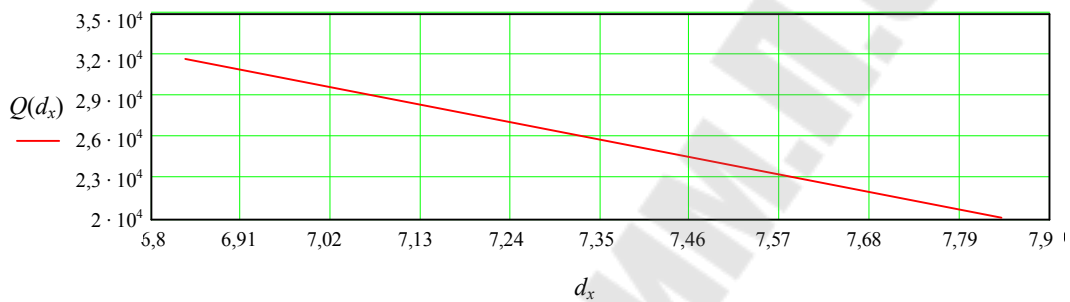


Рис. 8.6. Зависимость Q усилия волочения от d при $\sigma_0 = \text{const}$, $l_k = \text{const}$, $\alpha = \alpha_{\text{оп}}$

9. Раздача

Схема раздачи трубы внутренним давлением, создаваемым газом, жидкостью, другой средой представлена на рис. 9.1.

Анализ процесса рассматривается на примере, исходные данные для которого следующие:

Начальный внутренний радиус трубы, мм.... $r_1 = 8$

Начальный наружный радиус трубы, мм.... $r_2 = 10$

Температура обработки, °С..... $T = 20^\circ$

Материал трубы латунь Л80 имеет следующие характеристики:

– предел текучести $\sigma_s = 100 + 3(\varepsilon \cdot 100)^{0,7}$, МПа, где ε – степень деформации;

– предел прочности $\sigma_b = 125$ МПа.

Для расчета коэффициента напряженного состояния ψ_1 соответствующего началу пластической деформации всего сечения кольца, используется формула

$$\frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \exp \left[\sqrt{3} \left(\psi_1 - \frac{\pi}{2} \right) \right] \cdot \sin \left(\psi_1 - \frac{\pi}{6} \right). \quad (9.1)$$

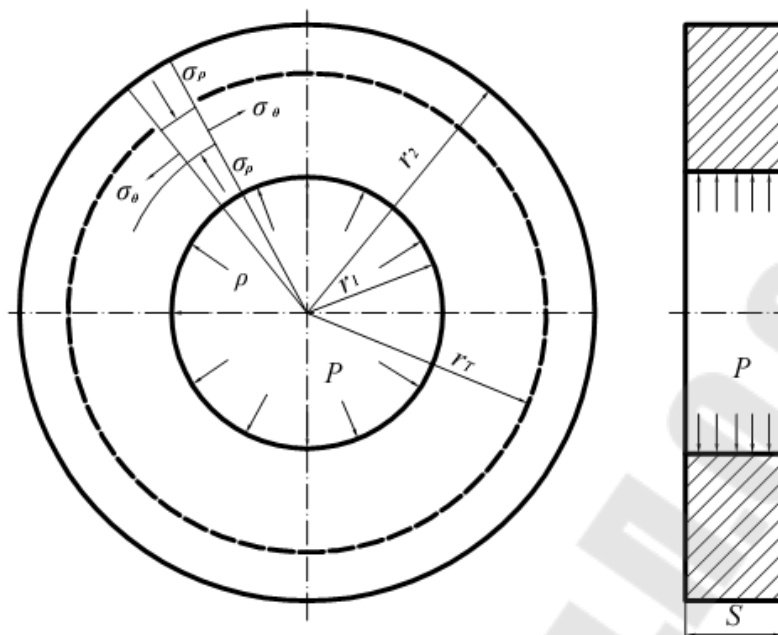


Рис. 9.1. Схема процесса раздачи

Для расчета необходимо использовать математические компьютерные программные пакеты, например, MathCad, MathLab, Mapl, Mathematica, позволяющие значительно упростить и ускорить расчет.

Для примерного расчета получаем:

$$\psi_1 = 1,775, \text{ рад.}$$

Далее рассчитывается величина требуемого внутреннего давления p , обеспечивающего раздачу трубы:

$$p = -\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \cdot \cos \psi_1; \quad (9.2)$$

$$p = -\frac{2}{\sqrt{3}} 100 \cdot \cos 1,775 = -23,43 \text{ МПа.}$$

Знак « \leftarrow » указывает на сжимающий характер внутреннего давления.

Далее определяется распределение радиальных напряжений в стенке трубы (рис. 9.2) в момент начала пластической деформации всего сечения кольца:

$$\sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \cos \psi, \quad (9.3)$$

где $\psi = \frac{\pi}{2} \dots \psi_1$ – диапазон изменения переменной величины.

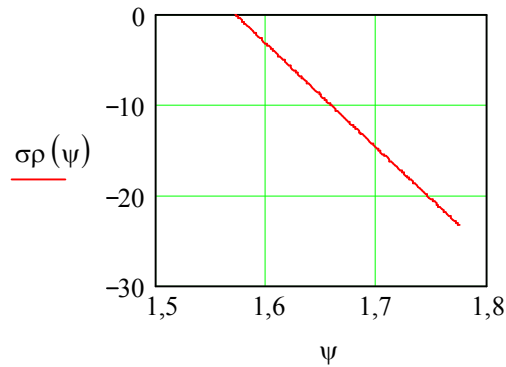


Рис. 9.2. Зависимость радиальных напряжений от коэффициента ψ в начале раздачи

Распределение тангенциальных напряжений в стенке трубы (рис. 9.3) вычислено по формуле

$$\sigma_{\theta} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T \cos\left(\psi - \frac{\pi}{3}\right). \quad (9.4)$$

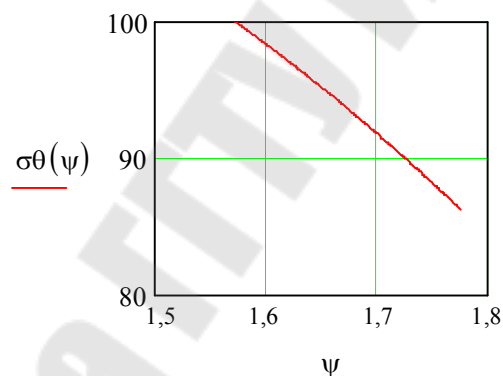


Рис. 9.3. Зависимость тангенциальных напряжений от коэффициента ψ в начале раздачи

Для определения максимально возможных радиусов трубы после раздачи вначале определяется максимально возможная степень деформации сечения трубы ε . Для этого предел текучести приравнивается к пределу прочности:

$$\sigma_b = \sigma_s(\varepsilon). \quad (9.5)$$

Функция $\sigma_s(\varepsilon)$ может иметь разный вид. Для холодной деформации, соответствующей примеру:

$$\sigma_b = \sigma_t + A(\varepsilon \cdot 100)^n; \quad (9.6)$$

$$125 = 100 + 3(\varepsilon \cdot 100)^{0,7}.$$

Из формулы (9.6) получено:

$$\varepsilon = 0,207.$$

Используя формулу для степени деформации внешнего диаметра трубы, определяется его максимальное значение после раздачи:

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{(R_2)^2}{(r_2)^2} \right). \quad (9.7)$$

Из (9.7) следует:

$$R_2 = 12,297.$$

Используя равенство площадей поперечных сечений трубы до и после деформации, вычисляется внутренний радиус трубы после деформации:

$$(R_2)^2 - (R_1)^2 = (r_2)^2 - (r_1)^2. \quad (9.8)$$

Из (9.8) следует:

$$R_1 = 10,773.$$

Далее, используя (9.1) применительно к радиусам $R_1 = 10,773$ и $R_2 = 12,297$, определяется $\psi_1 = 1,693$.

Затем, используя (9.3), получаем распределение радиальных напряжений в стенке трубы (рис. 9.3) в последний момент раздачи трубы, когда размеры диаметров трубы достигают максимума.

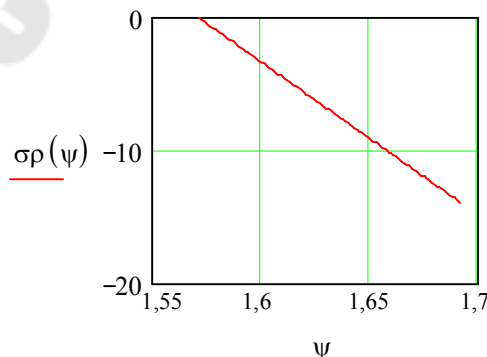


Рис. 9.4. Зависимость радиальных напряжений от коэффициента ψ в конце раздачи

Тангенциальные напряжения в стенке трубы в последний момент раздачи (рис. 9.5) вычисляются по формуле (9.4).

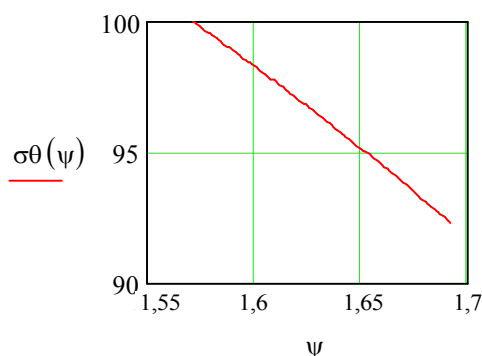


Рис. 9.5. Зависимость тангенциальных напряжений от коэффициента ψ в конце раздачи

10. Порядок решения задачи по анализу процессов обработки материалов давлением

1. Дать характеристику физико-механических и служебных свойств материала в состоянии поставки и при температуре обработки.
2. Указать тип кристаллической решетки.
3. Дать сведения о дефектах кристаллической решетки.
4. Привести механическую схему деформации анализируемого процесса ОМД.
5. Описать процессы, происходящие при деформации металла для конкретного процесса (упрочнение или разрушение).
6. Привести описание метода решения задачи по определению напряженного состояния и нахождения энергосиловых параметров анализируемого процесса (инженерный метод, метод баланса работ, метод верхней оценки, метод характеристик).

Аналитические формулы расчета режимов пластического деформирования металлов.

Энергия дислокации, приходящаяся на единицу ее длины:

$$\upsilon = \frac{Gb^2}{4\pi k} \ln \frac{r}{r_0} \approx \frac{1}{2} Gb^2, \quad (10.1)$$

где r – максимальное расстояние, на котором имеются напряжения, возбуждаемые дислокацией; r_0 – радиус ядра дислокации; $k=1$ для винтовой и $k=1-\mu$ – для краевой дислокации; μ – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига; b – вектор Бюргерса.

Связь модуля сдвига G с модулем нормальной упругости E :

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (10.2)$$

Минимальное касательное напряжение, необходимое для движения дислокации:

$$\tau_k = \frac{2G}{k} \exp\left(-\frac{2\pi a}{k b}\right). \quad (10.3)$$

где a – расстояние между смежными плоскостями скольжения.

Сила, действующая на дислокацию:

$$f = b\tau_{\max}. \quad (10.4)$$

Касательное напряжение, необходимое для сдвига в идеальном кристалле:

$$\tau = \frac{G b}{2\pi a} \sin \frac{2\pi x}{b}, \quad (10.5)$$

где x – смещение; a, b – параметры решетки.

$$\tau_{\max} \Big|_{x = \frac{b}{4}} = \frac{G b}{2\pi a}.$$

Деформация сдвига:

$$\gamma = \rho_d b l, \quad (10.6)$$

где ρ_d – плотность дислокаций; l – средняя длина смещения дислокаций.

Скорость деформации сдвига:

$$\dot{\gamma} = \rho_d b C_d, \quad (10.7)$$

где C_d – средняя скорость пробега дислокаций при ОМД.

$$C_d = \frac{c_1 \varepsilon (\varepsilon + 2)}{2l b \beta (\varepsilon + 1)}, \quad (10.8)$$

где $c_1 = V$ – скорость деформирования; ε – максимальная угловая деформация.

Длина пробега дислокации:

$$S = \frac{\varepsilon}{b \rho_d (\varepsilon + 1)}. \quad (10.9)$$

Максимальное скалывающее напряжение (источник Франка–Рида):

$$\tau_{\max} = \frac{Gb}{l_1}, \quad (10.10)$$

где l_1 – расстояние между дислокациями.

Напряжение от отдельной дислокации на расстоянии от ее оси:

$$\tau = \frac{Gb}{2\pi(1-\mu)r}, \quad (10.11)$$

где $r = \frac{1}{\sqrt{\rho_d}}$ – среднее расстояние между дислокациями.

Работа пластического формоизменения тела:

$$A_{\text{пол}} = C_v m \Delta t, \quad (10.12)$$

где C_v – удельная теплоемкость; m – масса; Δt – изменение температуры.

Нормальные и контактные напряжения на наклонной площадке:

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_y \sin^2 \alpha + 2\tau_{xy} \sin \alpha \cos \alpha; \\ \tau_n &= \tau_{xy} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) + (\sigma_y - \sigma_x) \sin \alpha \cos \alpha; \end{aligned} \quad (10.13)$$

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha; \\ \tau_n &= -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha. \end{aligned} \quad (10.14)$$

Напряжения на наклонной площадке:

$$\begin{aligned} p_x &= \sigma_x \cos(n^{\wedge} x) + \tau_{xy} \cos(n^{\wedge} y) + \tau_{xz} \cos(n^{\wedge} z); \\ p_y &= \tau_{yx} \cos(n^{\wedge} x) + \sigma_y \cos(n^{\wedge} y) + \tau_{yz} \cos(n^{\wedge} z); \\ p_z &= \tau_{zx} \cos(n^{\wedge} x) + \tau_{zy} \cos(n^{\wedge} y) + \sigma_z \cos(n^{\wedge} z). \end{aligned} \quad (10.15)$$

Нормальное напряжение на наклонной площадке:

$$\sigma_n = p_x \cos(n^{\wedge}) + p_y \cos(n^{\wedge} y) + p_z \cos(n^{\wedge} z). \quad (10.16)$$

Полное напряжение на наклонной площадке:

$$p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}. \quad (10.17)$$

Касательное напряжение на наклонной площадке:

$$\tau = \sqrt{p^2 - \sigma_n^2}. \quad (10.18)$$

Тензоры напряжений и деформаций в прямоугольной системе координат:

$$T_\sigma = \begin{vmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{vmatrix}; \quad T_\sigma = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}. \quad (10.19)$$

Разложение T_σ и T_ε :

$$T_\sigma = T_\sigma^0 + D_\sigma; \quad T_\varepsilon = T_\varepsilon^0 + D_\varepsilon, \quad (10.20)$$

где T_σ , T_ε – шаровые тензоры напряжений и деформации соответственно; D_σ , D_ε – девиаторы напряжений и деформации соответственно.

Зависимость между деформациями и напряжениями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - 0,5(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - 0,5(\sigma_x + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - 0,5(\sigma_x + \sigma_y)]. \end{aligned} \quad (10.21)$$

Главные напряжения для плоской задачи:

$$\begin{aligned} \sigma_{12} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}; \\ \sigma_{13} &= \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2}; \\ \sigma_{23} &= \frac{\sigma_y + \sigma_z}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + 4\tau_{yz}^2}. \end{aligned} \quad (10.22)$$

Минимальные касательные напряжения:

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}; \quad \tau_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}; \quad \tau_{31} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2};$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \quad (10.23)$$

Октаэдрические напряжения:

– нормальные:

$$\sigma_0 = \sigma_n = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) = \sigma_{\text{ср}}; \quad (10.24)$$

– касательные:

$$\tau_0 = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} =$$

$$= \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}. \quad (10.25)$$

Инварианты тензора напряжений:

$$i_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z;$$

$$i_2 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xz} \\ \tau_{zx} & \sigma_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix};$$

$$i_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}. \quad (10.26)$$

Эллипсоид напряжений:

$$\frac{S_1^2}{\sigma_1^2} + \frac{S_2^2}{\sigma_2^2} + \frac{S_3^2}{\sigma_3^2} = 1, \quad (10.27)$$

где S_i – компоненты полного напряжения на наклонной площадке.

Интенсивность касательных напряжений:

$$\tau_i = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (10.28)$$

Уравнения Коши в прямоугольной системе координат:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial U_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial U_z}{\partial z}; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial x}; \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial y}; \\ \gamma_{zx} &= \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial z}.\end{aligned}\quad (10.29)$$

где U_x, U_y, U_z – проекции перемещения точки по осям координат.

Уравнение Коши в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned}\varepsilon_\rho &= \frac{\partial U_\rho}{\partial \rho}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{U_\rho}{\rho}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial U_z}{\partial z}; \\ \gamma_{\rho z} &= \frac{\partial U_z}{\partial \rho} + \frac{\partial U_\rho}{\partial z}.\end{aligned}\quad (10.30)$$

Интенсивность деформаций сдвига:

$$\gamma_i = \sqrt{\frac{2}{3} \left[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right]}.\quad (10.31)$$

Интенсивность деформации:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}.\quad (10.32)$$

Главные деформации для плоской задачи:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{12} &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}; \\ \varepsilon_{23} &= \frac{\varepsilon_y + \varepsilon_z}{2} \pm \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + \gamma_{yz}^2}; \\ \varepsilon_{31} &= \frac{\varepsilon_z + \varepsilon_x}{2} \pm \sqrt{(\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + \gamma_{zx}^2}.\end{aligned}\quad (10.33)$$

Условие пластичности для главной системы координат по энергетической теории:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_s; \quad (10.34)$$

$$\tau_0 = \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_s;$$

$$\tau_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s;$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s = 0,575 \sigma_s;$$

$$\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2 = \frac{1}{2} \sigma_s^2. \quad (10.35)$$

Условие пластичности в произвольной системе координат по энергетической теории:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2\sigma_s^2. \quad (10.36)$$

Частные выражения условия пластичности:

– плоское напряженное состояние:

$$\sigma_y = \tau_{xy} = \tau_{zy} = 0;$$

$$(\sigma_x - \sigma_z)^2 + \sigma_x^2 + \sigma_z^2 + 6\tau_{xz}^2 = 2\sigma_s^2;$$

$$\sigma_x^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_z + 3\tau_{xz}^2 = \sigma_s^2;$$

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_3 = \sigma_s^2; \quad (10.37)$$

– плоское деформированное состояние:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}; \quad \tau_{xy} = \tau_{zy} = 0;$$

$$(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2 = \frac{4}{3} \sigma_s^2;$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s = \pm \sigma_s^2 = \pm 2k;$$

$$\tau_{13} = \pm \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s = \pm \frac{1}{2} \sigma_s^* = \pm k. \quad (10.38)$$

Приближенное условие пластичности:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \pm \beta \sigma_s, \quad (10.39)$$

где β – коэффициент Лодэ, $\beta = \frac{2}{\sqrt{3 + \nu_\sigma^2}}$; ν_σ – показатель вида напряженного состояния:

$$\nu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (10.40)$$

Связь напряжений и деформаций при пластическом формоизменении:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} = 2G', \quad (10.41)$$

где G' – модуль деформации 2-го рода.

Показатель вида деформационного состояния:

$$\nu_\varepsilon = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}; \quad \nu_\sigma = \nu_\varepsilon; \quad \nu_\varepsilon = -3 \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}. \quad (10.42)$$

Связь касательных напряжений и сдвиговых деформаций:

$$\tau_{xy} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \gamma_{xy}; \quad \tau_{yz} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \gamma_{yz}; \quad \tau_{zx} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \gamma_{zx}. \quad (10.43)$$

Уравнение для определения главных нормальных напряжений через известный тензор напряжений:

$$\sigma^3 - i_1 \sigma^2 + i_2 \sigma - i_3 = 0. \quad (10.44)$$

Контактная задача Герца: половина ширины площадки двух прижатых друг к другу цилиндров:

$$a = \sqrt{\frac{4R_1 R_2}{\pi(R_1 + R_2)} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} - \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}. \quad (10.45)$$

Длина контактной поверхности при прокатке с учетом упругого смятия стальных валков:

$$l = \frac{p_{cp}R}{9,3 \cdot 10^4} + \sqrt{R\Delta h + \left(\frac{p_{cp}R}{9,3 \cdot 10^4}\right)^2}, \quad (10.46)$$

где R – радиус валков; Δh – абсолютное обжатие; p_{cp} – среднее контактное напряжение в МН/м².

Поле напряжений краевой дислокации:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{Gb}{2\pi(1-\mu)} \frac{y(3x^2 + y^2)}{x^2 + y^2}, \\ \sigma_y &= \frac{Gb}{2\pi(1-\mu)} \frac{y(x^2 - y^2)}{x^2 + y^2}, \\ \tau_{xy} &= \frac{Gb}{2\pi(1-\mu)} \frac{x(x^2 - y^2)}{x^2 + y^2}. \end{aligned} \quad (10.47)$$

Поле напряжений винтовой дислокации:

$$\tau_{xy} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2}; \quad \tau_{yz} = \frac{Gb}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2}. \quad (10.48)$$

Компоненты тензора напряжений в обычных осях через компоненты тензора в главных осях (метод линий скольжения):

$$\sigma_x = \sigma + k \cos 2\varphi; \quad \sigma_y = \sigma - k \cos 2\varphi; \quad \tau_{xy} = k \sin 2\varphi, \quad (10.49)$$

где σ – среднее напряжение; φ – угол между осью x и главной осью 1;

$$k = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s.$$

Изменение среднего напряжения при переходе вдоль линии скольжения от точки a к точке b на угол ω_{ab} :

$$\sigma_a = \sigma_b \pm 2k\omega_{ab}. \quad (10.50)$$

Контактные напряжения при внедрении пуансона в пластическое полупространство:

$$\sigma_y = -2k(1 + \omega_{ab}). \quad (10.51)$$

Момент и напряжения при чистом изгибе прямоугольного бруса:

$$M = \sigma_s \frac{bh^2}{2(n+2)} \left(\frac{h}{h_s}\right)^n; \quad (10.52)$$

$$\sigma_x = \pm \sigma_s \left(\frac{2y}{h_s} \right)^n, \quad (10.53)$$

где σ_s – предел текучести; b – ширина бруса; h – высота бруса; h_s – высота упругой зоны бруса; y – расстояние от нейтрального сечения; $0 \leq n \leq 1$ – коэффициент упрочнения.

Критический размер трещины по Гриффитсу:

$$h_r = \frac{\gamma E}{2\sigma^2}, \quad (10.54)$$

где γ – удельная поверхностная энергия; E – модуль упругости; σ – напряжение в вершине трещины.

Показатель поперечной деформации:

$$A = \frac{\ln \beta}{\ln \frac{1}{\eta}}, \quad (10.55)$$

где $\beta = \frac{b_1}{b_0}$; $\frac{1}{\eta} = \frac{h_0}{h_1}$.

Показатель уширения:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{b_0}{h_0} \frac{1}{\varepsilon} \left[\left(\frac{1}{1-\varepsilon} \right)^A - 1 \right] \approx \frac{b_0}{h_0} A. \quad (10.56)$$

Формула С. И. Губкина для расчета уширения при $0 \leq \frac{b_0}{h_0} \leq 1$:

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \frac{b_0}{h_0} \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) \left(f \sqrt{\frac{\Delta h}{h_0} \frac{D}{h_0}} - \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h_0} \right) \text{ при } \frac{b_0}{h_0} > 1; \quad (10.57)$$

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \left(1 + \frac{\Delta h}{h_0} \right) \left(f \sqrt{\frac{\Delta h}{h_0} \frac{D}{h_0}} - \frac{1}{2} \frac{\Delta h}{h_0} \right).$$

Момент прокатки по гладкой бочке:

$$M_{\text{дв}} = M_{\text{пр}} + M_{\text{тр}} + M_{\text{хх}} + M_{\text{дин}}. \quad (10.58)$$

Здесь $M_{\text{пр}}$ – момент прокатки.

$$M_{\text{тр}} = 2p\psi\sqrt{0,5\Delta hD}, \quad (10.59)$$

где p – суммарное давление на валки; ψ – коэффициент плеча ($\psi = 0,16 + 0,000267T$); $M_{\text{тр}}$ – момент на преодоление сил трения в подшипниках валков стана.

$$M_{\text{тр}} = qp \frac{d}{2} f, \quad (10.60)$$

где q – число валков; d – диаметр шеек прокатных валков; f – коэффициент трения в подшипниках.

$M_{\text{хх}}$ – суммарный момент холостого хода, приведенный к валу двигателя, требующийся для вращения n деталей.

$$M_{\text{хх}} = \sum_{i=1}^n \frac{G_n f_n d_n}{2i_n}, \quad (10.61)$$

где G_n – масса данной детали; f_n – коэффициент трения в подшипниках; d_n – диаметр цапф; i_n – передаточное число между двигателем и данной деталью.

$M_{\text{дин}}$ – динамический момент, если валки вращаются неравномерно.

$$M_{\text{дин}} = \frac{GD^2}{384} \frac{d_n}{dt}, \quad (10.62)$$

где G – масса вращающихся частей стана; D – приведенный диаметр; n – число оборотов двигателя в минуту; t – время.

Мощность двигателя:

$$N = M_{\text{дв}} \cdot \omega. \quad (10.63)$$

Условие свободного вращения и втягивания заготовки при захвате (винтовая прокатка):

$$\frac{b}{d} \leq \frac{\sqrt{f^2 - \sin^2 \alpha_1 \cos \beta}}{1 + \frac{d}{D}}, \quad (10.64)$$

где α_1 – угол наклона образующей конуса валка к его оси, на участке захвата; β – угол подачи – угол наклона оси валка к оси заготовки.

Скорости поступательного и вращательного движения заготовки:

$$V_{\text{пос}} = \eta_0 V \sin \beta; \quad V_{\text{вр}} = \eta_T V \cos \beta, \quad (10.65)$$

где V – окружная скорость данной точки валка; $\eta_T = 0,90 - 1,05$ – коэффициент тангенциального скольжения; η_0 – коэффициент осевого скольжения.

$$\eta_0 = 0,125 \left(1 + \frac{d_3}{D_B} \right) \frac{\varepsilon}{f\beta}. \quad (10.66)$$

Шаг подачи заготовки:

$$S = \pi \frac{\eta_0}{\eta_T} \frac{D_B F_{\text{заг}}}{DF} \frac{d_3}{2} \operatorname{tg} \beta, \quad (10.67)$$

где D, D_B – диаметр валка в любом сечении и исходный его диаметр; $F_{\text{заг}}, F$ – площадь поперечного сечения заготовки в плоскости, проходящей через носок оправки, и в любом сечении.

Литература

1. Верещагин, М. Н. Пластическая деформация материалов : практ. пособие по выполнению курсовой работы по дисциплине «Теория обработки материалов давлением» для студентов специализаций Т.02.02.02; Т.02.02.07; Т.02.01.04 / М. Н. Верещагин, Ю. Л. Бобаринкин. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2003.

Содержание

Предисловие	3
1. Открытая прошивка	4
1.1. Определение распределения нормальных контактных напряжений на торце прошивня	5
1.2. Определение зависимости давления прошивки от перемещения прошивня	6
1.3. Определение зависимости удельного давления прошивки в конце прошивки от отношения D/d	7
2. Осадка	8
2.1. Осадка прямоугольной полосы неограниченной длины	8
2.2. Осадка цилиндра и полосы конечной длины	15
2.3. Распределение нормальных контактных напряжений и удельное давление осадки при степени деформации $\varepsilon = 5\%$	17
2.4. Распределение нормальных контактных напряжений и удельное давление осадки при степени деформации $\varepsilon = 45\%$	19
2.5. Распределение нормальных контактных напряжений и удельное давление осадки при степени деформации $\varepsilon = 75\%$	20
3. Листовая вытяжка	22
3.1. Определение радиальных напряжения в опасном сечении	23
3.2. Определение усилия прижима	24
3.3. Распределение контактных напряжений на прижиме	24
3.4. Определение зависимости усилия вытяжки от хода пуансона	25
4. Прямое выдавливание	26
4.1. Определение оптимального угла конуса матрицы	27
4.2. Определение степени влияния параметров d и $l_{кп}$ в пределах $\pm 10\%$ от их номинального значения	29
4.3. Определение зависимости удельного давления выдавливания от перемещения пуансона	31
5. Объемная штамповка	31
5.1. Определение оптимальной высоты мостика заусенечной канавки	35
5.2. Распределение нормальных напряжений на участке мостика облойной канавки и в полости штампа	37
5.3. Определение зависимости усилия деформирования от отношения $\frac{S}{h_3}$	37
6. Закрытая прошивка	38

6.1. Определение размеров поковки после прошивки и сопротивления пластической деформации	39
6.2. Распределение нормальных напряжений на торце прошивня.....	41
6.3. Определение зависимости давления прошивки от перемещения прошивня	42
6.4. Определение зависимости давления прошивки от отношения D/d	44
7. Прокатка.....	44
7.1. Определение сопротивления пластической деформации.....	45
7.2. Определение распределения нормальных и касательных контактных напряжений в очаге деформации	46
7.3. Определение степени влияния изменения параметров h, σ_0, σ_1 на усилие прокатки.....	48
8. Волочение круглого профиля	50
8.1. Определение сопротивления пластической деформации.....	51
8.2. Определение оптимального полуугла конуса волокна.....	51
8.3. Определение распределения осевых напряжений вдоль очага деформации.	52
8.4. Определение степени влияния изменения параметров d, l_k, σ_0 в пределах $\pm 10\%$ от их номинального значения на усилие волочения.....	53
9. Раздача.....	54
10. Порядок решения задачи по анализу процессов обработки материалов давлением	58
Литература	70

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Верещагин Михаил Николаевич
Бобарикин Юрий Леонидович**

ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

**к курсовой работе по одноименной дисциплине
для студентов специальностей 1-36 20 02
«Упаковочное производство (по направлениям)»,
1-36 01 05 «Машины и технология обработки
материалов давлением», 1-42 01 01 «Металлургическое
производство и материалобработка (по направлениям)»
специализации 1-42 01 01-02 01 «Обработка металлов
давлением» дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *Н. В. Гладкова*
Компьютерная верстка *М. В. Аникеенко*

Подписано в печать 27.04.10.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 4,42. Уч.-изд. л. 4,14.

Изд. № 180.

E-mail: ic@gstu.by

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».
ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.