

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

Методические указания к курсовому и дипломному проектированию
по дисциплинам «Теория обработки металлов давлением» и
«Технологические процессы обработки металлов давлением»
специальности 150106 – Обработка металлов давлением,
бакалавров и магистров по направлению «Металлургия»
для студентов всех форм обучения

Екатеринбург
УрФУ
2010

БИБЛИОТЕКА
филиала УГТУ-УПИ
г. В. Салда

2956/20

УДК 539.41: 621.77 (075.8)

Составители: Н. А. Бабайлов, С. П. Буркин
Научный редактор – канд. техн. наук доц. Ю. В. Инатович

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ: методические указания к курсовому и дипломному проектированию / сост. Н. А. Бабайлов, С. П. Буркин. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. 60 с.

Приведены данные по сопротивлению деформации черных и цветных металлов и сплавов. Описаны методы расчета сопротивления деформации при холодной и горячей пластической деформации в различных технологических процессах обработки металлов давлением. Приведены варианты заданий для выполнения практических занятий и для самостоятельной работы.

Методические указания предназначены для студентов специальности 150106 – Обработка металлов давлением, а также для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Металлургия», рекомендуются для использования при выполнении практических и лабораторных занятий, при выполнении курсовых и дипломных проектов, а также курсовых научно-исследовательских работ.

Библиогр.: 14 назв. Табл. 21. Рис. 22. Прил. 3.

Подготовлено кафедрой «Обработка металлов давлением».

© УрФУ, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ.....	4
2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ.....	7
2.1. Методы определения сопротивления деформации	7
2.2. Методика построения диаграммы «истинные напряжения – истинные деформации»	8
3. СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ОМД	11
3.1. Сопротивление деформации при холодной пластической деформации	11
3.2. Сопротивление деформации при высокой температуре	12
3.3. Метод термомеханических коэффициентов	14
3.4. Учет разупрочнения при горячей пластической деформации	16
3.5. Сопротивление деформации деталей сложной формы и многослойных материалов	19
3.6. Сопротивление деформации некомпактных материалов	21
4. АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	24
4.1. Метод наименьших квадратов	24
4.2. Метод средних	25
4.3. Квадратичная регрессия	26
5. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ	31
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	55
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ.....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ЛИНЕАРИЗУЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ..	58
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ИНДИКАТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ	59

ВВЕДЕНИЕ

Сопротивление деформации σ_S в теории ОМД играет очень важную роль. С одной стороны, сопротивление деформации представлено в условиях пластичности:

- Треска – Сен-Венана – $\sigma_{11} - \sigma_{33} = (1 - 1,155)\sigma_S$;

- Мизеса – Губера –

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 = 2\sigma_S^2.$$

С другой стороны, используя сопротивление деформации, определяются энергосиловые параметры деформирования в процессах ОМД: сила деформации, работа и мощность деформации.

Значительный вклад в исследование зависимостей σ_S от технологических параметров деформирования внесли А. Надаи и М. Менджойн, Л. И. Соколов, А. П. Чекмарев и З. А. Риднер, П. Кук, М. А. Зайков, А. А. Динник, И. Я. Тарновский с сотрудниками, А. В. Третьяков и В. И. Зюзин, М. Я. Бровман и др. [1 – 10].

1. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ

Сопротивление металла пластической деформации (σ_S) – напряжение одноосного растяжения или сжатия в условиях развитой пластической деформации.

Кривые упрочнения (кривые текучести) – зависимости сопротивления деформации $\sigma_S = \sigma_S(\varepsilon, \xi, \theta, \varepsilon(t))^*$ от

* «Инженерная» зависимость $\sigma_S = \sigma_S(\varepsilon, \xi, \theta, \varepsilon(t))$ всегда может быть представлена в инвариантной форме: $T = T(\Lambda, N, \theta, \Lambda(t))$, где $T = \sigma_S / \sqrt{3}$ и $N = \sqrt{3} \xi$ – интенсивности касательных напряжений и скоростей деформации; $\Lambda = \sqrt{3} \varepsilon$ – степень деформации сдвига.

технологических параметров деформирования: степени ε , скорости ξ и температуры деформации θ , а также пути нагружения $\varepsilon(t)$.

Факторы, влияющие на сопротивление деформации: химический состав сплава; кристаллическая структура металла; фазовый состав; исходная структура (литая или деформированная); величина зерна; место и направление вырезки образцов для испытания; метод изготовления образцов; метод испытания образцов; масштабный фактор и др.

Степень деформации (относительное обжатие ε или логарифмическая степень деформации $\bar{\varepsilon}$) в процессах ОМД оценивается по формулам:

- при прокатке, ковке и штамповке –

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} 100\%; \quad \bar{\varepsilon} = \ln\left(\frac{h_0}{h_K}\right); \quad (1.1)$$

- в процессах волочения, прессования –

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{или} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} 100\%; \quad \bar{\varepsilon} = \ln(l_K/l_0), \quad (1.2)$$

где $\Delta h = h_0 - h_K$ и $\Delta l = l_K - l_0$ – абсолютные обжатие и удлинение заготовки соответственно;

h_0, l_0 и F_0 – высота, длина и площадь поперечного сечения заготовки до деформации;

h_K, l_K и F_K – высота, длина и площадь поперечного сечения заготовки после деформации (величины l_0, l_K, F_0 и F_K связаны условием постоянства объема $F_0 l_0 = F_K l_K$).

В литературе величину ε называют «инженерной» деформацией, а величину $\bar{\varepsilon}$ – «истинной» деформацией, т.к. суммарная степень деформации в последнем случае равна сумме единичных деформаций:

$$\bar{\varepsilon}_\Sigma = \bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2 + \dots = \sum_{i=1}^n \bar{\varepsilon}_i, \quad (1.3)$$

где n – число ступеней (проходов) обжатий заготовки.

Пример 1.1. Определить единичную (по переходам) степень деформации и суммарную степень деформации при осадке

цилиндрической заготовки высотой $h_0=200$ мм за два перехода до $h_1=150$ мм и $h_2=120$ мм. Сравнить значения суммарной степени деформации ε_Σ и $\bar{\varepsilon}_\Sigma$.

$$\varepsilon_1 = \Delta h_1 / h_0 = (200-150)/200=0,25; \quad \varepsilon_2 = \Delta h_2 / h_1 = (150-120)/150=0,2;$$

$$\varepsilon_\Sigma = \Delta h_\Sigma / h_0 = (200-120)/200=0,4.$$

Следует обратить внимание, что $\varepsilon_\Sigma \neq \varepsilon_1 + \varepsilon_2$.

$$\bar{\varepsilon}_1 = \ln(h_0/h_1)=0,288; \quad \bar{\varepsilon}_2 = \ln(h_1/h_2)=0,223;$$

$$\bar{\varepsilon}_\Sigma = \ln\left(\frac{h_0}{h_2}\right) = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) + \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) = \bar{\varepsilon}_1 + \bar{\varepsilon}_2 = 0,511.$$

Скорость деформации в общем случае: $\xi = \dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$. При определении сопротивления деформации часто пользуются средней по очагу деформации скорости деформации $\xi_{\text{ср}}$ (см. прил. 1).

Большинство процессов ОМД характеризуется сложными законами развития деформации во времени t . Скорость деформации может резко изменяться, а при периодическом нагружении в паузах происходит либо полная разгрузка (реверсивная прокатка, ковка, штамповка), либо частичная (непрерывная прокатка с натяжением). Сопротивление деформации в данный момент времени зависит от «истории нагружения», т.е. от того, как развивалась деформация во времени. Поэтому говорят, что сопротивление деформации σ_S – не функция, а функционал, т.е. число, зависящее от функции $\varepsilon(t)$, описывающей историю развития деформации.

В стационарных процессах ОМД (прокатка, волочение и др.) приходится определять среднее сопротивление деформации по длине очага деформации:

$$\sigma_{\text{ср}} = (\sigma_{S0} + \sigma_{S1})/2, \quad (1.4)$$

или

$$\sigma_{\text{ср}} = (F_0\sigma_{S0} + F_K\sigma_{S1})/(F_0 + F_K), \quad (1.5)$$

где σ_{S0} и σ_{S1} – сопротивление деформации в сечении входа и выхода из очага деформации соответственно.

Пример 1.2. Определить среднее сопротивление деформации по формулам (1.4) и (1.5) при волочении отожженной медной проволоки диаметром $d_0=10$ мм с вытяжкой $\lambda = F_0/F_K=1,225$.

Здесь $F_0=314,16$ мм², $F_K=256,46$ мм², а $\bar{\varepsilon} = \ln(\lambda)=0,2$.

По рис. 3.1 определяем сопротивление деформации: $\sigma_{S0}=100$ МПа; $\sigma_{S1}=250$ МПа. Среднее сопротивление деформации по формуле (1.4): $\sigma_{\text{ср}}=(100+250)/2=175$ МПа; а по формуле (1.5) – $\sigma_{\text{ср}}=167,4$ МПа.

В справочной литературе часто приводятся данные по среднему сопротивлению деформации $\sigma_{\text{ср}} = f(\bar{\varepsilon})^*$, например в работах [3, 4], где

$$\sigma_{\text{ср}} = \left(\int_0^{\bar{\varepsilon}} \sigma_S(\varepsilon) d\varepsilon \right) / \bar{\varepsilon}. \quad (1.6)$$

2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ

2.1. Методы определения сопротивления деформации

Сопротивление деформации определяется при стандартных испытаниях: на *растяжение* (цилиндрических и плоских образцов), *сжатие* (цилиндрических образцов), а также *кручение* (сплошных и полых цилиндрических образцов). Испытания проводятся на универсальных испытательных машинах и пластометрах. Предполагается, что сопротивление деформации можно определить в простейших опытах (осадка, растяжение, кручение), а результаты опыта распространить на любое сложное напряженно-деформированное состояние («гипотеза единой кривой»).

* В этом случае при расчетах усреднения сопротивления деформации по очагу деформации не требуется.

В процессе испытания образцов записываются индикаторные диаграммы: $P = f(\Delta l)$ – при растяжении (рис. 2.1) или $P = f(\Delta h)$ – при осадке.

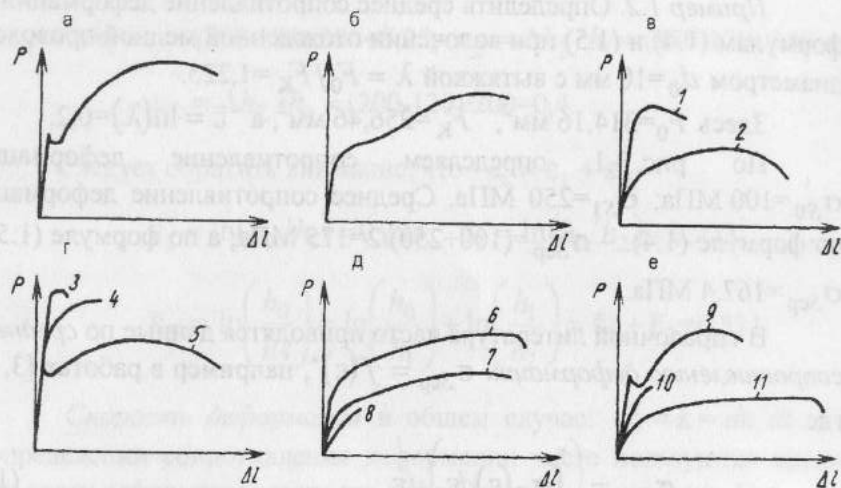


Рис. 2.1. Типовые диаграммы растяжения: а – углеродистая сталь; б – аустенитная сталь; в – медь холоднодеформированная (1) и рекристаллизационная (2); г – углеродистая закаленная сталь (3); улучшенная (4) и отожженная (5); д – чугун с шаровидным графитом (6); с пластинчатым графитом (7); ферритный ковкий чугун (8); е – высокоуглеродистая сталь (9); серый чугун (10); алюминий (11)

2.2. Методика построения диаграммы «истинные напряжения – истинные деформации»

Методика построения диаграммы «истинные напряжения – истинные деформации» $\sigma_u = \sigma_u(\bar{\epsilon})$ по индикаторной диаграмме (при испытании цилиндрического образца) включает следующие этапы:

2.2.1. Определение суммарной абсолютной деформации заготовки:

$$\Delta h_{\Sigma} = h_K - h_0 \quad \text{или} \quad \Delta l_{\Sigma} = l_0 - l_K. \quad (2.1)$$

2.2.2. Определение начала координат на диаграмме с учетом участка упругой деформации механизмов испытательной машины.

2.2.3. Деление оси абсцисс x на n участков ($\sum_{i=1}^n \Delta h_i = \Delta h_{\Sigma}$ или $\sum_{i=1}^n \Delta l_i = \Delta l_{\Sigma}$).

2.2.4. Определение масштаба перемещений:

$$K_M = \Delta h_{\Sigma(\text{диагр})} / \Delta h_{\Sigma} \quad \text{или} \quad K_M = \Delta l_{\Sigma(\text{диагр})} / \Delta l_{\Sigma}. \quad (2.2)$$

2.2.5. Определение по диаграмме значений перемещений x_i и вычисление Δh_i (или Δl_i) по формулам

$$\Delta h_i = x_i / K_M \quad \text{или} \quad \Delta l_i = x_i / K_M. \quad (2.3)$$

2.2.6. Определение текущих размеров образца (для равномерной деформации образца):

- высоты (длины) – $h_i = h_0 - \Delta h_i$ или $l_i = l_0 + \Delta l_i$; (2.4)

- диаметра – $D_i = D_0 \sqrt{h_0 / h_i}$ или $D_i = D_0 \sqrt{l_0 / l_i}$; (2.5)

- площади поперечного сечения – $F_i = \pi D_i^2 / 4$. (2.6)

2.2.7. Определение текущей силы деформирования P_i , мм.

2.2.8. Определение силы P_i в Ньютонах (по тарировочному графику).

2.2.9. Определение истинных напряжений при осадке по формулам:

- С. И. Губкина, Е. Зибеля ($\bar{\epsilon} = 0,6 - 0,8$) –
$$\sigma_u = P_i / F_i \left[1 + \frac{1}{3} \mu(D_i, h_i) \right]; \quad (2.7)$$

• А. Ф. Головина (для $\bar{\epsilon}=0,6 - 0,8$) -

$$\sigma_{и} = P_i / F_i \left[0,315\mu \frac{D_i}{h_i} + \sqrt{1 + \left(0,315\mu \frac{D_i}{h_i} \right)^2} \right]; \quad (2.8)$$

• Е. П. Унксова - $\sigma_{и} = P_i / F_0 e^{\bar{\epsilon}} \left[1 + 0,17 e^{1,5\bar{\epsilon}} \left(\frac{D_0}{h_0} \right) \right]. \quad (2.9)$

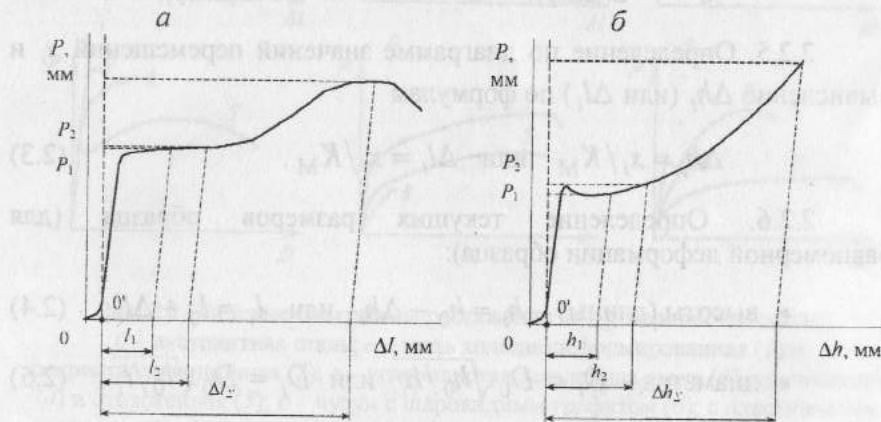


Рис. 2.2. Обработка индикаторных диаграмм: а - растяжения; б - сжатия

2.2.10. Определение истинных напряжений при растяжении по формуле

$$\sigma_{и} = P_i l_i / F_0 l_0. \quad (2.10)$$

3. СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ОМД

3.1. Сопротивление деформации при холодной пластической деформации

Процесс холодной деформации сопровождается упрочнением металла (наклепом), рис. 3.1. Для большинства металлов и сплавов сопротивление деформации в основном зависит от степени деформации, т.е. $\sigma_S = \sigma_S(\epsilon)^*$.

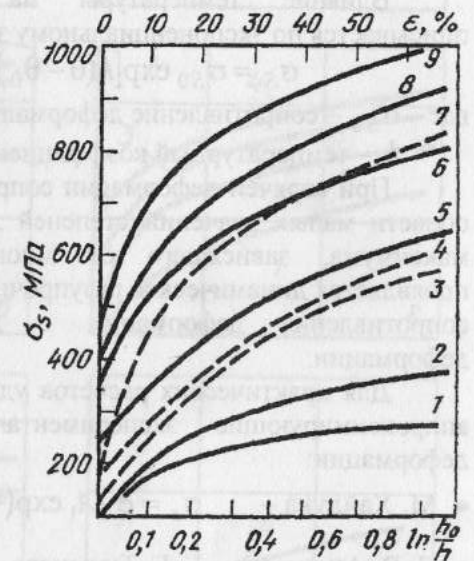


Рис. 3.1. Кривые упрочнения: 1 - дюралюминия Д1; 2 - меди М1; 3 - латуни Л68; 4 - латуни Л63; 5 - стали 08кп; 6 - стали 40; 7 - никеля НП2; 8 - стали 50; 9 - стали 30ХГСА

В инженерных расчетах принято, что сопротивление деформации в холодном состоянии определяется лишь суммарным обжатием, т.е. дробность деформации (число проходов) не влияет на сопротивление деформации.

Кривые упрочнения металлов и сплавов в холодном состоянии описываются аналитическими зависимостями [1 - 3]:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{0,2исх} + a\epsilon^n, \quad (3.1)$$

* Влияние скорости деформации на σ_S отмечается при высоких значениях $\xi \approx 10^3 \text{ с}^{-1}$.

где $\sigma_{0,2исх}$ – начальное сопротивление деформации металлов в отожженном состоянии (при 20°C);

a и n – эмпирические коэффициенты.

3.2. Сопротивление деформации при высокой температуре

В общем случае зависимость сопротивления деформации металлов и сплавов при высокой температуре имеет вид: $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon, \xi, \theta)$.

Влияние температуры на сопротивление деформации описывается по экспоненциальному закону Н. С. Курнакова:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \exp[k(\theta - \theta_0)], \quad (3.2)$$

где σ_{s0} – сопротивление деформации при температуре θ_0 ;

k – температурный коэффициент.

При горячей деформации сопротивление деформации растет в области малых значений степеней деформации. После достижения максимума, зависящего от многих факторов, более сильно проявляется динамическое разупрочнение. Это приводит к снижению сопротивления деформации с дальнейшим ростом степени деформации.

Для практических расчетов удобно использовать зависимости, аппроксимирующие экспериментальные данные при горячей деформации:

• М. Хайдука –
$$\sigma_s = \sigma_0 A_1 \exp(-m_1 \theta) A_2 \bar{\varepsilon}^{m_2} A_3 \xi^{m_3}, \quad (3.3)$$

• Л. В. Андreyюка – Г. Г. Тюленева –

$$\sigma_s = k \sigma_0 \xi^a (10\varepsilon)^b (\theta/1000)^c, \quad (3.4)$$

где σ_0 – базовое сопротивление деформации при $\xi=0,1 \text{ c}^{-1}$; $\varepsilon=0,1$; $\theta=1000^\circ\text{C}$;

• А. В. Третьякова и В. И. Зюзина –

$$\sigma_s = a_0 \varepsilon^{a_1} \xi^{a_2} \exp(-a_3 \cdot \theta). \quad (3.5)$$

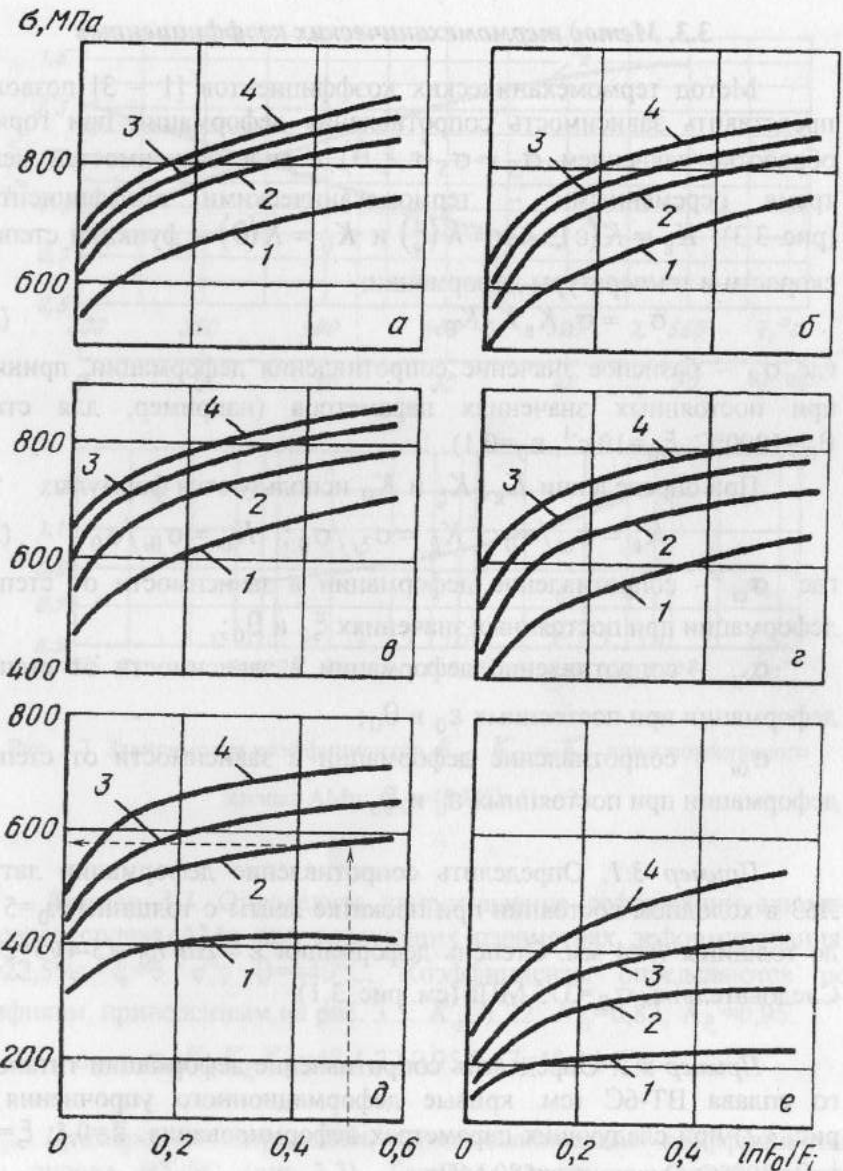


Рис. 3.2. Сопротивление деформации сплава ВТ-6С при 400 (а), 500 (б), 600 (в), 700 (г) 800 (д) и 900°C (е) [4]: 1 – $\xi=0,01 \text{ c}^{-1}$; 2 – $\xi=1 \text{ c}^{-1}$; 3 – $\xi=10 \text{ c}^{-1}$; 4 – $\xi=100 \text{ c}^{-1}$

3.3. Метод термомеханических коэффициентов

Метод термомеханических коэффициентов [1 – 3] позволяет представить зависимость сопротивления деформации при горячей обработке давлением $\sigma_S = \sigma_S(\varepsilon, \xi, \theta)$ в виде зависимостей между тремя переменными – термомеханическими коэффициентами (рис. 3.3): $K_\varepsilon = K(\varepsilon)$, $K_\xi = K(\xi)$ и $K_\theta = K(\theta)$ – функции степени, скорости и температуры деформации:

$$\sigma_S = \sigma_0 K_\varepsilon K_\xi K_\theta, \quad (3.6)$$

где σ_0 – базисное значение сопротивления деформации, принятое при постоянных значениях параметров (например, для стали: $\theta_0=1000^\circ\text{C}$, $\xi_0=10 \text{ c}^{-1}$, $\varepsilon_0=0,1$).

При определении K_ε , K_ξ и K_θ используются формулы:

$$K_\varepsilon = \sigma_{\varepsilon i} / \sigma_0; \quad K_\xi = \sigma_{\xi i} / \sigma_0; \quad K_\theta = \sigma_{\theta i} / \sigma_0, \quad (3.7)$$

где $\sigma_{\varepsilon i}$ – сопротивление деформации в зависимости от степени деформации при постоянных значениях ξ_0 и θ_0 ;

$\sigma_{\xi i}$ – сопротивление деформации в зависимости от степени деформации при постоянных ε_0 и θ_0 ;

$\sigma_{\theta i}$ – сопротивление деформации в зависимости от степени деформации при постоянных ε_0 и ξ_0 .

Пример 3.1. Определить сопротивление деформации латуни Л63 в холодном состоянии при прокатке ленты с толщины $h_0=5$ мм до толщины $h=4$ мм. Степень деформации $\varepsilon = \Delta h/h_0 = (5-4)/5=20\%$. Следовательно, $\sigma_S=375$ МПа (см. рис. 3.1).

Пример 3.2. Определить сопротивление деформации титанового сплава ВТ-6С (см. кривые деформационного упрочнения на рис. 3.2) при следующих параметрах деформирования: $\bar{\varepsilon}=0,5$; $\xi=1 \text{ c}^{-1}$; $\theta=800^\circ\text{C}$. Ответ: $\sigma_S=580$ МПа.

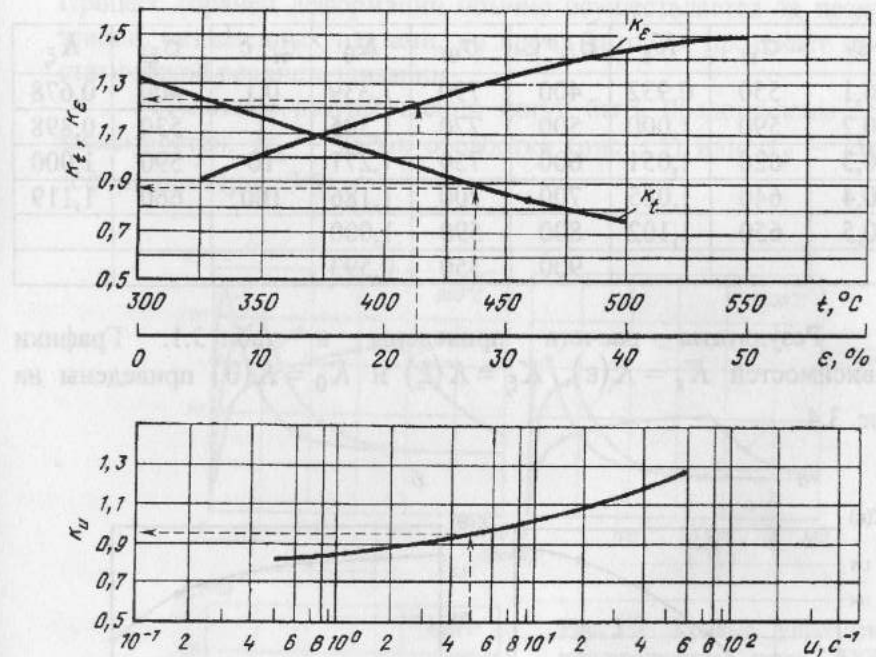


Рис. 3.3. Зависимости коэффициентов K_ε , K_θ и K_ξ для алюминиевого сплава АМц: $\sigma_0=48$ МПа [1 – 2]

Пример 3.3. Определить сопротивление деформации алюминиевого сплава АМц при следующих параметрах деформирования: $\varepsilon=22,5\%$; $\xi=5 \text{ c}^{-1}$; $\theta=440^\circ\text{C}$. Коэффициенты определяются по графикам, приведенным на рис. 3.3: $K_\varepsilon=1,22$; $K_\theta=0,87$; $K_\xi=0,95$.

$$\sigma_S = \sigma_0 K_\varepsilon K_\xi K_\theta = 48 \cdot 1,22 \cdot 0,95 \cdot 0,87 = 48,4 \text{ МПа.}$$

Пример 3.4. Определить термомеханические коэффициенты для сплава ВТ-6С (рис. 3.2). Базисное значение сопротивления деформации принято (для $\theta=800^\circ\text{C}$, $\xi=10 \text{ c}^{-1}$, $\varepsilon=0,2$): $\sigma_0=590$ МПа.

Таблица 3.1

ε_i	$\sigma_{\varepsilon i}$	K_ε	$\theta_i, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\theta i}$	K_θ	ξ_i, c^{-1}	$\sigma_{\xi i}$	K_ξ
0,1	550	0,932	400	790	1,339	0,1	400	0,678
0,2	590	1,000	500	770	1,305	1	530	0,898
0,3	620	1,051	600	750	1,271	10	590	1,000
0,4	640	1,085	700	700	1,186	100	660	1,119
0,5	650	1,102	800	590	1,000			
			900	350	0,593			

Результаты расчета приведены в табл. 3.1. Графики зависимостей $K_\varepsilon = K(\varepsilon)$, $K_\xi = K(\xi)$ и $K_\theta = K(\theta)$ приведены на рис. 3.4.

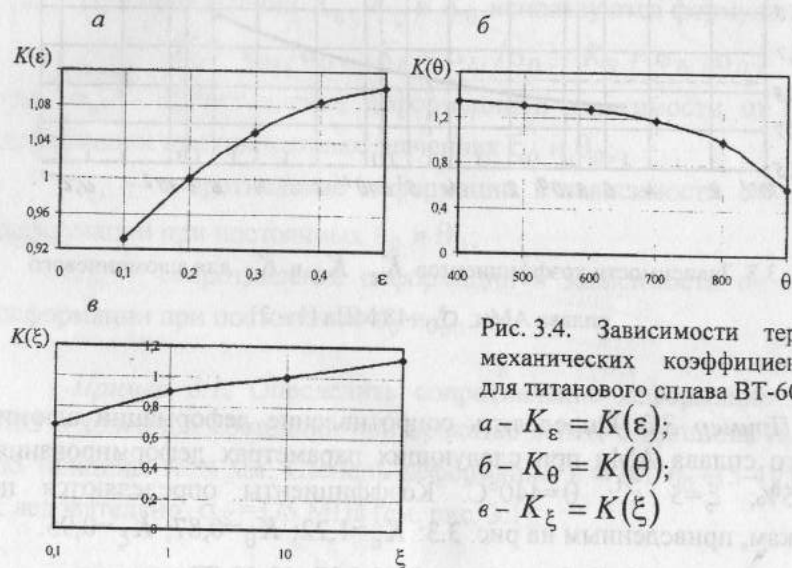


Рис. 3.4. Зависимости термо-механических коэффициентов для титанового сплава ВТ-6С:

- а - $K_\varepsilon = K(\varepsilon)$;
- б - $K_\theta = K(\theta)$;
- в - $K_\xi = K(\xi)$

3.4. Учет разупрочнения при горячей пластической деформации

При горячей деформации одновременно протекают процессы упрочнения и разупрочнения. Разупрочнение металла происходит в результате процессов возврата и динамической рекристаллизации.

Процесс горячей деформации обычно осуществляется за несколько этапов, разделенных паузами, во время которых протекает процесс статической рекристаллизации.

Результаты разупрочнения могут быть представлены в виде зависимостей: σ_S - время обработки (рис. 3.5) или σ_S - степень деформации (рис. 3.6).

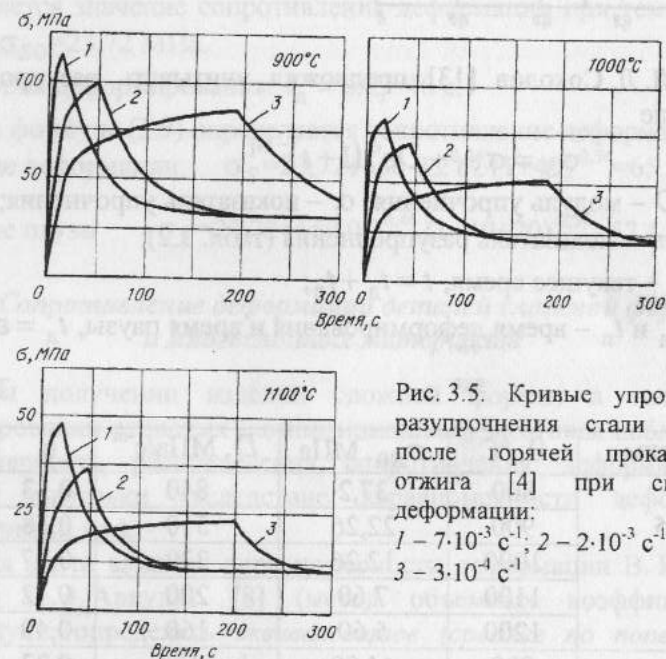


Рис. 3.5. Кривые упрочнения-разупрочнения стали 5ХВ2С после горячей прокатки и отжига [4] при скорости деформации: 1 - $7 \cdot 10^{-3} \text{c}^{-1}$; 2 - $2 \cdot 10^{-3} \text{c}^{-1}$; 3 - $3 \cdot 10^{-4} \text{c}^{-1}$

Учет разупрочнения в процессе горячей пластической деформации может быть выполнен по формуле [12]:

$$\Delta\sigma_S = \Delta\sigma_{S0} e^{-t/n}, \quad (3.8)$$

где t - длительность паузы между обжатиями;

$\Delta\sigma_{S0}$ - величина упрочнения в момент времени $t=0$;

n - константа, зависящая от материала и температуры испытания (например, для стали 3: при 900°C - $n=0,9$; при 1000°C - $n=0,5$; при 1100°C - $n=0,18$).

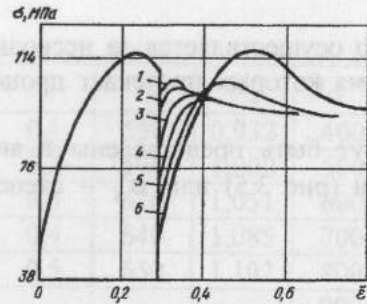


Рис. 3.6. Кривые упрочнения-разупрочнения электролитической меди (99,8%) при двухступенчатом нагружении. Длительность паузы, с: 1 – 0,58; 2 – 1,62; 3 – 3,96; 4 – 5,66; 5 – 68; 6 – 500

Л. Д. Соколов [13] предложил учитывать разупрочнение по формуле

$$\sigma_S = \sigma_{S0} + D\varepsilon^\alpha (1+t)^{-m_1}, \quad (3.9)$$

где D – модуль упрочнения; α – показатель упрочнения;

m_1 – показатель разупрочнения (табл. 3.2);

t – текущее время, $t = t_d + t_p$;

t_d и t_p – время деформирования и время паузы, $t_d = \varepsilon/\xi$.

Таблица 3.2

Сталь	$\theta, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{S0}, \text{МПа}$	$D, \text{МПа/с}^{-m}$	α	m_1
45	800	37,2	840	0,33	0,54
	900	22,26	510	0,38	0,53
	1000	12,26	220	0,37	0,52
	1100	7,60	200	0,42	0,5
	1200	5,60	160	0,49	0,43
9ХС	800	44,80	1180	0,33	0,58
	900	29,86	700	0,34	0,56
	1000	17,56	610	0,35	0,57
	1100	9,94	220	0,35	0,52
	1200	6,92	180	0,36	0,52
40Х	800	40,00	1010	0,36	0,50
	900	23,76	550	0,35	0,47
	1000	13,38	340	0,37	0,46
	1100	7,76	250	0,37	0,40
	1200	5,62	146	0,39	0,40

Пример 3.5. Определить сопротивление деформации сплава ЭИ703 после деформации при $\theta=1100^\circ\text{C}$ со степенью и скоростью деформации, соответственно равными $\varepsilon=0,2$; $\xi=0,005 \text{ с}^{-1}$, и последующей паузы $t_p=20 \text{ с}$.

По данным Л. Д. Соколова [13] для заданных температурно-скоростных условий деформирования находятся значения постоянных материала: $D=650 \text{ МПа/с}^{m_1}$; $\alpha=0,46$; $m_1=0,54$. Определяется значение сопротивления деформации при температуре 1100°C : $\sigma_{S0}=23,72 \text{ МПа}$.

Время деформирования: $t_d = \varepsilon/\xi = 40 \text{ с}$.

По формуле (3.9) определяется сопротивление деформации:

- в конце деформации $\sigma_S = 23,72 + 650 \cdot 0,2^{0,46} \cdot (1+40)^{-0,54} = 65,5 \text{ МПа}$;
- в конце паузы $\sigma_S = 23,72 + 650 \cdot 0,2^{0,46} \cdot (1+40+20)^{-0,54} = 57,4 \text{ МПа}$.

3.5. Сопротивление деформации деталей сложной формы и многослойных материалов

При получении изделий сложной формы, а также при деформировании слоистых (композиционных) заготовок наблюдается неравномерность распределения сопротивления деформации по сечению заготовки (вследствие неравномерности деформаций, температуры и др.).

Для учета влияния неравномерности деформации В. И. Зюзин [1, 2] и Г. Э. Аркулис [8] (метод объемных коэффициентов) рекомендуют определять эквивалентное (среднее по поперечному сечению) сопротивление деформации:

$$\bar{\sigma}_S = \sum_{i=1}^n A_i \sigma_{Si} = A_1 \sigma_{S1} + A_2 \sigma_{S2} + \dots + A_n \sigma_{Sn}, \quad (3.10)$$

где σ_{Si} – сопротивление деформации i -го слоя (участка) в n -слойном теле;

A_i – объемные коэффициенты, $A_i = V_i/V_0$, которые связаны

соотношением $\sum_{i=1}^m A_i = 1$;

V_i – объем i -го слоя (участка);

V_0 – объем заготовки.

Методика расчета сопротивления деформации сложных профилей (например, при прокатке с учетом влияния формы калибра) включает:

- деление фасонного профиля на n участков (равновеликих – по методике В. И. Зюзина или произвольного объема – по методике Г. Э. Аркулиса);
- определение средней степени деформации $\varepsilon_{срi}$ на выделенных участках;
- определение средней скорости деформации на выделенных участках $\xi_{срi} = \varepsilon_{срi} / t_d$ (где t_d – время деформации) или по другим формулам;
- определение средней температуры заготовки $\theta_{срi}$ на выделенных участках;
- определение сопротивления деформации σ_{Si} для каждого частного участка с учетом влияния параметров $\varepsilon_{срi}$, $\xi_{срi}$ и $\theta_{срi}$;
- определение среднего (эквивалентного) сопротивления деформации $\bar{\sigma}_S$ по формуле (3.10).

Пример 3.6. Определить сопротивление деформации при прокатке толстой полосы с размерами $B=110$ мм и $h=76$ мм. Диаметр заготовки: $D=120$ мм. Температура по сечению профиля постоянная. Время деформации: $t_d=0,01$ с. Деление фасонного профиля на частные (равные) участки приведено на рис. 3.5.

Так как $V_i = V_0/4$, следовательно, $A_1=0,25$; $A_2=0,25$; $A_3=0,25$; $A_4=0,25$.

Следовательно, $\bar{\sigma}_S = 76,2 \cdot 0,25 + 56,4 \cdot 0,25 + 56,4 \cdot 0,25 + 76,2 \cdot 0,25 = 66,3$ МПа.

Результаты расчета приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

N зоны	F_{0i} , мм ²	F_{1i} , мм ²	ε_i	K_ε	$\xi_i = \varepsilon_i / t_d$, с ⁻¹	K_ξ	θ_i , °C	K_θ	σ_{Si} , МПа
1	3180,5	2090	0,34	1,38	34	1,15	400	1,00	76,2
2	2474,4	2090	0,16	1,12	16	1,05	400	1,00	56,4
3	2474,4	2090	0,16	1,12	16	1,05	400	1,00	56,4
4	3180,5	2090	0,34	1,38	34	1,15	400	1,00	76,2

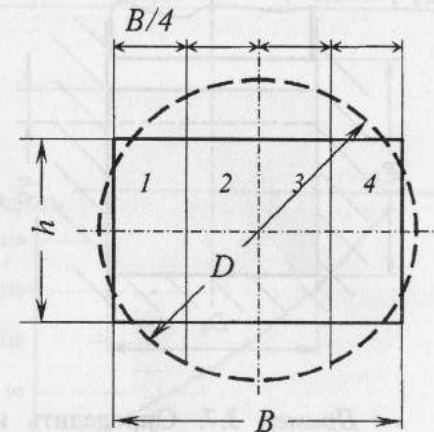


Рис. 3.7. Схема деления профиля к расчету сопротивления деформации

3.6. Сопротивление деформации некомпактных материалов

Сопротивление деформации некомпактных материалов (порошка, гранул, пористых, спеченных изделий и т.п.), по данным Ю. Н. Логинова [6], определяется на основании кривых упрочнения компактного материала (3.1):

$$\sigma_S = \left(\frac{\rho}{\rho_K} \right)^3 \left[\sigma_{0,2исх} + \left(\frac{\rho}{\rho_K} \right) a \varepsilon^m \right], \quad (3.10)$$

где ρ и ρ_K – текущая плотность и плотность компактного материала.

Текущая плотность заготовки определяется из условия неразрывности:

$$\rho = \rho_0 \exp(\varepsilon), \quad (3.11)$$

где ρ_0 – начальная плотность заготовки;

ϵ – степень объемной деформации (относительное изменение объема).

Степень объемной деформации при осадке заготовок в закрытом штампе (в условиях однородного деформированного состояния): $\epsilon = \ln(h_0/h_1)$, схема осадки на рис. 3.8.

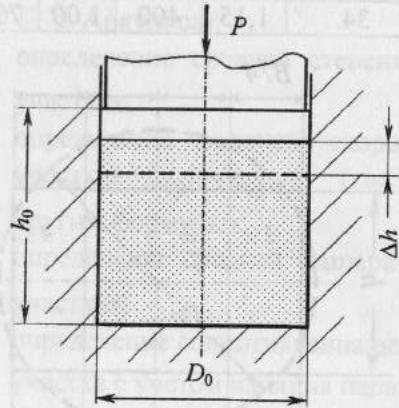


Рис. 3.8. Схемы осадки пористой заготовки в закрытом штампе (матрице)

Пример 3.7. Определить изменение плотности заготовки и сопротивление деформации при осадке пористой заготовки в контейнере (рис. 3.9) с начальными размерами $h_0=50$ мм и $D_0=50$ мм. Материал заготовки – железо с начальной плотностью $\rho_0=5$ г/см³. Абсолютное обжатие заготовки $\Delta h=12,5$ мм. Данные для расчета: $\rho_K=7,87$ г/см³; $\sigma_{0,2исх}=250$ МПа; $a=50$ МПа; $m=0,56$.

Результаты расчета приведены в табл. 3.4. Зависимость сопротивления деформации пористой заготовки от обжатия показана на рис. 3.7.

Таблица 3.4

h_i , мм	Δh_i , мм	h_{i+1} , мм	$\epsilon = \ln(h_0/h_i)$	$\epsilon = (h_0 - \Delta h)/h_0$	ρ_i , г/см ³	σ_{Si} , МПа
50	2,5	47,5	0,051	0,05	5,263	76,6
47,5	2,5	45	0,105	0,1	5,556	91,4
45	2,5	42,5	0,163	0,15	5,882	109,8
42,5	2,5	40	0,223	0,2	6,250	133,3
40	2,5	37,5	0,288	0,25	6,667	163,8

Здесь $\Delta h = \sum_{i=1}^5 \Delta h_i$.

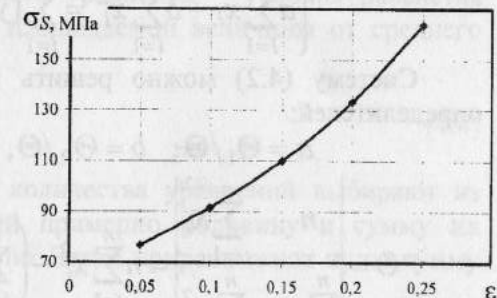


Рис. 3.9. Зависимость σ_S от степени деформации ϵ при обжатии пористой заготовки

4. АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Экспериментальные данные таблиц и графиков можно представить в виде аппроксимирующих формул, удобных для вычислений на ЭВМ. Аппроксимация – построение аналитической зависимости $y = f(x)$, описывающая экспериментальные данные о зависимости y от x , например, в виде линейной функции $y = a + bx$. Методы поиска параметров аппроксимирующей зависимости: метод наименьших квадратов, метод средних и др. [9].

4.1. Метод наименьших квадратов

Метод наименьших квадратов (или регрессионный анализ) состоит в том, чтобы, зная положение точек на плоскости xOy , так провести аппроксимирующую линию (или линию регрессии), чтобы сумма квадратов отклонений этих точек от проведенной линии была минимальной:

$$U = \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]_{\min}^2, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.1)$$

Система уравнений для поиска коэффициентов a и b :

$$\begin{cases} an + b \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i; \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i x_i). \end{cases} \quad (4.2)$$

Систему (4.2) можно решить методом Крамера с помощью определителей:

$$a = \Theta_1 / \Theta; \quad b = \Theta_2 / \Theta, \quad (4.3)$$

$$\Theta = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix} = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 - \text{главный определитель};$$

$$\Theta_1 = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix} = \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i;$$

$$\Theta_2 = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i y_i \end{vmatrix} = n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i.$$

К форме уравнения регрессии предъявляется требование, чтобы уравнение было линейным по параметрам, или допускается возможность линеаризации. Используя метод наименьших квадратов, можно построить практически любые формы нелинейной связи $y = f(x)$, с помощью линеаризующих преобразований (прил. 1).

Пример 4.1. Представить функцию $y = ax^b$ в виде линейной зависимости: $y' = a' + b'x'$. После логарифмирования представленной функции $\ln y = \ln a + b \ln x$ получено, что $y' = \ln y$, $a' = \ln a$, $b' = b$, $x' = \ln x$.

4.2. Метод средних

Метод средних состоит в том, что параметры эмпирической формулы определяются из одного уравнения – условия равенства нулю суммы всех отклонений наблюдаемой величины от среднего значения:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) = 0. \quad (4.4)$$

Для получения нужного количества уравнений выбирают из общего количества наблюдений примерно половину и сумму их отклонений приравнивают к нулю. Затем приравнивают нулю сумму прочих отклонений:

$$\sum_{i=1}^m (a + bx_i - y) = 0; \quad \sum_{i=m+1}^n (a + bx_i - y) = 0. \quad (4.5)$$

Таким образом, получена система двух уравнений:

$$\begin{cases} b \sum_{i=1}^m x_i + ma = \sum_{i=1}^m y_i; \\ b \sum_{i=m+1}^n x_i + (n-m)a = \sum_{i=m+1}^n y_i, \end{cases} \quad (4.6)$$

где $m = n/2$ при четном n и $m = (n+1)/2$ при нечетном n .

Сложив выражения (4.6) почленно и разделив их на n , получено выражение

$$a = \bar{y} - b\bar{x}, \quad (4.7)$$

$$\text{где } \bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i, \quad \bar{y} = (1/n) \sum_{i=1}^n y_i.$$

Представим линейную зависимость в виде $y - \bar{y} = b(x - \bar{x})$, тогда коэффициент b определяется по формуле

$$b = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})}. \quad (4.8)$$

4.3. Квадратичная регрессия

Если при графическом изображении экспериментальных точек явно просматривается нелинейность, используют нелинейную (квадратичную или высших порядков) формулу парной зависимости $y = f(x)$. Система уравнений для определения коэффициентов квадратичной регрессии $y = a + bx + cx^2$ (методом наименьших квадратов):

$$\begin{cases} an + b \sum_{i=1}^n x_i + c \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i; \\ a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 + c \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n (x_i y_i); \\ a \sum_{i=1}^n x_i^2 + b \sum_{i=1}^n x_i^3 + c \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 y_i). \end{cases} \quad (4.9)$$

Коэффициенты систем уравнений (4.9) могут быть найдены методом исключения переменных.

Пример 4.2. Выполнить аппроксимацию кривой упрочнения чистого алюминия (при температуре 18°C и скорости деформации 4,38 с⁻¹ [6]) зависимостью вида $\sigma_S = a\varepsilon^b$ методом наименьших квадратов и методом средних. Исходные данные:

$\varepsilon, \%$	5	10	20	25	30	35	40	50
$\sigma_S, \text{МПа}$	80	105	120	130	135	140	145	150

После логарифмирования получено $\ln \sigma_S = \ln a + b \ln \varepsilon$. Это линейная парная зависимость $y = a + bx$. В табл. 4.1 приведены расчеты коэффициентов уравнения регрессии a и b по методу наименьших квадратов, а в табл. 4.2 – по методу средних.

Так как $\ln a = (38,525 - 80,348 - 119,992 \cdot 24,684) / (8 \cdot 80,348 - 24,684^2) = 3,988$, тогда $a = 53,975$ МПа; $b = (8 \cdot 119,992 - 24,684 \cdot 38,525) / (8 \cdot 80,348 - 24,684^2) = 0,268$. Следовательно, уравнение регрессии имеет вид $\sigma_S = 53,975 \cdot \varepsilon^{0,268}$ (рис. 4.1). Средние значения: $\bar{x} = 3,086$; $\bar{y} = 4,816$. Тогда $\ln a = 4,020$, $a = 55,674$ МПа; $b = 0,258$. Следовательно, уравнение регрессии, полученное по методу средних, имеет вид $\sigma_S = 55,674 \cdot \varepsilon^{0,258}$ (см. рис. 4.1).

Таблица 4.1

Аппроксимация кривой упрочнения методом наименьших квадратов

N п/п	$\varepsilon, \%$	$\sigma_S, \text{МПа}$	$x = \ln \varepsilon$	$y = \ln \sigma_S$	x^2	xy
1	5	80	1,609	4,382	2,590	7,053
2	10	105	2,303	4,654	5,302	10,716
3	20	120	2,996	4,787	8,974	14,342
4	25	130	3,219	4,868	10,361	15,668
5	30	135	3,401	4,905	11,568	16,684
6	35	140	3,555	4,942	12,640	17,569
7	40	145	3,689	4,977	13,608	18,359
8	50	150	3,912	5,011	15,304	19,602
Σ	-	-	24,684	38,525	80,348	119,992

Таблица 4.2
Аппроксимация кривой упрочнения алюминия методом средних

N п/п	$\epsilon, \%$	$\sigma_S, \text{МПа}$	$x = \ln \epsilon$	$y = \ln \sigma_S$	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$
1	80	5	1,609	4,382	-1,476	-0,434
2	105	10	2,303	4,654	-0,783	-0,162
3	120	20	2,996	4,787	-0,090	-0,028
4	130	25	3,219	4,868	0,133	0,052
$\sum_{i=1}^m$			10,127	18,691	-2,215	-0,572
5	135	30	3,401	4,905		
6	140	35	3,555	4,942		
7	145	40	3,689	4,977		
8	150	50	3,912	5,011		
$\sum_{i=m+1}^n$			14,557	19,834		
Σ			24,684	38,525		

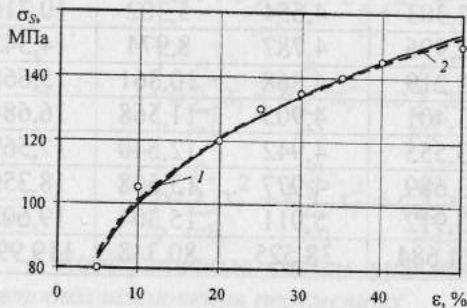


Рис. 4.1. Сопротивление деформации чистого алюминия: \circ – экспериментальные точки; 1 – кривая по методу наименьших квадратов; 2 – кривая по методу средних

Пример 4.3. Используя метод наименьших квадратов, выполнить аппроксимацию кривой упрочнения свинца марки С00 (при температуре 20°C и скорости деформации 2,7 с⁻¹ [6]) квадратичной зависимостью вида $\sigma_S = \sigma_{S0} \exp(b\bar{\epsilon} - m\bar{\epsilon}^2)$. Исходные данные:

$\bar{\epsilon}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,2
$\sigma_S, \text{МПа}$	20	28	32	37	36	34	32

После логарифмирования получено $\ln \sigma_S = \ln \sigma_{S0} + b\bar{\epsilon} - m\bar{\epsilon}^2$. Это квадратичная парная зависимость вида $y = a + bx + cx^2$, где $y = \ln \sigma_S$, $x = \bar{\epsilon}$, $a = \ln \sigma_{S0}$, $b = b$, $c = -m$. В табл. 4.3 приведены расчеты коэффициентов уравнения регрессии a , b и c по методу наименьших квадратов. Сравнение экспериментальных данных и кривой упрочнения приведено на рис. 4.2.

Таблица 4.3
Аппроксимация кривой упрочнения свинца

N п/п	$\bar{\epsilon}$	$\sigma_S, \text{МПа}$	$x = \bar{\epsilon}$	$y = \ln \sigma_S$	xy	x^2	x^2y	x^3	x^4
1	0,2	20	0,2	2,996	0,599	0,04	0,120	0,008	0,0016
2	0,4	28	0,4	3,332	1,333	0,16	0,533	0,064	0,0256
3	0,6	32	0,6	3,466	2,079	0,36	1,248	0,216	0,1296
4	0,8	37	0,8	3,611	2,889	0,64	2,311	0,512	0,4096
5	1,0	36	1	3,584	3,584	1	3,584	1	1
6	1,1	34	1,1	3,526	3,879	1,21	4,267	1,331	1,4641
7	1,2	32	1,2	3,466	4,159	1,44	4,991	1,728	2,0736
Σ	-	-	5,30	23,98	18,522	4,85	17,05	4,859	5,104
						3			

В соответствии с методом наименьших квадратов составлена система уравнений:

$$7a + 5,300b + 4,850c = 23,980; \quad (4.18)$$

$$5,300a + 4,850b + 4,859c = 18,522; \quad (4.19)$$

$$4,850a + 4,859b + 5,104c = 17,053. \quad (4.20)$$

Выполним расчет коэффициентов уравнения регрессии a , b и c методом исключения переменных. Все члены уравнения (4.19) умножаем на 7/5,300=1,321:

$$7a + 5,300b + 4,850c = 23,980; \quad (4.18')$$

$$7a + 6,407b + 6,419c = 24,468; \quad (4.19')$$

$$1,107b + 1,569c = 0,488. \quad (4.21)$$

Далее исключаем из уравнений (4.19) и (4.20) a . Для этого все члены уравнения (4.19) умножим на $5,3/4,85=1,093$:

$$5,300a + 4,850b + 4,859c = 18,522; \quad (4.19')$$

$$5,300a + 5,311b + 5,579c = 18,639, \quad (4.20')$$

$$0,461b + 0,720c = 0,117. \quad (4.22)$$

Из уравнений (4.21) и (4.22) исключаем b и определяем c , для этого умножим все члены уравнения (4.22) на $1,107/0,461=2,401$:

$$1,107b + 1,569c = 0,488. \quad (4.21')$$

$$1,107b + 1,729c = 0,281. \quad (4.22')$$

$$0,16c = -0,207, \quad c = -1,294. \quad (4.23)$$

Определим b , подставив значение $c = -1,294$ в выражение (6.21):

$$1,107b - 2,030 = 0,488; \quad b = 2,275. \quad (4.24)$$

Определим a , подставив значение $b = 2,275$ и $c = -1,294$ в выражение (4.18):

$$7a + 12,058 - 6,276 = 23,980; \quad a = 2,6. \quad (4.25)$$

Так как $\sigma_{S0} = \exp(a) = 13,464$, уравнение имеет вид

$$\sigma_S = 13,464 \exp(2,275\varepsilon - 1,294\varepsilon^2).$$

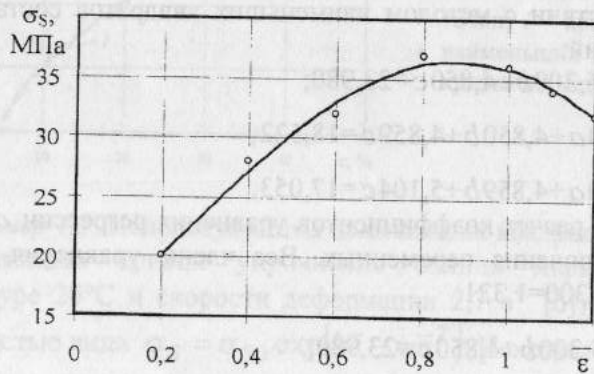


Рис. 4.2. Аппроксимация кривой упрочнения свинца марки С00 (при температуре 20°C и скорости деформации $2,7 \text{ с}^{-1}$: \circ – экспериментальные точки

5. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Задание N1. Выполнить расшифровку диаграмм растяжения $P = f(\Delta l)$ и сжатия $P = f(\Delta h)$ при испытании цилиндрических образцов (см. диаграммы в прил. 1). Начальные размеры заготовки приведены в табл. 5.2. Построить зависимости $\sigma_{и} = \sigma_{и}(\varepsilon)$ и $T = T(\Lambda)$, используя различные формулы для расчета сопротивления деформации (см. варианты заданий в табл. 5.2). Результаты расчетов занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

x_i , мм	Δh_i , мм (Δl_i)	h_i , мм (l_i)	D_i , мм	F_i , мм ²	P_i , мм	P_i , Н	ε_i	$\bar{\varepsilon}_i$	Λ_i	$\sigma_{и}$, МПа	T , МПа

Задание N2. Построить кривые упрочнения для нержавеющей стали 12X18H9T в инвариантной форме $T = T(\Lambda)$, опираясь на результаты экспериментальных исследований А. А. Динника, представленные на рис. 5.1: $\sigma_S = n_\varepsilon \sigma_u$, где σ_u – сопротивление деформации при $\varepsilon = 30\%$; n_ε – коэффициент, зависящий от степени деформации ε .

Варианты заданий приведены в табл. 5.2. Кривые упрочнения построить при постоянной температуре деформации θ и трех скоростях деформации ξ .

Задание N3. Определить сопротивление деформации (используя график на рис. 5.2) в конце каждого прохода при холодной листовой прокатке. Обжатие осуществляется за 3 прохода с начальной толщины h_0 до толщины h_3 , с последовательными обжатиями $\varepsilon_i = \Delta h_i / h_{i-1}$, где $\Delta h_i = h_{i-1} - h_i$. Определить среднее сопротивление деформации в каждом проходе. Данные для решения задачи приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Данные для выполнения заданий N 1 – N 3

Вариант	Задание N 1				μ	$\theta, ^\circ\text{C}$	Задание N 2			Задание N 3			
	$D_0, \text{мм}$	$h_0, l_0, \text{мм}$	$h_K, l_K, \text{мм}$	ξ (на рис.5.1 обозначено и), с^{-1}			$\xi_1, \%$	$\xi_2, \%$	$\xi_3, \%$	Материал	$h_0, \text{мм}$		
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	18,5	18,5	0,010	0,010	0,01	0,05	0,1	10	Д1	5	20	10	10
2	18,5	18,5	0,012	0,012	0,1	0,5	1	1	медь М1	5	10	10	20
3	18,5	18,5	0,014	0,014	800	1	5	10	Л68	5	10	20	10
4	18,5	18,5	0,016	0,016		10	50	10^2	Л63	5	20	20	15
5	18,5	18,5	0,020	0,020		100	500	10^3	сталь 08кп	5	20	20	10
6	10	100	-	-		0,01	0,05	0,1	сталь 40	4	15	10	10
7	10	100	-	-	900	0,1	0,5	1	НП2	4	10	10	15
8	10	100	-	-		1	5	10	сталь 50	4	10	15	10
9	10	100	-	-		10	50	10^2	30ХГСА	4	15	15	15
10	10	100	-	-		100	500	10^3	Д1	4	15	15	10
11	20	20	0,010	0,010		0,01	0,05	0,1	медь М1	6	15	10	10
12	20	20	0,012	0,012		0,1	0,5	1	Л68	6	10	10	15
13	20	20	0,014	0,014	1000	1	5	10	Л63	6	10	15	10
14	20	20	0,016	0,016		10	50	10^2	сталь 08кп	6	15	15	15
15	20	20	0,020	0,020		100	500	10^3	сталь 40	6	15	15	10

Окончание табл. 5.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
16	10	100	100	-	-	1100	0,01	0,05	0,1	НП2	4	20	10	10
17	10	100	100	-	-		0,1	0,5	1	сталь 50	4	10	10	20
18	10	100	100	-	-		1	5	10	30ХГСА	4	10	20	10
19	10	100	100	-	-		10	50	10^2	Д1	4	20	20	15
20	10	100	100	-	-		100	500	10^3	медь М1	4	20	20	10
21	30	30	0,010	0,010		1200	0,01	0,05	0,1	Л68	5	15	10	10
22	30	30	0,012	0,012			0,1	0,5	1	Л63	5	10	10	15
23	30	30	0,014	0,014			1	5	10	сталь 08кп	5	10	15	10
24	30	30	0,016	0,016			10	50	10^2	сталь 40	5	15	15	15
25	30	30	0,020	0,020			100	500	10^3	НП2	5	15	15	10

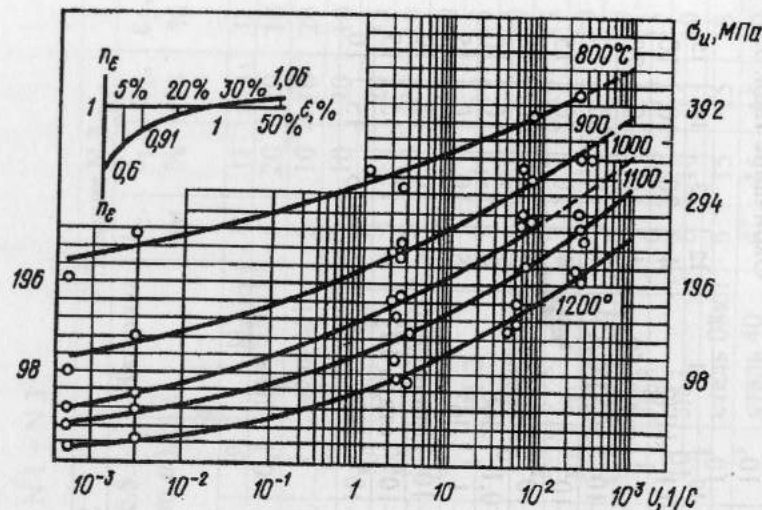


Рис. 5.1. Сопротивление деформации для стали 12X18H9T (по А. А. Диннику)

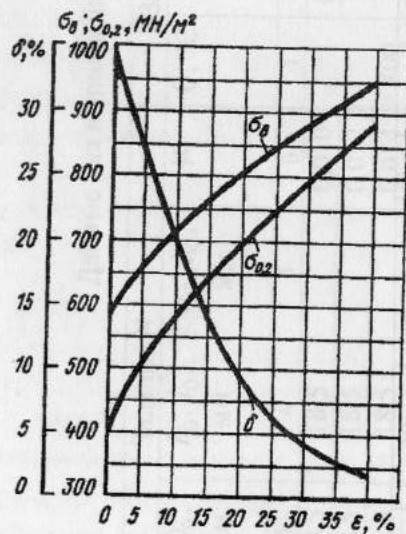


Рис. 5.2. Кривая упрочнения БрБ2 [3 - 5]

Задание N 4. Построить

кривые упрочнения $\sigma_S = \sigma_S(\epsilon)$ в холодном состоянии для бериллиевой бронзы БрБ2:

- по формуле (3.1) при $n=0,75$;
 $\sigma_{0,2исх} = 400$ МПа; $a=31$ МПа;
- по формуле Б. Е. Хайкина [11]

$$\sigma_S = \sigma_{S0} \exp \left[\left(\frac{1}{a} - 1 \right) \epsilon^a \right],$$

где $\sigma_{S0} = 400$ МПа; $a=0,46$;

- по справочным данным А. В. Третьякова и В. И. Зюзина (рис. 5.2);
- по данным эксперимента (табл. 5.3).

Сравнить данные разных авторов и сделать выводы. Примечание: в формуле (3.1) ϵ выражается в %, а в формуле Б. Е. Хайкина – в долях единицы, т.е. $0 \leq \epsilon < 1$.

Таблица 5.3

Сопротивление деформации БрБ2 [16]

Данные эксперимента	Относительная деформация ϵ , %								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
σ_S , МПа	380	435	490	555	620	700	780	840	900

Задание N 5. Определить сопротивление деформации и силу волочения проволоки в каждом переходе при холодной деформации проволоки из цветных металлов и сплавов (с учетом отжигов). Технологический режим волочения проволоки приведен в табл. 5.3, где символом «*» показано, после какого перехода волочения проводится отжиг для снятия наклепа.

Сила волочения определяется по формуле И. Л. Перлина – В. М. Заруева:

$$P_i = \sigma_{Scpi} F_i (1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) \ln(F_{i-1}/F_i), \quad i = 1, m.$$

где σ_{Scpi} – среднее сопротивление деформации в каждом проходе;

F_i – площадь поперечного сечения проволоки;

μ – коэффициент трения, $\mu=0,05$;

α – полуугол волоки $\alpha=6^\circ$;

i – номер перехода;

m – число переходов волочения проволоки, $m=10$.

Сопротивление деформации определяется по формуле (3.1), коэффициенты приведены в табл. 5.4.

Задание N 6. Определить усилие прессования стального круглого прутка диаметром d (рис. 5.3) при температуре $\theta=1200^\circ\text{C}$ по формуле Л. В. Прозорова:

$$P = \sigma_S c F (1 + \mu L/D_K) \ln \lambda,$$

где c – эмпирический коэффициент ($c=4 + 5$);

F – площадь поперечного сечения слитка, $F = \frac{\pi D_K^2}{4} = \pi R^2$

D_K – диаметр контейнера;
 L – длина слитка, $L = 2,5D_K$;
 μ – коэффициент трения, $\mu=0,3$;
 λ – вытяжка, $\lambda = D_K^2/d^2=10$.

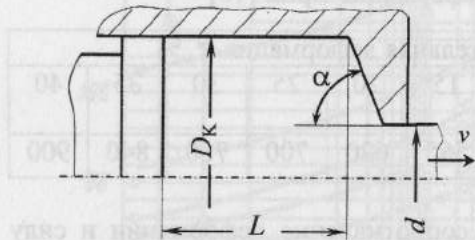


Рис. 5.3. Схема прессования прутка

Сопротивление деформации определить по формуле Л. В. Андреюка – Г. Г. Тюленева (3.5). Варианты заданий приведены в табл. 5.5.

Средняя скорость деформации при прессовании прутков

$$\xi = \frac{6v \cdot \ln \lambda \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(\lambda \sqrt{\lambda} - 1) d}$$

где α – угол конусности матрицы, $\alpha=60^\circ$;
 v – скорость прессования (скорость выхода металла из матрицы).

Задание N 7. Определить энергосиловые параметры (силу и момент прокатки) при горячей прокатке полос 5×2000 мм из сплава АМгб на полунепрерывном стане 2800 (схема стана приведена на рис. 5.4). Режим обжатий приведен в табл. 5.5.

Момент и сила прокатки определяются по формулам:

$$M = 2Pa \quad \text{и} \quad P = pBl,$$

где p – среднее удельное давление металла на валки;

a – плечо действия силы P , $a = 0,5l$;

l – длина дуги захвата, $l = \sqrt{R \cdot \Delta h}$;

R – радиус вала;

Δh – обжатие заготовки;

B – ширина полосы, $B=2000$ мм.

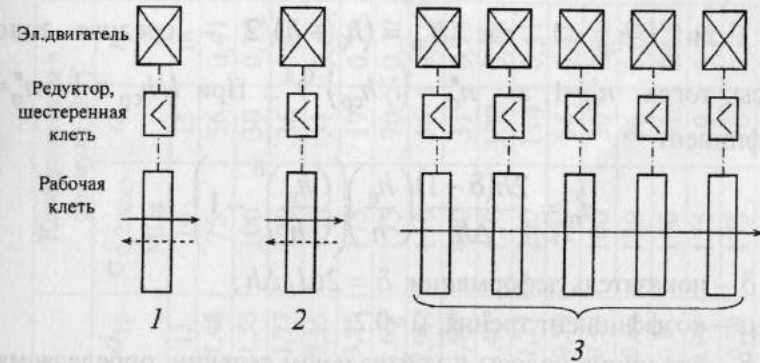


Рис. 5.4. Схема прокатки на полунепрерывном стане 2800 (стрелками показано направление прокатки): 1 – первая реверсивная клет «кварто» 900/1400×2800; 2 – вторая реверсивная клет «кварто» 750/1400×2800; 3 – пятиклетевая непрерывная группа «кварто» 650/1400×2800

Среднее удельное давление при прокатке определяется по формуле

$$p = 1,15 \sigma_s n'_\sigma n''_\sigma n'''_\sigma n_g;$$

где n'_σ , n''_σ и n'''_σ – коэффициенты, учитывающие влияние трения между валком и металлом, влияние частей полосы, находящихся вне очага деформации и влияние натяжения полосы, соответственно;

n_g – коэффициент, учитывающий влияние ширины полосы (при $B/l > 5 - 8$ $n_g=1$).

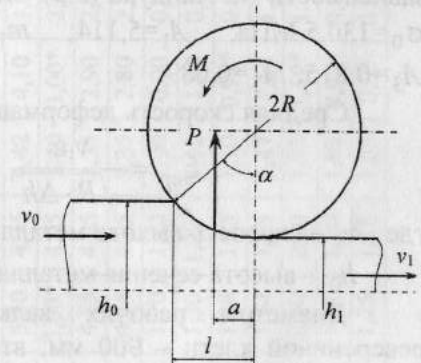


Рис. 5.5. Схема процесса прокатки

Если $l/h_{cp} < 1$, где $h_{cp} = (h_0 + h)/2$ - средняя толщина полосы, тогда $n'_\sigma = 1$, а $n''_\sigma = (l/h_{cp})^{-0,4}$. При $l/h_{cp} > 1$ $n''_\sigma = 1$, а коэффициент

$$n'_\sigma = \frac{2h(\delta - 1)}{\Delta h} \left(\frac{h_n}{h} \right) \left(\left(\frac{h_n}{h} \right)^\delta - 1 \right),$$

где δ - показатель деформации, $\delta = 2\mu/\Delta h$;
 μ - коэффициент трения, $\mu = 0,2$;
 h_n - толщина полосы в нейтральном сечении, определяемая по формуле

$$\frac{h_n}{h} = \left[\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1)(h_0/h)^\delta}}{\delta + 1} \right]^{1/\delta}$$

При отсутствии натяжения полосы $n''_\sigma = 1$.

Сопротивление деформации определить по аппроксимирующей зависимости М. Хайдука (3.3). Коэффициенты для сплава АМгб [3]: $\sigma_0 = 130,5$ МПа; $A_1 = 5,114$; $m_1 = 0,00429$; $A_2 = 1,134$; $m_2 = 0,055$; $A_3 = 0,815$; $m_3 = 0,089$.

Средняя скорость деформации при плоской прокатке

$$\xi_{cp} = \frac{v_1 \varepsilon}{\sqrt{R \cdot \Delta h}},$$

где v_1 - скорость выхода металла из валков;
 h_0 - высота сечения металла перед входом в валки.

Диаметры рабочих валков у рабочих клетей: первой реверсивной клетки - 900 мм; второй реверсивной клетки - 750 мм; пятиклетевой непрерывной группы - 650 мм. Скорости прокатки v_1 принять равными: в первой и во второй реверсивной клетки - 4 м/с; в первой клетки пятиклетевой непрерывной группы - 2,5 м/с.

Данные для выполнения задания N 5

Вариант	Материал	Диаметр проволоки по переходам волочения d_i , мм										Коэффициенты в формуле (3.1)			
		d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}	$\sigma_{0,2}$ диск, МПа	a	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	Медь	7,20	5,70	4,60	3,80	3,25	2,80	2,40	2,10	1,85	1,65	1,48	75	56	0,41
2	Л80	7,20	5,75	4,73	3,83	3,27	2,80	2,45	2,17	1,90	1,70	1,50	100	30	0,70
3	Л68	7,20	6,20	5,20	4,50*	3,90	3,35	2,92	2,56	2,24	2,00*	1,77	120	36	0,62
4	Л63	7,20	6,20	5,50	4,95	4,47*	4,10	3,65	3,20	2,82	2,52	2,25	150	31	0,65
5	ЛС63-3	13,2	11,2	10,2*	8,60	7,50*	6,80	5,70*	5,00	4,50	4,00*	3,20	175	19	0,73
6	ЛС59-1	5,80	4,80*	4,20	3,80*	3,20	2,80*	2,40*	2,14	1,94	1,76	1,60*	175	70	0,37
7	ЛЮ60-1	7,20	6,00*	5,30	4,75	4,42	4,10	3,80	3,55	3,30	3,11	2,98*	150	56	0,51
8	БрБ2	7,20	5,90	5,00*	4,05	3,40	3,00*	2,60	2,30	2,00	1,70	1,50*	400	31	0,75
9	Никель	7,20	5,90	4,85	4,05	3,35	2,90	2,50	2,15	1,85	1,58	1,40*	150	137	0,38
10	Монель	7,20	5,90	4,85	4,05	3,35	2,80	2,35	1,98	1,68	1,50*	1,27	200	114	0,41
11	Медь	1,48	1,34	1,20	1,12	1,00	0,90	0,80	0,71	0,63	0,56	0,50	75	56	0,41
12	Л80	1,52	1,40	1,30	1,20*	1,12	1,00	0,90	0,80	0,71	0,63	0,56	100	30	0,70
13	Л68	1,77	1,56	1,38	1,23	1,10	0,98*	0,90	0,81	0,73	0,66	0,60	120	36	0,62
14	Л63	2,25	1,98*	1,84	1,65	1,47	1,34	1,20	1,07	0,99*	0,90	0,81	150	31	0,65
15	ЛС63-3	3,20	2,80	2,40	2,10	1,72	1,50*	1,34	1,20	1,07	0,99	0,90*	175	19	0,73
16	ЛС59-1	1,60	1,42	1,31	1,20	1,07	0,99*	0,89	0,80	0,71	0,65	0,59	175	70	0,37
17	БрБ2	1,50	1,35	1,25	1,15	1,05	0,95	0,88	0,80*	0,75	0,68	0,60	400	31	0,75

Таблица 5.4

Окончание табл. 5.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
18	Никель	1,40	1,28	1,16	1,05	0,94	0,84	0,75	0,67	0,60	0,54	0,49*	150	137	0,38
19	Монель	1,27	1,12	1,00	0,90	0,81	0,73	0,655	0,59	0,53	0,49	0,45	200	114	0,41
20	Л63	10,2	8,30	7,73	6,75	5,65	4,97*	4,38	4,08	3,60	3,25	2,96	150	31	0,65
21	Л63	2,96	2,74	2,52	2,32	2,13	1,98*	1,84	1,65	1,47	1,34	1,20	150	31	0,65
22	БрОФ6,5-0,4	7,05	6,60	6,00*	5,40	4,90	4,37	3,97*	3,62	3,25	2,94	2,67	220	51	0,55
23	БрОФ6,5-0,4	3,20	2,90	2,50*	2,15	1,85	1,58	1,40*	1,25	1,15	1,05	0,95	220	51	0,55
24	БрОЦ4-3	7,20	5,90	4,09	4,05	3,40	3,00*	2,60	2,25	1,95	1,68	1,48	120	51	0,55
25	БрОЦ4-3	13,2	11,2	10,2	8,60*	7,50	6,80	5,70	5,00*	4,50	4,05	3,25	120	51	0,55

Таблица 5.5

Данные для выполнения заданий N 6 и N 7

Вариант	D _к , мм	v, м/с	Марка стали	Задание N 6						Задание N 7				
				k	σ ₀ , МПа	a	b	c	h ₀ , мм	h, мм	θ°, C			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
1		0,5	Ст3	0,885	76,4	0,135	0,164	-2,8			10	Первая реверсия	270	264
2		1,0	15Г	0,842	101	0,126	0,188	-2,74				реверсия	264	245
3	360	1,5	35Г	0,975	89,6	0,136	0,187	-2,79				клеть	245	230
4		1,0	30ХГСА	0,996	90,5	0,134	0,25	-3,34					230	215
5		0,5	15ХСНД	0,88	91,3	0,122	0,226	-2,9					215	200

Окончание табл. 5.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
7		1,0	15ХГНТА	0,932	105,8	0,108	0,257	-3,25		185	170	
8	270	1,5	45	1,000	87,4	0,143	0,173	-3,05		170	155	430
9		1,0	40Х	0,979	85,7	0,13	0,17	-3,62		155	140	
10		0,5	40ХН	0,935	86,7	0,134	0,234	-3,47		140	125	
11		0,5	40ХГНМ	0,87	100,9	0,173	0,144	-2,64		125	110	
12		1,0	38ХМЮА	1,016	98	0,114	0,273	-3,72		110	97	
13	230	1,5	40ХНМА	0,966	90,8	0,125	0,175	-3,4		97	84	450
14		1,0	65Г	1,007	72,7	0,166	0,222	-3,02		84	71	
15		0,5	У7А	0,948	78,3	0,159	0,197	-2,87		71	60	
16		0,5	У10А	0,955	78,9	0,163	0,194	-3,57		60	50	
17		1,0	60С2	0,921	102,9	0,153	0,197	-3,46		50	40	450
18	170	1,5	60С2ХА	0,946	99	0,139	0,115	-3,84		40	30	
19		1,0	ШХ15	1,010	79,6	0,137	0,220	-4,07		30	20	
20		0,5	Р18	0,780	237	0,136	0,100	-3,01		20	15	
21		0,5	12Х13	0,950	142,1	0,102	0,125	-3,5		15	11	
22		1,0	20Х13	0,9	133,3	0,132	0,210	-3,26		11	8,5	400
23	270	1,5	12Х18Н10Т	0,825	222	0,112	0,088	-3,35		8,5	6,5	
24		1,0	12Х21Н5Т	0,900	150	0,077	0,067	-3,23		6,5	5,5	
25		0,5	18Х2Н4ВА	0,971	107	0,117	0,165	-2,73		5,5	5,0	

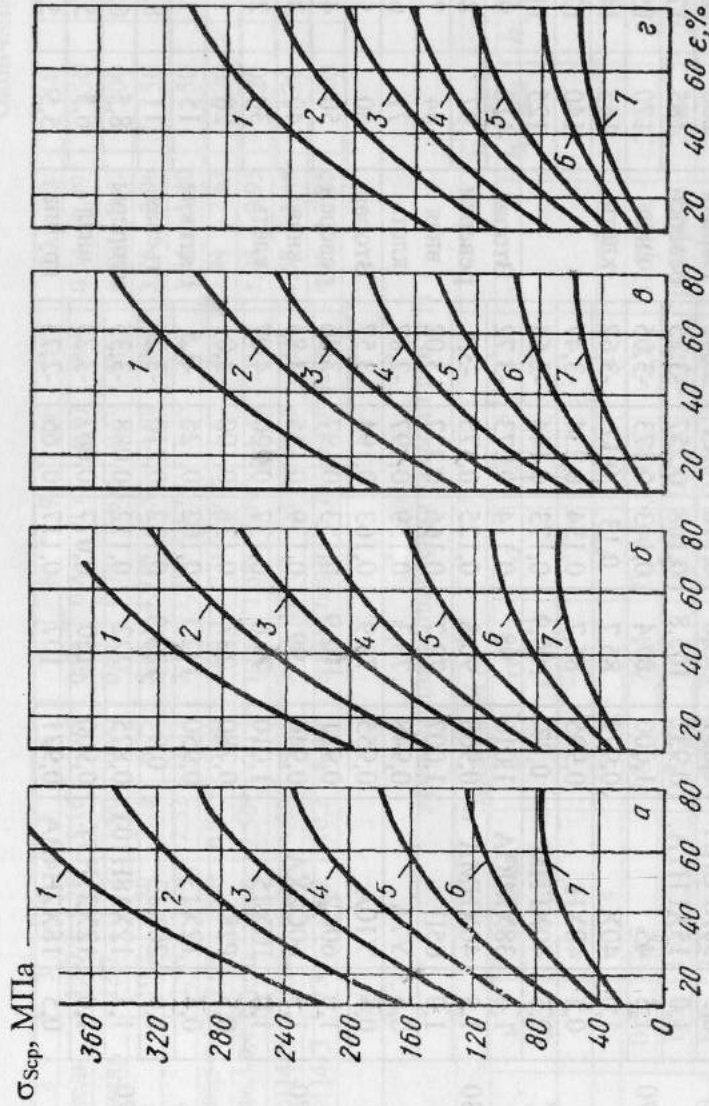


Рис. 5.6. Кривые деформационного упрочнения сплава МНЖМц 28-2,5-1,5 при скоростях деформации 18 (а), 6 (б), 1,8 (в), 0,4 с⁻¹ (г). Температура деформации: 1 – 600°С; 2 – 700°С; 3 – 800°С; 4 – 900°С; 5 – 1000°С; 6 – 1100°С; 7 – 1200°С

Задание N 8. В соответствии с методом термомеханических коэффициентов построить функции $K_\varepsilon = K(\varepsilon)$, $K_\xi = K(\xi)$ и $K_\theta = K(\theta)$ для сплава МНЖМц 28-2,5-1,5 (кривые упрочнения на рис. 5.6). Базисное значение сопротивления деформации σ_0 выбрать в соответствии с вариантами заданий в табл. 5.7.

Задание N 9. Сравнить сопротивление деформации $\sigma_S = f(\varepsilon)$ для нержавеющей стали 12Х18Н9Т при параметрах деформирования ξ и θ , заданных в табл. 5.6:

- по данным А. В. Третьякова и В. И. Зюзина по формуле (3.5): $a_0=3250$ МПа; $a_1=0,280$; $a_2=0,087$; $a_3=0,0028$ (для интервала технологических параметров $\varepsilon=0,05 - 0,40$; $\xi=0,1 - 100$ с⁻¹; $\theta=900 - 1200$ °С);
- по данным А. А. Динника (см. рис.5.1);
- по формуле А. Рейто (3.2) – $\sigma_S = \sigma_0(\xi/\xi_0)^m$, где σ_0 – сопротивление деформации при скорости деформации ξ_0 , приведенное в табл. 5.5; m – экспериментальная константа.

Таблица 5.6
Коэффициенты в формуле А. Рейто при $\xi_0=1$ с⁻¹

Коэффициенты	Температура, °С				
	800	900	1000	1100	1200
σ_0 , МПа	-	256	194	144	102
m	-	0,060	0,090	0,100	0,115

Задание N 10. Определить сопротивление деформации стали (с учетом разупрочнения во время паузы между этапами деформирования) при осадке цилиндрической заготовки высотой h_0 ($h_0/d_0 = 1$). Заготовка осаживается до степени деформации $\varepsilon_1=0,2$ и $\varepsilon_2=0,4$. Параметры деформации (см. табл. 5.7): температура θ ; скорость деформации ξ и продолжительность паузы после обжатия заготовки t_n . Деформация считается равномерной.

Построить кривые зависимости сопротивления деформации $\sigma_S = f(\epsilon)$, $\sigma_S = f(t)$ и $p_{cp} = f(\epsilon)$ для двух условий деформирования заготовки. Среднее контактное давление определяется по формуле

$$p_{cp} = \sigma_S \left[1 + \frac{\psi}{3} \left(\frac{d}{h} \right) \right],$$

где ψ – показатель трения; d и h – текущие диаметр и высота заготовки.

Задание N 11. Используя метод наименьших квадратов и метод средних выполнить аппроксимацию кривой упрочнения $\sigma_S = f(\theta)$ для алюминиевого сплава зависимостью вида $\sigma_S = a \exp(b\theta)$ (при заданной скорости деформации). Построить графики двух аппроксимирующих функций и сравнить с экспериментальными данными.

Варианты заданий приведены в табл. 5.8.

Задание N 12. Используя метод наименьших квадратов, выполнить аппроксимацию кривой упрочнения $\sigma_S = f(\epsilon)$ сплавов, имеющих максимум, зависимостью вида $\sigma_S = a \exp(b\epsilon + c\epsilon^2)$ (при заданной скорости деформации). Построить график аппроксимирующей функции и сравнить с экспериментальными данными. Варианты заданий приведены в табл. 5.9.

Задание N 13. Используя метод термомеханических коэффициентов и метод объемных коэффициентов, определить среднее по сечению заготовки значение $\bar{\sigma}_S$ при сортовой прокатке трапециидальной полосы из сплава АМц (графики зависимостей K_ϵ , K_θ и K_ξ приведены на рис. 3.2). Размеры заготовки и полосы приведены в табл. 5.10. Распределение температуры в поперечном сечении заготовки после деформации – на рис. 5.7. Диаметр валка – 500 мм. Скорость прокатки $v_1 = 5$ м/с.

Таблица 5.7

Данные для выполнения заданий N 8 – N 10

Вариант	Задание N 8		Задание N 9		Материал	Задание N 10			t_n, c			
	$\theta, ^\circ C$	ξ, c^{-1}	$\epsilon, \%$	$\theta, ^\circ C$		ξ, c^{-1}	$\theta, ^\circ C$	$h_0, мм$		ψ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	700	18	20	1200	0,01	7	800	250	0,2	11	20	
2		6	20				900	300				25
3		1,8	20				1000	350				
4	800	18	40	1100	10	45	1100	400	0,25	0,005	30	
5		6	40				1200	450				35
6		18	20				800	450				
7	900	6	20	1000	10	9XC	900	400	0,2	0,005	25	
8		1,8	20				1000	350				30
9		18	40				1100	300				
10	900	6	40	1000	100	40X	1200	250	0,2	0,005	40	
11		18	20				800	250				20
12		6	20				900	300				
13	900	1,8	20	1000	1	40X	1000	350	0,2	0,005	30	
14		18	40				1100	400				35
15		6	40				1200	450				

Окончание табл. 5.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
16		18	20		0,01		800	450			20
17		6	20		10		900	400			25
18	1000	1,8	20	900	1	45	1000	350	0,25	0,003	30
19		18	40		10		1100	300			35
20		6	40		100		1200	250			40
21		18	20		0,01		800	250			20
22		6	20		10		900	300			25
23	1100	1,8	20	800	1	9XC	1000	350	0,2	0,003	30
24		18	40		10		1100	400			35
25		6	40		100		1200	450			40

46

Данные для выполнения задания N 11 [14]

Таблица 5.8

Вариант	Материал	$\xi, \text{с}^{-1}$	Сопротивление деформации (в МПа) при температуре, °С																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
			50	100	150	200	250	300	350	400	450	500																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500

Окончание табл. 5.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
6	АМц в дефор-мирован-ном состоянии	0,5	95	93	88	81	71	60	48	35	23	11
7		2,0	98	97	93	86	77	67	53	41	30	20
8		4,0	99	98	96	90	81	72	60	48	38	29
9		8,0	97	97	94	89	82	73	64	54	45	36
10		16,0	89	89	87	82	75	67	59	50	41	34
11	АК6 в литом состоянии	0,5	139	125	115	107	100	91	72	54	37	21
12		2,0	139	126	116	109	103	96	78	60	45	28
13		4,0	137	126	117	111	106	100	85	69	53	36
14		8,0	134	124	117	112	108	103	95	81	66	42
15		16,0	141	130	123	118	113	107	99	86	67	41
16	АК6 в дефор-мирован-ном состоянии	0,5	169	149	132	117	102	59	26	23	7	4
17		2,0	155	138	124	111	100	58	27	26	9	8
18		4,0	142	128	116	106	97	67	39	38	22	21
19		8,0	129	118	110	104	99	95	80	58	64	62
20		16,0	145	133	123	116	111	106	102	96	89	80
21	В95 в дефор-мирован-ном состоянии	0,5	232	188	157	137	123	94	68	48	35	20
22		2,0	220	177	148	129	116	103	77	58	44	15
23		4,0	211	170	144	126	115	105	93	73	52	13
24		8,0	213	176	152	137	127	119	108	91	63	23
25		16,0	243	210	189	175	165	154	140	118	85	36

47

Профиль заготовки и полосы разделить на 6 участков, для которых необходимо определить степень, скорость и температуру деформации.

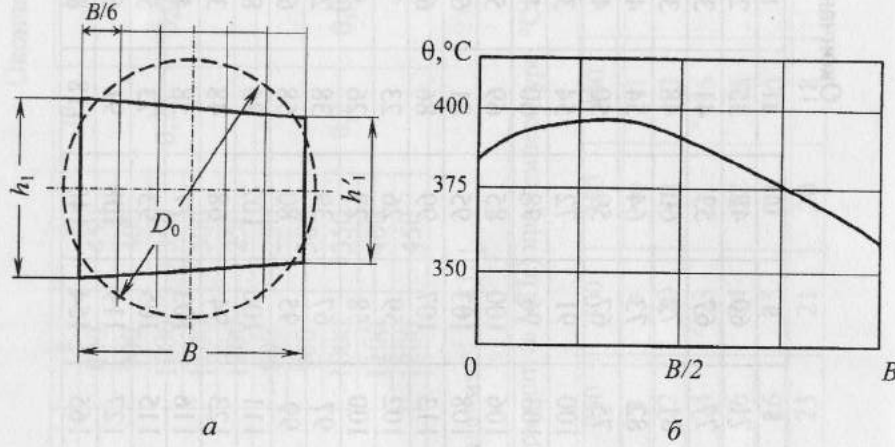


Рис. 5.7. Профиль поперечного сечения заготовки и полосы (а) и распределение температуры по поперечному сечению заготовки (б)

Задание N 14. Пористая заготовка с начальной плотностью ρ_0 деформируется в закрытом штампе диаметром D_0 (начальная высота заготовки h_0), см. рис. 3.5. Определить максимальное абсолютное Δh и относительное обжатие ϵ при получении заготовки с плотностью 0,95 от плотности компактного металла.

Построить графики изменения текущей плотности заготовки и сопротивления деформации в зависимости от степени объемной деформации ϵ . Варианты заданий приведены в табл. 5.10.

Данные для выполнения задания N 12 [8]

Таблица 5.9

Вариант	Материал	Состояние	$\theta, ^\circ\text{C}$	ξ, c^{-1}	Сопротивление деформации в МПа при степени деформации ϵ														
					0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,3	0,35	0,40							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13							
1			600	10	260	300	330	335	336	325	320	315							
2	Бериллиевая бронза БрБ2		650	10	200	230	240	250	255	257	252	250							
3			700	10	182	200	210	215	218	220	218	215							
4			750	10	182	190	195	195	190	190	185	180	172						
5			800	10	150	165	168	164	160	156	153	150							
6			850	10	132	140	138	135	130	122	120	115							
7			850	750	670	750	776	780	740	700	650	600							
8			900	750	500	580	589	572	550	531	494	450							
9	ВТЗ-1		950	750	370	450	440	423	410	400	380	360							
10			1000	750	300	360	360	350	340	320	300	270							
11			1050	750	260	320	300	280	260	240	220	200							
12			-75	30	420	429	440	445	450	455	435	420							
13	Высоко-чистый цинк 99,99 %		0	30	310	340	355	365	370	370	355	340							
14			75	30	190	230	255	280	283	270	253	225							
15			150	30	160	180	210	226	230	214	180	150							
16			225	30	115	120	125	120	110	100	87	75							

Окончание табл. 5.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
17	Магний 99,9%	После прес- сования, холодного волочения и отжига	18	2,5	150	308	325	320	277	250	230	220	
18			200	2,5	130	150	168	180	180	170	150	130	
19			250	2,5	60	79	95	106	106	106	100	93	85
20			300	2,5	56	74	84	85	85	82	80	75	70
21			350	2,5	35	50	58	58	65	63	60	55	50
22	ХН56ВМ ТЮ	-	1100	5·10 ⁻¹	140	165	173	165	158	153	145	140	
23			1100	1	210	240	250	245	238	227	212	200	
24			1100	10	295	310	315	320	315	310	295	280	
25			1100	50	330	355	367	370	375	370	360	348	

Данные для выполнения заданий N 13 и N 14

Вариант	Задание N 13			Задание N 14										
	D ₀ , мм	B, мм	h ₁ , мм	h ₁ ', мм	Матери- ал	ρ ₀ , г/см ³	ρ _K , г/см ³	σ _{S0} , МПа	a, МПа	m	D ₀ , мм	h ₀ , мм		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
1	120	110	90	62	Алюми- ний АПС1	1,80	2,70	60	6,4	0,62	30	30		
2	120	110	85	67		1,85							40	40
3	120	110	80	72		1,90							45	45
4	120	112	85	64		1,95							50	50
5	120	112	90	60		2,00							55	55

Таблица 5.10

Окончание табл. 5.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
6	110	100	75	65	Медь МП1	6,20	8,96	75	56	0,41	30	30		
7	110	100	80	60		6,25							40	40
8	110	105	74	60		6,30							45	45
9	110	105	62	72		6,35							50	50
10	110	105	65	70	6,40	4,50	500	67	0,36	30	30			
11	100	90	72	65	3,00							55	55	
12	100	90	70	62	3,10							40	40	
13	100	90	74	58	3,20							45	45	
14	100	95	67	58	3,30	Титан	4,50	250	50	50	50			
15	100	95	65	60	3,40							55	55	
16	90	85	65	50	5,40							30	30	
17	90	85	67	48	5,45							40	40	
18	90	80	74	48	Железо ПЖ2М1	5,50	7,87	50	0,56	50	50			
19	90	80	72	50		5,55						45	45	
20	90	80	67	55		5,60						50	50	
21	80	75	57	42		11,0						55	55	
22	80	75	59	40	11,5	Тантал	16,6	50	0,54	30	30			
23	80	70	56	50	12,0							40	40	
24	80	70	48	58	12,5							45	45	
25	80	70	61	45	13,0							50	50	

Задание N 15. Построить график распределения σ_S , в МПа, вдоль продольного сечения слитка массой 5 т из белого доэвтектического чугуна заданного химического состава (с учетом ликвации при затвердевании основных легирующих элементов: углерода и хрома). Варианты заданий приведены в табл. 5.12. Сопrotивление деформации белого чугуна определяется по формуле [13] (для $850 \leq \theta \leq 1050^\circ\text{C}$ и $0,04 \leq \varepsilon \leq 0,40$), кг/мм^2 :

$$\ln \sigma_S = \ln \sigma_{S0} + A \frac{\theta - 950}{100} + B \frac{\varepsilon - 20}{16},$$

где β_i – эмпирические коэффициенты (табл. 5.11);
 $[C]$, $[Cr]$, $[Ni]$, $[Mo]$ и $[V]$ – содержание, в %, углерода, хрома, никеля, молибдена и ванадия в чугуне (см. рис. 5.8);
 A и B – эмпирические коэффициенты (см. табл. 5.10);
 θ и ε – температура и степень деформации;
 $\ln \sigma_{S0} = \beta_0 + \beta_1[C] + \beta_2[Cr] + \beta_3[Ni] + \beta_4[Mo] + \beta_5[V]$ – функция химического состава чугуна.

Таблица 5.11

Система легирования	A	B	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5
C-Cr-Ni	-0,56	0,45	2,40	0,17	0,22	-0,13	-	-
C-Cr-Mo	-0,64	0,40	2,61	0,05	0,18	-	0,065	-
C-Cr-V	-0,58	0,37	2,59	0,07	0,22	-	-	0,02
C-Cr-Ni-V	-0,63	0,49	2,53	0,15	0,15	-0,07	-	0,18
C-Cr-Ni-Mo	-0,57	0,39	2,43	0,13	0,13	-0,18	0,08	-
C-Cr-V-Mo	-0,61	0,41	2,57	0,09	0,16	-	0,032	0,08
C-Cr-Ni-V-Mo	-0,56	0,41	2,60	0,19	0,14	-0,124	0,20	0,08

Рис. 5.8. Содержание углерода и хрома вдоль продольного сечения слитка из белого чугуна (точками отмечены места отбора проб на химический анализ)

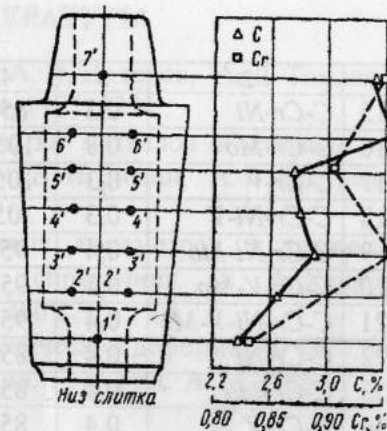


Таблица 5.12

Данные для выполнения задания N 15

Вариант	Система легирования чугуна	ε	$\theta, ^\circ\text{C}$	Содержание Ni, %	Содержание Mo, %	Содержание V, %
1	2	3	4	5	6	7
1	C-Cr-Ni	0,3	900	0,5	-	-
2	C-Cr-Mo	0,3	900	-	0,5	-
3	C-Cr-V	0,3	900	-	-	0,2
4	C-Cr-Ni-V	0,3	1000	0,5	-	0,2
5	C-Cr-Ni-Mo	0,3	1000	0,5	0,5	-
6	C-Cr-V-Mo	0,3	1000	-	0,5	0,2
7	C-Cr-Ni-V-Mo	0,4	900	0,5	0,5	0,2
8	C-Cr-Ni	0,4	900	0,2	-	-
9	C-Cr-Mo	0,4	900	-	0,2	-
10	C-Cr-V	0,4	1000	-	-	0,2
11	C-Cr-Ni-V	0,4	1000	0,2	-	0,2
12	C-Cr-Ni-Mo	0,4	1000	0,2	0,2	-
13	C-Cr-V-Mo	0,3	850	-	0,2	0,2
14	C-Cr-Ni-V-Mo	0,3	850	0,2	0,2	0,2

Окончание табл. 5.12

1	2	3	4	5	6	7
15	C-Cr-Ni	0,3	850	0,4	-	-
16	C-Cr-Mo	0,3	1050	-	0,4	-
17	C-Cr-V	0,3	1050	-	-	0,15
18	C-Cr-Ni-V	0,3	1050	0,4	-	0,15
19	C-Cr-Ni-Mo	0,4	950	0,4	0,4	-
20	C-Cr-V-Mo	0,4	950	-	0,4	0,15
21	C-Cr-Ni-V-Mo	0,4	950	0,4	0,4	0,15
22	C-Cr-Ni	0,4	850	0,3	-	-
23	C-Cr-Mo	0,4	850	-	0,3	-
24	C-Cr-V	0,4	850	-	-	0,15
25	C-Cr-Ni-V	0,4	950	0,3	-	0,15

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория прокатки: справочник / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин [и др.] – М.: Металлургия, 1982. 335 с.
2. Зюзин В. И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: справочник / В. И. Зюзин, А. В. Третьяков. Челябинск: Металл, 1993. 368 с.
3. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справочник / А. Хензель, Т. Шпиттель. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
4. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
5. Ефимов В. Н. Сопротивление деформации в процессах прокатки / В. Н. Ефимов, М. Я. Бровман. М.: Металлургия, 1996. 254 с.
6. Решение технологических задач ОМД на микро-ЭВМ / В. Л. Колмогоров, С. И. Паршаков, С. П. Буркин [и др.]; под ред. В. Л. Колмогорова и С. И. Паршакова. М.: Металлургия, 1993. 320 с.
7. Ковка и штамповка: Справочник: в 4 т. Листовая штамповка / под ред. А. Д. Матвеева. М.: Машиностроение, 1987. Т.4. 544 с.
8. Аркулис Г. Э. Теория пластичности / Г. Э. Аркулис, В. Г. Дорогобид. М.: Металлургия, 1987. 352 с.
9. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. М.: Высшая школа, 1988. 239 с.
10. Пластичность и разрушение / В. Л. Колмогоров, А. А. Богатов, Б. А. Мигачев [и др.]; под ред. В. Л. Колмогорова. М.: Металлургия, 1977. 336 с.
11. Хайкин Б. Е. Аппроксимация эмпирических зависимостей в условиях обработки металлов давлением / Б. Е. Хайкин. Свердловск: Изд-во УПИ им. С.М.Кирова, 1984. 61 с.
12. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
13. Соколов Л. Д. Сопротивление металлов пластической деформации / Л. Д. Соколов. М.: Металлургиздат, 1963. 284 с.
14. Микляев П. Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением: справочник / П. Г. Микляев. М.: Металлургия, 1994. 288 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ

Для расчета средней по очагу деформации скорости деформации используются приближенные формулы [6]:

- при осадке (ковке и штамповке) $\xi_{\text{ср}} = v_{\text{деф}}/h_{\text{ср}}$,

где $v_{\text{деф}}$ – скорость деформирования или скорость движения бойка или штампа (на гидравлическом прессе $v_{\text{деф}}=0,03 - 0,06$ м/с; кривошипном прессе – 1 – 5 м/с; фрикционном прессе – 2 – 10 м/с; паровоздушном молоте – 10 – 250 м/с; высокоскоростном молоте – свыше 100 м/с); $h_{\text{ср}}$ – средняя высота деформируемой заготовки;

- при плоской и сортовой прокатке $\xi_{\text{ср}} = k \frac{v_1 \Delta h}{\sqrt{R \cdot \Delta h \cdot h_0}}$,

где v_1 – скорость выхода металла из валков;
 R – радиус валка;
 Δh – обжатие заготовки;
 h_0 – высота сечения металла перед входом в валки;
 k – коэффициент, учитывающий форму калибра ($k=1$ для гладкой бочки; $k=1,5$ для ромбических и квадратных калибров; $k=1,33$ для овальных калибров);

- при прокатке и обкатке труб $\xi_{\text{ср}} = \pi \ln \lambda \cdot v \cdot D_{\text{ТР}}/Lb$,

где $L = \epsilon h_0 / \text{tg } \varphi$ – длина зоны контакта с учетом вытяжки;
 $b = \sqrt{R_{\text{ТР}} \Delta h}$ – ширина зоны контакта;
 $R_{\text{ТР}} = 2R\rho / (R + \rho)$ – приведенный радиус;
 $D_{\text{ТР}} = 2R$ – внутренний диаметр трубы (диаметр оправки);
 ρ – радиус роликов;
 φ – угол наклона роликов;
 v – линейная скорость вращения роликов;

- при прессовании и волочении прутков $\xi_{\text{ср}} = \frac{6v_1 \ln \lambda \cdot \text{tg } \alpha}{(\lambda \sqrt{\lambda} - 1) d_1}$,

где λ – вытяжка, $\lambda = F_0/F_K$;

α – угол конусности матрицы (волоки);

v_1 – скорость выхода металла из инструмента;

d_1 – диаметр прутка после деформации;

- при кручении стержня круглого сечения $\xi_{\text{ср}} = \frac{R}{\sqrt{3}l_0} \frac{d\Theta}{dt}$,

где R – средний радиус образца;

l_0 – расчетная длина образца;

Θ – угол закручивания;

$d\Theta/dt$ – скорость деформирования.

Средняя скорость деформации для процессов горячей обработки давлением приведена в табл. П 1.

Таблица П 1.1
 Средняя скорость деформации для процессов горячей обработки металлов давлением

Процесс обработки		$\xi_{\text{ср}}, \text{c}^{-1}$
Прокатка	блужинги и слябинги	0,1 – 10
	широкополосные станы	≤500
	толстолистовые станы	1 – 15
	крупно- и среднесортные станы	0,5 – 250
	мелкосортные и проволочные станы	≤500
	непрерывные листовые и проволочные станы	до 100 ÷ 500
Изотермическое деформирование		$10^{-3} - 10^{-2}$
Прессование (выдавливание)		$10^{-2} - 10$
Волочение		$10 - 10^2$
Ковка и штамповка	гидравлический пресс	0,03 – 0,06
	кривошипный пресс	1 – 5
	фрикционный пресс	2 – 10
	паровоздушный молот	10 – 250
	высокоскоростной молот	свыше 100

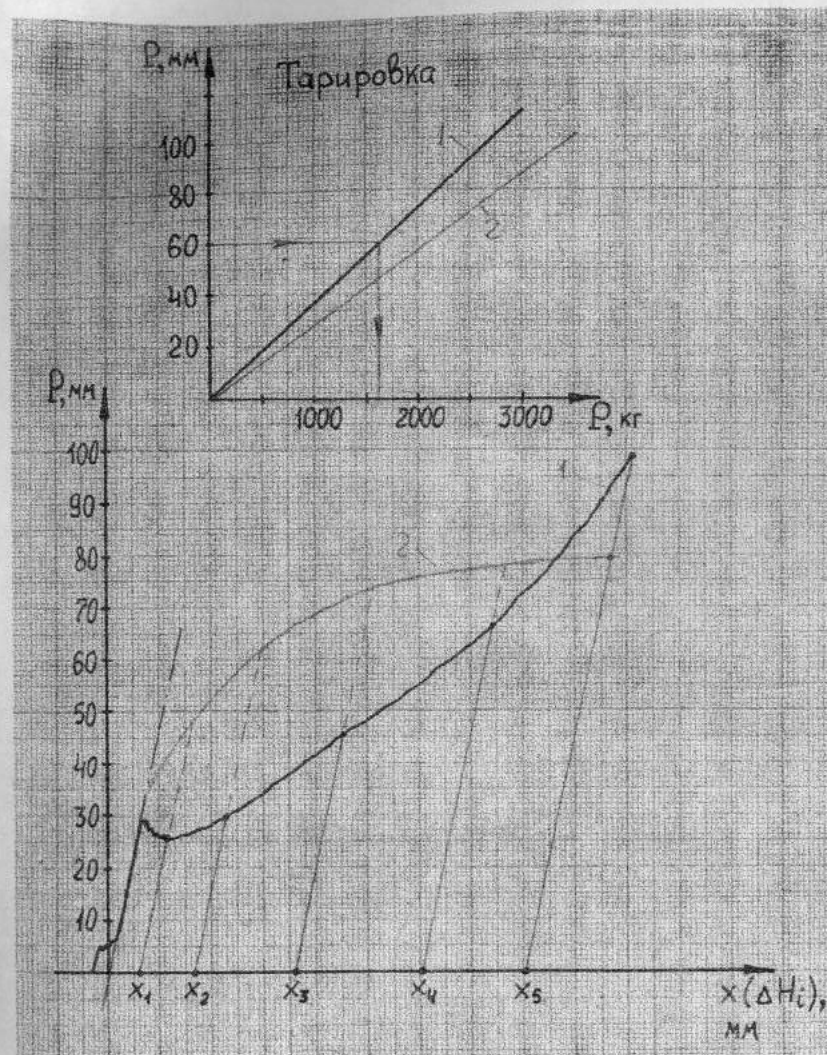
ЛИНЕАРИЗУЮЩИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Таблица П 2.1

Функции и линеаризующие преобразования

Функции $y = f(x)$	Линеаризующие преобразования			
	переменных		коэффициентов	
	y'	x'	a'	b'
$y = a + bx$	y	x	a	b
$y = a + b/x$	y	$1/x$	a	b
$y = 1/(a + bx)$	$1/y$	x	a	b
$y = x/(a + bx)$	x/y	x	a	b
$y = ab^x$	$\ln y$	x	$\ln a$	$\ln b$
$y = a \exp(bx)$	$\ln y$	x	$\ln a$	b
$y = 1/(a + b \exp(-x))$	$1/y$	$\exp(-x)$	a	b
$y = ax^b$	$\ln y$	$\ln x$	$\ln a$	b
$y = a + b \ln x$	y	$\ln x$	a	b
$y = a/(b + x)$	$1/y$	x	b/a	$1/a$
$y = ax/(b + x)$	$1/y$	$1/x$	b/a	$1/a$
$y = a \exp(b/x)$	$\ln y$	$1/x$	$\ln a$	b
$y = a + bx^q$	y	x^q	a	b

ИНДИКАТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ



Учебное издание

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Составители:

БАБАЙЛОВ Николай Александрович
БУРКИН Сергей Павлович

Редактор *О. С. Смирнова*

Компьютерный набор: *Н. А. Бабайлов*

Подписано в печать 01.06.2010

Формат 60×84 1/16

Бумага писчая

Плоская печать

Усл. печ. л. 3,49

Уч.-изд. л. 2,60

Тираж 50 экз.

Заказ 536

Редакционно-издательский отдел УрФУ

620002, Екатеринбург, Мира, 19

rio@mail.ustu.ru

Ризография НИЧ УрФУ

620002, Екатеринбург, Мира, 19