

**СУЧАСНІ АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ СТАНІВ
ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ**
методичні вказівки до виконання практичних робіт з
дисципліни

**«СУЧАСНІ ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ
ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА»**

(для студентів спеціальності 136 Металургія усіх форм
навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти)

Практична робота 1
**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА БЕЗПЕРЕРВНИХ
ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ**

Рекомендовано Науково-методичною
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол No 1 від «22» вересня 2023 р.)

Обов'язково до розміщення в репозитарії



Сучасні аспекти проектування станів холодної прокатки (для студентів спеціальності 136 Металургія усіх форм навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти) : Загальна характеристика безперервних процесів обробки металів тиском / Укладач Т. О. Кулік. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА». 2023. 36 с.

В методичних вказівках з погляду сучасних аспектів прокатного виробництва розглянуто основи теорії обробки металів тиском, пластичної деформації та теорії прокатки. Згідно з розбивкою матеріалу за темами практичних робіт, які виконують студенти при вивченні дисципліни "Сучасні техніко-технологічні аспекти прокатного виробництва", наведено теоретичні відомості, приклади вирішення задач та задачі для самостійного вирішення по темі першого практичного заняття «Загальна характеристика безперервних процесів обробки металів тиском».

Рекомендовано для студентів спеціальності 136 Металургія усіх

Самостійне електронне текстове мережеве видання

Затверджено на засіданні кафедри металургії, матеріалознавства та організації виробництва
Протокол №1 від «22» вересня 2023 р.

Узгоджено:
Секретар Редакційної ради

_____ Малій Х. В.
«07» вересня 2023 р.

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2023



ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 НАПРУЖЕНИЙ СТАН ТА ВЕЛИКІ ПЛАСТИЧНІ ДЕФОРМАЦІЇ	5
1.1 Короткі теоретичні відомості	5
1.2 Приклади розв'язання задач	13
2 СЕРЕДНЯ ШВИДКІСТЬ ДЕФОРМАЦІЇ	17
2.1 Короткі теоретичні відомості	17
2.2 Приклади розв'язання задач	19
3 ОСНОВНІ ЗАКОНИ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ	22
3.1 Короткі теоретичні відомості	22
3.2 Контрольні питання	26
ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ВИРІШЕННЯ	27
ЛІТЕРАТУРА	36



ВСТУП

Сучасні прокатні цехи являють собою великий і складний комплекс машин та агрегатів, що забезпечують виконання безперервного технологічного процесу, та успішна робота яких неможлива без кваліфікованого персоналу.

Виробництво прокату високої якості зумовлює глибоке розуміння обслуговуючим персоналом сутності теоретичних основ обробки металів тиском та здійснення технології процесу прокатки. Це не меншою мірою стосується і фахівців, які займаються проектуванням прокатного обладнання.


При проектуванні технологічних процесів прокатки доводиться вирішувати цілий комплекс питань, пов'язаних зі знаходженням раціональних умов виконання конкретної операції. У технічному відношенні ці умови виражають через певні параметри, що характеризують цей процес. Ці параметри вважають основними технологічними параметрами процесу прокатки. До основних технологічних параметрів відносять такі:

- допустима ступінь деформації в аналізованій операції. Знання допустимого ступеня деформації дозволяє розрахувати раціональне число та послідовність проходів прокатки;
- оптимальні розміри та форми заготівлі. Правильний вибір розмірів та форми заготівлі дає можливість зменшити об'єм ручних та довідкових робіт або повністю ліквідувати їх;
- раціональний температурно-швидкісний режим обробки;
- силові параметри (зусилля, робота, потужність), необхідні для вибору параметрів обладнання.

Слід зазначити, більшість параметрів взаємопов'язані і впливають один на одного. Це говорить про необхідність комплексного вивчення всіх питань, які стосуються розробки оптимальних режимів технологічного процесу виготовлення виробу.

Для знаходження основних технологічних параметрів необхідно знання полів розподілу напруг і деформацій по осередку деформацій або по всьому об'єму деформованого тіла, у тому числі і на контактній поверхні між інструментом і тілом, що деформується.

У даному навчальному посібнику розглянуто питання першої частини курсу «Сучасні техніко-технологічні аспекти прокатного виробництва»: теоретичні засади пластичної деформації, класифікація прокатних станів та процесів прокату, сталі та сплави для прокатки, основи процесу прокатки.



ПРАКТИЧНА РОБОТА 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА БЕЗПЕРЕРВНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

1 НАПРУЖЕНИЙ СТАН ТА ВЕЛИКІ ПЛАСТИЧНІ ДЕФОРМАЦІЇ

1.1 Короткі теоретичні відомості

Напружений стан визначає характер пластичного перебігу металів. Однією з основних завдань теорії пластичності є визначення напруженого стану та зусиль у процесах пластичного формоутворення металів.

Сили та напруження. Сили та напруження є основними величинами, що розглядаються в теорії пластичності. *Сила* характеризується спрямованим відрізком, який називається вектором. Подібно до наведеного геометричного поняття вектора можна дати і його алгебраїчне визначення: вектор - впорядкована сукупність трьох дійсних чисел (компонент), які при переході від однієї системи координат до іншої змінюються за законом косинусів.

Напруження на фіксованій елементарній площадці визначається вектором, величина якого дорівнює відношенню нескінченно малого вектора сили до площі цієї площадки. Напруження в точці, що розглядається, характеризується сукупністю трьох векторів напружень, прикладених до трьох взаємно перпендикулярних площин, що проходять через розглянуту точку і утворює фіксований координатний триєдр. Так як кожен із зазначених трьох векторів напружень може бути розкладений за трьома напрямками, паралельними координатним осям, то напружений стан у точці характеризується дев'ятьма компонентами - трьома нормальними напруженнями $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ і шістьма дотичними $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zx}, \tau_{zy}$, які при переході від однієї системи координат до іншої змінюються за законом попарних добутків косинусів. Такі величини називають *тензорами другого рангу*.

Вектор є *тензор першого рангу*. Величини, які не змінюються при переході від однієї системи до іншої, такі як температура, щільність та інші є *тензорами нульового рангу* і називаються *скалярами* або *інваріантами*.

Тензор напружень є матрицею:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$



Перший індекс вказує напрямок нормалі до площини, другий – напрямком осі координат. Компоненти тензорів напружень зображують відрізками, спрямованими по відповідних осях координат.

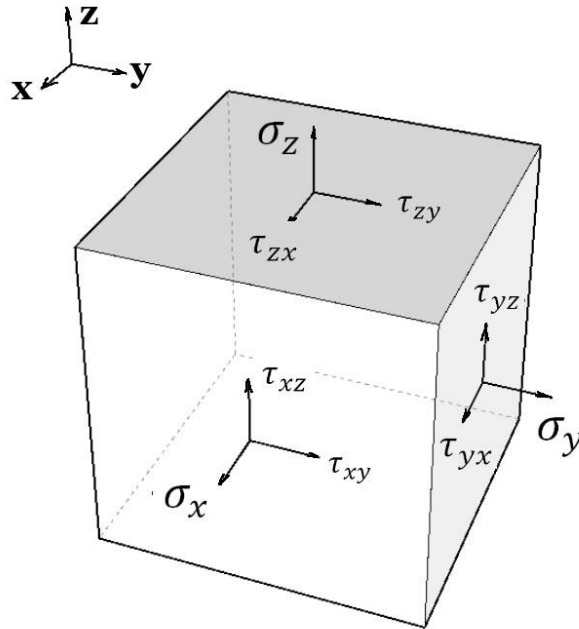


Рисунок 1.1 - Напруження, прикладені до деформованого елемента

На рис. 1.1 показаний елемент тіла, що деформується, з прикладеними до нього компонентами тензора напружень. Розтягуючі нормальні компоненти напружень вважаються позитивними, стискаючі - негативними. Якщо напрямок зовнішньої нормалі до розглянутої площадки збігається з напрямком осі координат, то позитивні напрямки дотичних компонент збігаються з позитивними напрямками осей координат. Якщо напрям зовнішньої нормалі протилежний напрямку осі координат, то й позитивні напрямки дотичних компонентів напружень протилежні напрямкам осей координат.

З умови рівноваги елемента тіла випливає, що симетричні компоненти дотичних напружень рівні між собою:

$$\tau_{ij} = \tau_{ji}.$$

Тензор:

$$\sigma'_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_x - \sigma_m & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y - \sigma_m & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z - \sigma_m \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

називається девіатором напружень, де $\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$ - середнє норма-



льне напруження.

Головні та октаедричні напруження та інтенсивність напружень. У будь-якій точці напруженого тіла є три взаємно перпендикулярні майданчики, до яких прикладені лише нормальні напруження, а дотичні напруження дорівнюють нулю. Ці нормальні напруження називають *головними нормальними напруженнями* і позначаються $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. На площадках, які ділять навпіл кути між головними нормальними напруженнями, дотичні напруження набувають екстремального значення. Ці екстремальні напруження називаються *головними дотичними напруженнями*; величини їх рівні:

$$\tau_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}; \tau_2 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}; \tau_3 = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}. \quad (1.3)$$

В теорії пластичності важливе значення мають напруження в площинах, рівнонахильних до основних осей нормальних напружень. Так як ці площини паралельні граням правильного восьмигранника, то напруження, що діють на них, називаються октаедричними.

Величини нормального σ_0 і дотичного τ_0 октаедричних напружень дорівнюють:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \sigma_m; \quad (1.4)$$

$$\tau_0 = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{2}{3} \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2}. \quad (1.5)$$

Поряд з дотичним октаедричним напруженням застосовують іншу інваріантну величину – інтенсивність напружень або *еквівалентне напруження* σ_e яке відрізняється від октаедричного дотичного напруження тільки постійним множником:

$$\sigma_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \tau_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (1.6)$$

Застосовувати цю величину зручно, тому що у випадках простого розтягування або стиску вона дорівнює величині відповідного одновісного напруження.

Великі пластичні деформації. У процесах обробки металів тиском відбуваються великі деформації, які пов'язано зі значними змінами розмірів тіла, що деформується. Для опису великих деформацій застосовують такі показники: абсолютні, відносні та логарифмічні деформації, а



також коефіцієнти деформації.

Для розрахунку показників пластичної деформації розглянемо прямокутний паралелепіпед з ребрами, паралельними головним осям деформації 1, 2, 3 (рис. 1.2). Початкові розміри тіла до пластичної деформації X, Y, Z . Кінцеві розміри після пластичної деформації x, y, z .

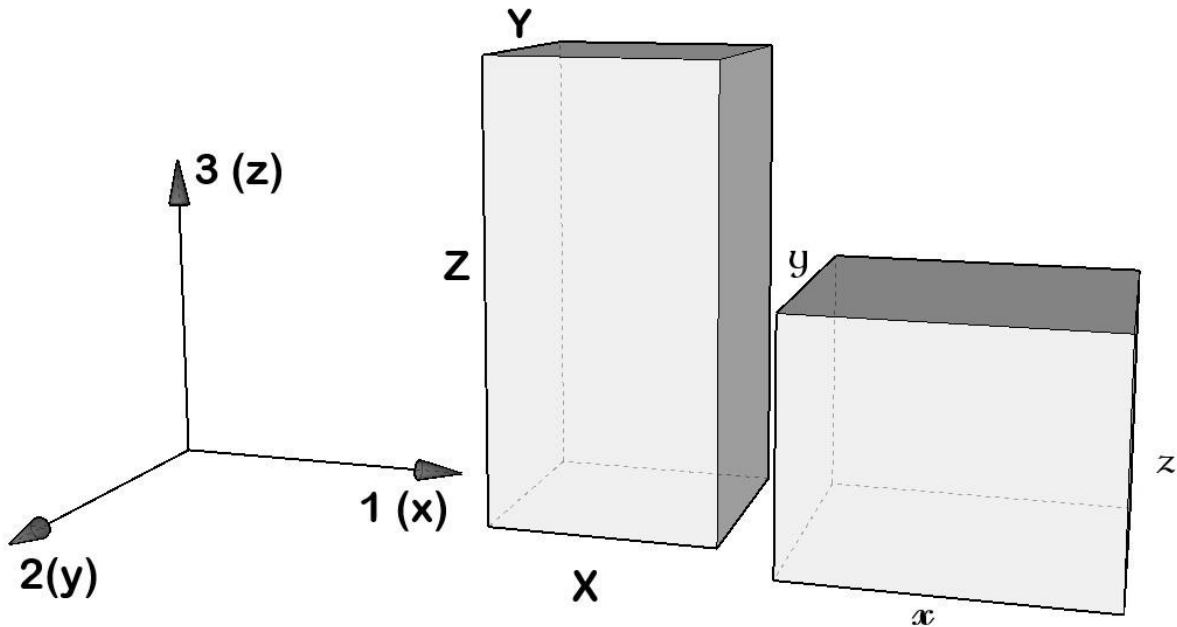


Рисунок 1.2 - Схема до розрахунку абсолютних та відносних деформацій

Абсолютна деформація знаходиться як різниця між кінцевими та початковими розмірами тіла у напрямку головних осей координат $1(x)$, $2(y)$, $3(z)$:

$$\Delta X = x - X, \Delta Y = y - Y, \Delta Z = z - Z. \quad (1.7)$$

Вона може бути як позитивною, так і негативною, залежно від того, відбувається збільшення або зменшення розмірів тіла, що деформується.

Відносна деформація за Лагранжем визначається як відношення абсолютної деформації до початкового розміру тіла.

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{X} = \frac{x-X}{X}, \varepsilon_y = \frac{\Delta Y}{Y} = \frac{y-Y}{Y}, \varepsilon_z = \frac{\Delta Z}{Z} = \frac{z-Z}{Z} \quad (1.8)$$

Тут позитивна величина деформації відповідає розтягуванню, а негативна – стиску. Показники деформації можуть бути виражені у відсотках. Негативна деформація змінюється не більше $[0, -1)$, позитивна не

більше $[0, +\infty)$. Індекси x, y, z позначенні деформації показують до якої осі її розглядають.

Відносна деформація за Ейлером визначається як відношення абсолютної деформації до кінцевого розміру тіла.

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta X}{x}, \varepsilon_y = \frac{\Delta Y}{y}, \varepsilon_z = \frac{\Delta Z}{z} \quad (1.9)$$

Логарифмічні деформації розміряємо на прикладі осаду тіла у вигляді прямокутного паралелепіпеда з початкової висоти Z_0 до кінцевої висоти Z (рис. 1.3). Припустимо, що у якийсь час висота тіла дорівнює Z , а нескінченно мале зменшення його висоти дорівнює dZ . Тоді нескінченно мала деформація у бік осі Z .

$$de_z = \frac{dz}{z} \quad (1.10)$$

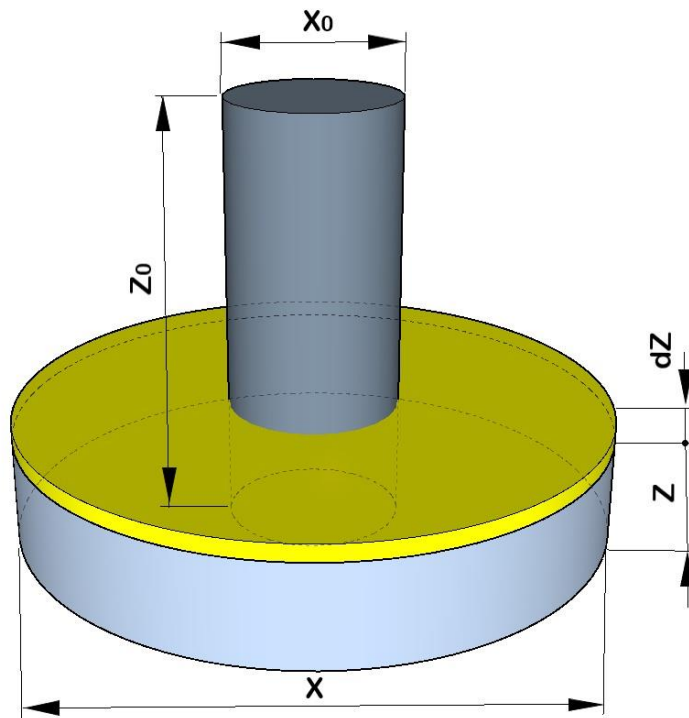


Рисунок 1.3 - Схема до розрахунку логарифмічних деформацій

Логарифмічна деформація при осаді тіла від Z_0 до Z виражається певним інтегралом:

$$e_z = \int_{Z_0}^Z \frac{dZ}{Z} = \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (1.11)$$

Розглядаючи деформацію паралелепіпеда з вихідними розмірами X_0, Y_0, Z_0 та кінцевими розмірами X, Y, Z , можна аналогічно визначити деформації у напрямок осей координат x та y :

$$e_x = \ln \frac{X}{X_0}, e_y = \ln \frac{Y}{Y_0} \quad (1.12)$$

Таким чином, логарифмічні деформації є результатом підсумовування нескінченно малих деформацій, тому їх часто називають істинними деформаціями.

Логарифмічні деформації мають властивість адитивності. При виконанні деформацій у кілька етапів їх можна складати при розрахунку сумарної деформації:

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

Відносні деформації по Лагранжу та логарифмічні деформації пов'язані між собою співвідношеннями:

$$\begin{aligned} e_x &= \ln \frac{X}{X_0} = \ln \frac{X_0 + \Delta X}{X_0} = \ln(1 + e_x), \\ e_y &= \ln \frac{Y}{Y_0} = \ln \frac{Y_0 + \Delta Y}{Y_0} = \ln(1 + e_y), \\ e_z &= \ln \frac{Z}{Z_0} = \ln \frac{Z_0 + \Delta Z}{Z_0} = \ln(1 + e_z). \end{aligned} \quad (1.13)$$

Коефіцієнти деформації визначаються через відношення розмірів тіла після деформації до відповідних розмірів до деформації.

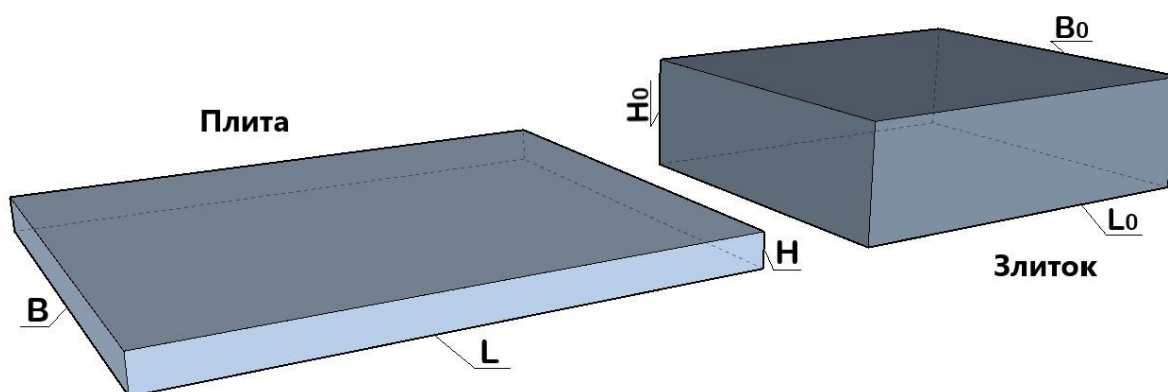


Рисунок 1.4 - Зміна розмірів заготовки внаслідок прокатки

Щодо процесу прокатки коефіцієнти деформації за рис. 1.4 наступні:

- коефіцієнт обтиснення $\eta = \frac{H}{H_0}$;
- коефіцієнт розширення $\beta = \frac{B}{B_0}$;
- коефіцієнт витяжки $\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{F_0}{F}$,

де $F_0 = B_0 H_0$, $F = B \cdot H$.

Умова сталості об'єму (умова нестискання) використовується при розрахунках розмірів заготівлі для виготовлення виробів тиском. За умовою сталості об'єму при осаді прямокутного паралелепіпеда (рис. 1.2) отримуємо:

$$\frac{XYZ}{X_0 Y_0 Z_0} = 1. \quad (1.14)$$

Після логарифмування отримаємо рівняння, що описує умову сталості об'єму:

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

Або

$$e_x + e_y + e_z = 0. \quad (1.15)$$

З рівняння випливає, що одна з трьох логарифмічних деформацій при осаді або розтягу тіла має знак, протилежний двом іншим.

Умова сталості об'єму $(XYZ)/(X_0 Y_0 Z_0) = 1$ після підстановки коефіцієнтів деформації має вигляд:

$$\alpha \cdot \beta \cdot \lambda = 1. \quad (1.16)$$

Визначення числа переходів у ряді процесів обробки металів тиск, зокрема таких як прокатка, вироби одержують за кілька операцій (проходів). Використовуючи умову сталості об'єму, можна отримати формулу для визначення числа переходів, якщо відомий середній коефіцієнт витяжки за прохід λ_c за всю обробку, де F_0 – початковий, F - кінцевий поперечний переріз тіла.

Нехай після 1, 2, ... n проходів поперечний переріз заготовки, що деформується, буде дорівнює F_1, F_2, \dots, F . Тоді коефіцієнти витяжки при окремих операціях становитимуть:

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

Звідки

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

Тоді $F_0 = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n F$ чи $\frac{F_0}{F} = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n$ де n - кількість операцій.

Остаточно

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n \quad (1.17)$$

Якщо прийняти

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = \lambda_c, \text{ то } \lambda_{\Sigma} = \lambda_c^n$$

Після логарифмування отримаємо формулу для розрахунку числа переходів:

$$n = \frac{\ln \lambda_{\Sigma}}{\ln \lambda_c} = \frac{\ln F_0 - \ln F}{\ln \lambda_c} \quad (1.18)$$

Умова сталості секундних об'ємів встановлює взаємозв'язок між швидкістю руху металу V і змінами розмірів поперечного перерізу F заготовки, що деформується, при безперервному режимі обробки тиску. Наприклад, закон сталості секундних об'ємів повинен виконуватися при одночасному прокатуванні заготовки в групі робочих клітей прокатного стану (рис. 1.5).

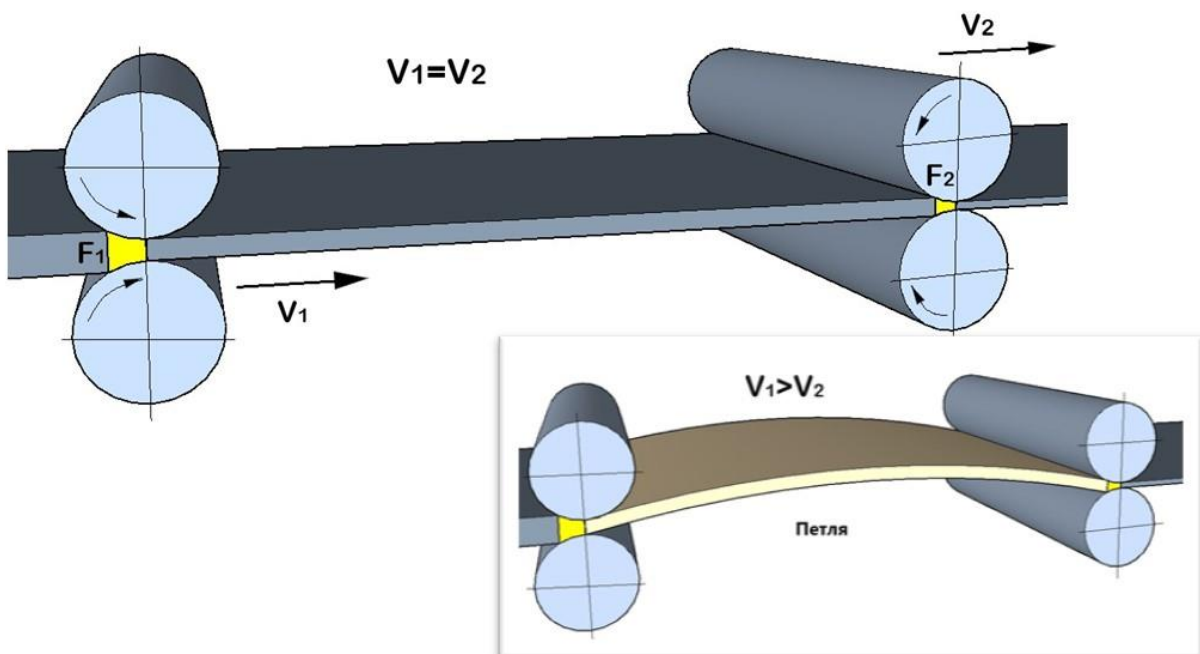



Рисунок 1.5 - Схема одночасної прокатки заготовки у двох робочих клітях

Умова сталості секундних об'ємів формулюється так:

Об'єм металу, що проходить у кожен одиницю часу через пев-



ний перетин вогнища деформації, не змінюється під час переходу від одного перерізу до іншого.

$$V_1 F_1 = V_2 F_2 = V_3 F_3 = \dots = V_n F_n = \text{const} \quad (1.19)$$

В іншому випадку можливий обрив, за умови, що V_2 більше V_1 , або утворення петлі, за V_2 менше V_1 .

Вибір показників пластичної деформації залежить від необхідної точності розрахунку та зручності обчислення. Якщо необхідна велика точність, потрібно використовувати справжні деформації, які, крім найбільшої достовірності результатів, мають ще й властивостями адитивності, тобто їх можна складати коли мова йде про сумарну деформацію при здійсненні кількох проходів.

Однак для процесу прокатки, на відміну від інших процесів обробки тиском, частіше використовують відносну деформацію, виражену через початкову F_0 і кінцеву F площі поперечних перерізів тіла.

$$\varepsilon = \frac{F_0 - F}{F_0} \cdot 100\% \quad (1.20)$$

Величину відносної деформації називають **ступенем деформації**. Згідно з умовою сталості об'єму:

$$F_0 L_0 = F \cdot L \text{ або } F_0 / F = L / L_0.$$

Звідки **інтегральний показник деформації** дорівнює:


$$i = \ln \frac{F_0}{F} = \ln \frac{L}{L_0}. \quad (1.21)$$

1.2 Приклади розв'язання задач

Задача 1.1 Циліндричну заготовку осаджували на молоті за три удари зі ступенем деформації за удар: $e_1 = 0,08$; $e_2 = 0,1$; $e_2 = 0,05$. Визначити висоту заготовки після кожного удару, якщо початкова висота заготовки $h_0 = 150$ мм.

Рішення.

Деформація заготовки при першому ударі молота дорівнює:


$$e_1 = \ln \frac{h_1}{h_0},$$

де h_1 – висота заготовки після першого удару молоту.

Так як при осаді відбувається зменшення розміру вихідної заготовки та рух інструменту відбувається проти осі, то деформація береться зі знаком мінус. Тому, з умови завдання, деформація при першому ударі молота дорівнює $e_1 = -0,08$ тоді:

$$-0,08 = \ln \frac{h_1}{h_0},$$

звідки висота заготовки після першого удару молоту:

$$h_1 = h_0 \cdot e^{e_1},$$

де e - основа натурального логарифму.

Тоді висота заготовки після першого удару молота дорівнює:

$$h_1 = h_0 \cdot e^{e_1} = 150 \cdot e^{-0,08} = 138,46 \text{ мм.}$$

Аналогічно можна розрахувати висоту заготовки після другого та третього ударів:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 \cdot e^{e_2} = 138,46 \cdot e^{-0,1} = 125,29 \text{ мм,} \\ h_3 &= h_2 \cdot e^{e_3} = 125,29 \cdot e^{-0,05} = 119,18 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Можна також одразу визначити висоту заготовки після останнього удару. Для цього визначимо сумарну деформацію:

$$e_{\Sigma} = e_1 + e_2 + e_3 = -0,08 + (-0,1) + (-0,05) = -0,23.$$

Тоді висота заготовки після останнього удару молота дорівнює:

$$h_3 = h_0 \cdot e^{e_{\Sigma}} = 150 \cdot e^{-0,23} = 119,18 \text{ мм.}$$

Відповідь: $h_1 = 138,46$ мм, $h_2 = 125,29$ мм, $h_3 = 119,18$ мм.

Задача 1.2 Злиток з розмірами $H = 50$ мм, $B = 100$ мм, $L = 140$ мм піддають прокатці з абсолютним обтисненням по висоті $\Delta h = 22$ мм. Після прокатки ширина збільшилася до $b = 112$ мм. Приймаючи рівномірну деформацію, визначити розміри прокату після деформації, відносні та логарифмічні деформації, коефіцієнти деформації. Записати умову сталості об'єму через показники деформації та зробити висновок.

Рішення.

Обираємо наступні напрямки осей деформації: висота (товщина) плити $x = h$, ширина плити $y = b$ довжина плити $z = l$ і розв'язуємо задачу з відповідними позначеннями.

Висота плити після прокатки:

$$h = H + \Delta h = 50 - 22 = 28 \text{ мм.}$$

З умови сталості об'єму знайдемо довжину плити після прокатки:

$$l = \frac{H \cdot B \cdot L}{h \cdot b} = \frac{50 \cdot 100 \cdot 140}{28 \cdot 112} = 223 \text{ мм.}$$

Визначимо відносні деформації:

$$\begin{aligned}\varepsilon_h &= \frac{h-H}{H} = \frac{28-50}{50} = -0,44; \\ \varepsilon_b &= \frac{b-B}{B} = \frac{112-100}{100} = 0,12; \\ \varepsilon_l &= \frac{l-L}{L} = \frac{223-140}{140} = 0,59.\end{aligned}$$

Визначимо логарифмічні деформації:


$$\begin{aligned}e_h &= \ln \frac{h}{H} = \ln \frac{28}{50} = -0,58; \\ e_b &= \ln \frac{b}{B} = \ln \frac{112}{100} = 0,11; \\ e_l &= \ln \frac{l}{L} = \ln \frac{223}{140} = 0,47.\end{aligned}$$

Визначимо коефіцієнти деформації:

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{h}{H} = \frac{28}{50} = 0,56; \\ \beta &= \frac{b}{B} = \frac{112}{100} = 1,12; \\ \lambda &= \frac{l}{L} = \frac{223}{140} = 1,6.\end{aligned}$$

Перевірка умови сталості об'єму, записаного через показники пластичної деформації:

$$\begin{aligned}\varepsilon_h + \varepsilon_b + \varepsilon_l &= -0,44 + 0,12 + 0,59 = 0,27 \neq 0; \\ e_h + e_b + e_l &= -0,58 + 0,11 + 0,47 = 0;\end{aligned}$$


$$\alpha \cdot \beta \cdot \lambda = 0,56 \cdot 1,12 \cdot 1,6 = 1,003 \approx 1.$$

Висновки: при великих пластичних деформаціях (понад 10%) відносні деформації, на відміну від справжніх деформацій та коефіцієнтів деформації, не задовольняють умову сталості об'єму.

Задача 1.3 Товстий лист довжиною 2000 мм, шириною 1250 мм та товщиною 6 мм прокочується без розширення. В результаті його довжина збільшиться до 2800 мм. Знайти кінцеві головні деформації та кінцеві розміри листа.

Рішення.

Вибираємо наступні напрямки осей деформації: висота (товщина) листа $x = h$, ширина листа $y = b$ довжина листа $z = l$ та вирішуємо задачу з відповідними позначеннями.

Розрахуємо логарифмічні деформації за шириною та довжиною листа:

$$e_b = \ln \frac{b}{B} = \ln \frac{1250}{1250} = 0;$$
$$e_l = \ln \frac{l}{L} = \ln \frac{2800}{2000} = 0,33.$$

Згідно з умовою сталості об'єму $e_h + e_b + e_l = 0$, звідки знайдемо:

$$e_h = 0 - e_b - e_l = 0 - 0 - 0,33 = -0,33.$$

Тобто

$$e_h = \ln \frac{h}{H} = -0,33.$$

Кінцева товщина листа у такому разі:

$$h = H \cdot e^{e_h} = 6 \cdot e^{-0,33} = 4,3 \text{ мм.}$$

Відповідь: товщина $h = 4,3$ мм, ширина $b = 1250$ мм, довжина $l = 2800$ мм.

2 СЕРЕДНЯ ШВИДКІСТЬ ДЕФОРМАЦІЇ

2.1 Короткі теоретичні відомості

Швидкість деформації – це зміна ступеня деформації за одиницю часу. Позначається як S її розмірність c^{-1} .

Поняття **швидкості пластичної деформації** не слід змішувати з поняттями **швидкості переміщення окремих частинок деформуємого тіла** і **швидкості руху деформуємого інструменту**.

У найпростішому випадку швидкості переміщення точок тіла, що деформується, спрямовані паралельно одній прямій, яку можна прийняти за вісь x . Швидкість деформації в цьому напрямку можна визначити як межу відношення різниці швидкостей двох суміжних точок і нескінченно малій відстані між цими точками. Вираз для швидкості деформації у напрямку осі x має вигляд:

$$s = \frac{\partial V_x}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial t} = \frac{\partial e_x}{\partial t}. \quad (2.1)$$

Іншими словами, швидкістю деформації s називають похідну відносної деформації ε_x або логарифмічної деформації e_x за часом t .

У загальному випадку, коли швидкості точок тіла, що деформується, різні за величиною і напрямом, компоненти швидкості деформації рівні похідним від компонентів швидкості переміщень по координатах і утворюють тензор

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} S_x & \frac{S_{xy}}{2} & \frac{S_{xz}}{2} \\ \frac{S_{yx}}{2} & S_y & \frac{S_{yz}}{2} \\ \frac{S_{zx}}{2} & \frac{S_{zy}}{2} & S_z \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

де

$$\left. \begin{aligned} S_x &= \frac{\partial V_x}{\partial x}; \quad S_y = \frac{\partial V_y}{\partial y}; \quad S_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}; \\ S_{xy} &= S_{yx} = \frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x}; \\ S_{yz} &= S_{zy} = \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y}; \\ S_{zx} &= S_{xz} = \frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z}. \end{aligned} \right\}$$



Внаслідок тензорного характеру швидкості деформації нею справедливі поняття інваріантів. Вирази для компонентів тензора швидкостей деформацій у полярній системі координат у разі плоскої течії мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} s_r &= \frac{\partial V_r}{\partial r}; s_\theta = \frac{1}{r} \left(V_r + \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right); \\ s_{r\theta} &= \frac{\partial V_\theta}{\partial r} - \frac{V_\theta}{r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial \theta}. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Для випадку простого розтягування стрижня довжиною L_0 на довжину Δl за час t середня швидкість деформації:

$$s = \frac{\varepsilon}{t} = \frac{\Delta l}{L_0 \cdot t}. \quad (2.4)$$

Для визначення середньої швидкості деформації в об'ємі осередку пластичної деформації використовуються вирази:

$$s_c = \frac{|\varepsilon_{max}|}{t} = \frac{|e_{max}|}{t}. \quad (2.5)$$

де ε_{max} та e_{max} – відносна та логарифмічна деформації максимальні за абсолютною величиною в одному з головних напрямків; t – час, протягом якого відбувається процес деформування.

При осадці заготовки з початковою висотою H_0 до кінцевої висоти H зі швидкістю руху інструменту V_{def} середня швидкість деформації:

$$s_c = \frac{\varepsilon_H}{t},$$

де

$$\varepsilon_H = \frac{H_0 - H}{H_0}, V_{def} = \frac{\Delta H}{t} = \frac{H_0 - H}{t}.$$

Тоді

$$s_c = \frac{V_{def}}{H_0}. \quad (2.6)$$

Для випадку листової прокатки середню швидкість деформації за прохід розраховують за формулою, запропонованою академіком О. І. Целіковим:


$$s_c = \frac{V_{def}}{l} \cdot \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (2.7)$$

де $l = \sqrt{R\Delta h}$ - горизонтальна проекція осередку деформації; V_{def} – швидкість обертання робочих валків.

При цьому максимальна деформація у осередку пластичної деформації при прокатці визначається за висотою:

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}. \quad (2.8)$$

При сортовій прокатці середню швидкість деформації можна визначити за такою формулою:

$$s_c = \frac{\ln \lambda}{t}, \quad (2.9)$$

де λ – коефіцієнт витяжки, що розраховується за формулою:

$$\lambda = \frac{F_p}{F},$$

де F_p – площа поперечного перерізу калібру; F – площа поперечного перерізу заготовки.

2.2 Приклади розв'язання задач

Задача 2.1 Визначити середню швидкість деформації під час прокатування широкої смуги (без розширення) у валках діаметром 750 мм, що обертаються зі швидкістю 2,5 м/с, якщо початкова висота смуги 100 мм, кінцева висота 78 мм.

Рішення.

Знайдемо абсолютне обтиснення за прохід:

$$\Delta h = H - h = 100 - 78 = 22 \text{ мм.}$$

Горизонтальна проекція дуги захвату дорівнює:

$$l = \sqrt{R\Delta h} = \sqrt{750 \cdot 22} = 128,4 \text{ мм.}$$

Тоді середня швидкість деформації при прокатці дорівнює:

$$s_c = \frac{V_{def}}{l} \cdot \frac{\Delta h}{H} = \frac{2,5 \cdot 10^3}{128,4} \cdot \frac{22}{100} = 4,3 \text{ c}^{-1}.$$

Відповідь: $s_c = 4,3 \text{ c}^{-1}$.

Задача 2.2 Визначити середню швидкість осідки циліндричної заготовки з висоти 220 мм до висоти 175 мм зі швидкістю деформування 2,8 м/с за умов лінійної схеми стискання.

Рішення:

Середня швидкість деформації дорівнює:

$$s_c = \frac{|e_{max}|}{t}.$$

Для процесу осідки головний напрямок деформації – це зміна висоти, тому логарифмічний максимальний ступінь деформації дорівнюватиме:

$$e_{max} = \ln \frac{h}{h_0} = \ln \frac{175}{220} = -0,228.$$

Знайдемо час деформування. Швидкість деформування визначається за формулою:

$$V_{def} = \frac{\partial h}{\partial t}.$$

Звідси:

$$\partial t = \frac{\partial h}{V_{def}},$$

$$\partial h = \Delta h = h_0 - h = 220 - 175 = 45 \text{ мм}.$$

Тоді:

$$\partial t = \frac{\partial h}{V_{def}} = \frac{45}{2,8 \cdot 10^3} = 0,016 \text{ с}.$$

Таким чином, середня швидкість деформації дорівнює:

$$s_c = \frac{|e_{max}|}{t} = \frac{|-0,228|}{0,016} = 14,25 \text{ c}^{-1}.$$

Відповідь: $s_c = 14,25 \text{ c}^{-1}$.

Задача 2.3 Визначити середню швидкість деформації та швидкості деформації у початковий та кінцевий моменти осадки заготовки на молоті, якщо висота до та після осадку 450 мм та 380 мм, тривалість удару 0,008 с.

Рішення:

Знайдемо швидкість деформування:

$$V_{def} = \frac{\partial h}{\partial t},$$
$$V_{def} = \frac{h-h_0}{t} = \frac{450-380}{0,008} = 8750 \text{ мм/с} = 8,75 \text{ м/с}.$$

Середня швидкість деформації дорівнює:

$$s_c = \frac{|e_{max}|}{t}.$$

Для процесу осадки головний напрямок деформації – це зміна висоти, тому справжня максимальна ступінь деформації дорівнюватиме:

$$e_{max} = \ln \frac{h}{h_0} = \ln \frac{380}{450} = -0,169.$$

Тоді:

$$s_c = \frac{|e_{max}|}{t} = \frac{|-0,169|}{0,008} = 21,125 \text{ с}^{-1}$$

При стисненні швидкість деформації в даний момент деформування можна визначити з виразу:

$$s = \frac{V_{def}}{h_i}$$

де h_i - висота заготовки в даний момент часу.

Швидкість деформації у початковий момент осадки дорівнює:

$$s_s = \frac{V_{def}}{h_0} = \frac{8,75}{450} = 0,019 \text{ с}^{-1}.$$

Тоді швидкість деформації в кінцевий момент осадки дорівнює:

$$s_e = \frac{V_{def}}{h} = \frac{8,75}{380} = 0,023 \text{ с}^{-1}.$$

Відповідь: $s_c = 21,125 \text{ с}^{-1}$, $s_s = 0,019 \text{ с}^{-1}$, $s_e = 0,023 \text{ с}^{-1}$.

3 ОСНОВНІ ЗАКОНИ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

3.1 Короткі теоретичні відомості

Умова сталості об'єму. Якщо деформація, викликана зовнішніми силами, зникає при припиненні дії зовнішніх сил і тверде тіло повністю відновлює свої вихідні форми та розміри, таку деформацію називають пружною. Якщо ж при припиненні дії зовнішніх сил тверде тіло не повністю відновлює свої вихідні форми та розміри, то таку деформацію називають пластичною. Як та, так і інша відбуваються без руйнації тіла, що деформується, чи його ділянок, тобто без порушення суцільності.

Пластична деформація литого металу супроводжується незначною (1...3 %) зміною об'єму, внаслідок чого щільність його дещо зростає за рахунок ліквідації наявних у ньому порожнин. Ця зміна не має практичного значення при розв'язанні задач, пов'язаних з визначенням напружень та деформацій, тому їм у технологічних розрахунках нехтують і вважають, що:

Об'єм тіла до пластичної деформації дорівнює його об'єму після деформації

Математично умову сталості об'єму можна записати як:

$$V_i = \text{const.} \quad (3.1)$$

Цей вираз є окремим випадком закону збереження маси:

$$m = \rho V = \text{const},$$

коли щільність металу ρ у процесі пластичної деформації не змінюється. Умова сталості об'єму нерозривно пов'язана з розглянутою в деяких випадках теорією ОМТ умовою стисливості, згідно з якою алгебраїчна сума логарифмічних ступенів деформації за трьома взаємно перпендикулярними напрямками дорівнює нулю. При цьому принаймні один із ступенів деформації має знак, протилежний знаку двох інших.

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

Умови сталості секундних об'ємів. З його допомогою встановлюють взаємозв'язок між швидкістю руху металу і змінами розмірів поперечного перерізу заготовки, що деформується, при безперервному ре-



жимі обробки. Так, наприклад, при реалізації методу прокатки (рис. 1.5), коли напрямок переміщення полоси збігається з напрямком обертання робочих валків, швидкість металу в нейтральному перерізу буде безпосередньо залежати від швидкості обертання валків.

Формулюється закон сталості секундних об'ємів наступним чином:

Об'єм металу, що проходить в одиницю часу через певний переріз осередку деформації, що формується робочим інструментом, не змінюється при переході від одного перерізу до іншого безперервного режиму обробки.

Математично закон сталості секундних об'ємів виражається співвідношенням:

$$V_i F_i = const. \quad (3.2)$$

де V_i - середня швидкість руху металу в i -му перерізі осередку деформації площею F_i .

Закон подібності. Для того, щоб закономірності та кількісні дані, отримані в лабораторних умовах, можна було б поширити на виробничі умови, необхідно дотримуватись подібності цих процесів. Принцип подібності можна сформулювати наступним чином:

Якщо здійснювати в подібних умовах однакові процеси пластичного деформування геометрично подібних тіл з однакового матеріалу, то необхідні питомі зусилля деформування будуть рівні між собою, відношення повних зусиль деформування буде дорівнює квадрату, а відношення робіт, що витрачаються - кубу відносин відповідних розмірів.

Під питомим зусиллям деформування \bar{P} розуміють відношення необхідного для деформування активного зусилля P до площі проекції поверхні металу F на площину, нормальну напрямку дії цього зусилля:

$$\bar{P} = \frac{P}{F}$$

Питоме зусилля деформування майже завжди можна уявити як:

$$\bar{P} = m\sigma_s, \quad (3.3)$$

де σ_s , - опір металу пластичної деформації; m - деякий безрозмірний коефіцієнт, що залежить від виду здійснюваного процесу деформування, відносних розмірів і форми заготовки, що деформується, а також від умов контактного тертя.

Розглянемо основні умови подібності стосовно до процесів пластичного деформування.

1. Згідно з формулюванням принципу, деформовані тіла повинні бути геометрично подібні. Для цього необхідно, щоб відносини відповідних (подібних) розмірів природи (індекс n) та моделі (індекс m) були однакові. Наприклад, якщо дані два прямокутні паралелепіпеди з розмірами сторін, відповідно, h_n, b_n, l_n , і h_m, b_m, l_m , то вони будуть геометрично подібні, якщо:

$$\frac{h_n}{h_m} = \frac{b_n}{b_m} = \frac{l_n}{l_m} = m,$$

де m – масштаб моделювання.

2. Ступені деформації моделі та природи в порівнювані моменти часу мають бути однакові:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_m.$$

3. Умови тертя між контактами (контактними) поверхнями деформуючого інструменту і металу повинні бути однакові.

4. Модель і натура мають бути фізично подібними, тобто. у всіх відповідних точках мати однаковий хімічний склад, однакові мікро- та макроструктури, фазовий стан, ступеня зміцнення та розміцнення.

Якщо всі перелічені вище умови дотримуються, то:

$$\begin{aligned} \bar{P}_n &= \bar{P}_m; \\ \frac{P_n}{P_m} &= \frac{F_n}{F_m} = m^2; \\ \frac{A_n}{A_m} &= \frac{V_n}{V_m} = m^3, \end{aligned} \quad (3.4)$$

де $\bar{P}_n, \bar{P}_m; P_n, P_m$, та A_n, A_m - відповідно, питомі зусилля, повні зусилля та роботи, що витрачаються на деформування натуральної заготовки та модельного зразка.

Принципи найменшого опору, найкоротшої нормалі та найменшого периметра. При обробці металів тиском іноді необхідно знати



співвідношення між переміщеннями металу у різних напрямках. Якісно напрям течії металу визначають на підставі принципу найменшого опору, який можна сформулювати наступним чином:

У разі можливості переміщення точок деформованого тіла в різних напрямках кожна його точка переміщається у напрямку найменшого опору.

Для практичного застосування закону найменшого опору необхідно знати напрямок траєкторії, за якою для точок, на ній розташованих, опір течії буде найменшим.

Для випадку стиснення призматичних і циліндричних тіл між паралельними плитами за наявності тертя по площинах контакту ці траєкторії визначаються за принципом найкоротшої нормалі, що полягає в тому, що переміщення будь-якої точки тіла в площині, перпендикулярній до напрямку дії зовнішньої сили, відбувається за найкоротшою нормаллю до периметру перерізу.

Нехай, наприклад, осаджують призму з прямокутною основою, деякий переріз якої у вигляді площини, нормальної до напрямку діючого зусилля, представлено на рис. 3.1.

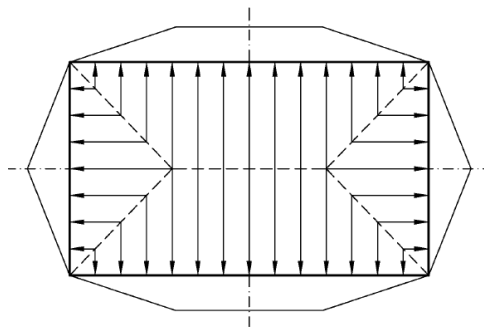


Рисунок 3.1 - Напрямок руху точок при осадці призми з прямокутною основою в умовах значного тертя

Відповідно до зазначеного принципу, прямокутник можна розділити на два трикутники і дві трапеції лініями, що являють собою граничні лінії або лінії розділу перерізу, оскільки довжина профілів до периметру перерізу по обидві сторони з кожної точки, що лежить на цих лініях, буде однаковою. Напрямок руху точок показано на рис. 3.1 стрілками.

Траєкторія, якою рухаються точки деформованого тіла, підпорядковується принципу найменшого периметра, який можна сформулювати так:

Будь-яка форма поперечного перерізу призматичного чи циліндричного тіла при осадці його за умов максимального контактного те-

ртя прагне прийняти форму фігури, що має при даній площі найменший периметр, тобто прагне до кола.

Слід зазначити, що два принципи справедливі для випадку, коли тертя на поверхнях контакту металу з інструментом ізотропно, тобто. однаково у всіх напрямках, і до того ж значно.

При деформації, наприклад, прямокутного паралелепіпеда плоскими бойками *без контактної тертя* рух частинок у площинах, нормальних до напрямку дії зовнішньої сили, носить радіальний характер, і поперечні перерізи в процесі деформації залишатимуться подібними до вихідних (рис. 3.2).

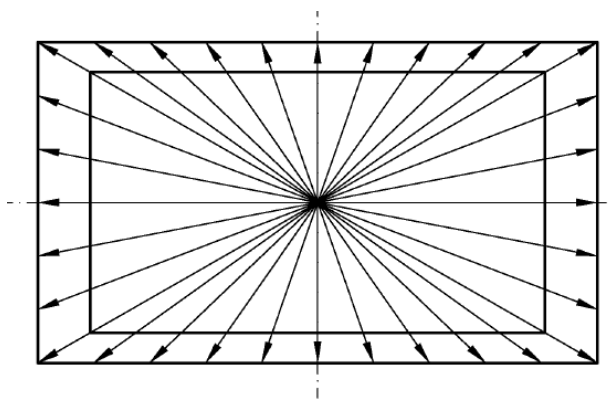


Рисунок 3.2 - Напрямок руху точок при деформації призми з прямокутною основою в умовах мінімального тертя

3.2 Контрольні питання

1. Перелічіть основні закони пластичної деформації. Як ці закони використовуються практично?

2. Сформулюйте закон збереження об'єму. Як його можна записати математично? Як його використовують практично, наведіть приклади.

3. Сформулюйте закон збереження секундних об'ємів. Як його можна записати математично? Як його використовують на практиці, наведіть приклади.

4. Сформулюйте закон подібності. Як його можна записати математично? Як його використовують практично, наведіть приклади при моделюванні різних процесів деформування.

5. Сформулюйте закон найменшого опору. Як, згідно із цим законом, тече метал у зоні пластичної деформації при прокатці з розширенням і без нього. Зобразіть графічно.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ВИРІШЕННЯ

1. Злиток довжиною L , шириною B , і товщиною H піддавався прокатці без розширення до товщини h . Визначити справжні деформації, зміщений об'єм та довжину смуги після деформації.

Варіанти даних	1	2	3	4
L , мм	1500	1200	1000	2000
B , мм	500	950	750	450
H , мм	120	200	80	90
h , мм	50	120	60	40

2. Плита завтовшки H проковувалася в n проходів до товщини h з однаковим ступенем обтиснення за прохід. Визначити товщину смуги після кожного проходу.

Варіанти даних	1	2	3	4
H , мм	80	20	120	40
h , мм	20	4,5	60	16
n	3	7	5	5

3. У процесі деформації квадратна сітка, нанесена на поверхню смуги, спотворилася так, що відстань між сторонами сітки в поздовжньому напрямку збільшилась у N разів порівняно з початковою відстанню. Знайти: а) справжні деформації вважаючи матеріал смуги ізотропним; б) справжні деформації, якщо ширина лінії незмінна.

Варіанти даних	1	2	3	4
N	3,15	2	2,5	1,6

4. Труба з внутрішнім діаметром D , товщиною стінки T і довжиною L піддається волочінню на довгій рухомій оправці (рис. 4.1) в 4 проходи, так що товщина стінки по переходах буде: t_1, t_2, t_3, t_4 . Нехтуючи зміною внутрішнього діаметра труби, визначити: витяжки по проходах, справжні деформації та розміри труби після останнього переходу.

лютних та відносних обтискань, коефіцієнтів обтисків та витяжки, справжніх деформацій за висотою та за довжиною.

Варіанти даних	1	2	3	4
H , мм	40	25	32	20
h , мм	8	1,6	2,4	14
n	5	9	7	3

8. Циліндричну заготовку осаджували на молоті за чотири удари зі ступенем деформації за удар: e_1, e_2, e_3, e_4 . Визначте висоту заготовки після кожного удару молота, якщо початкова висота заготовки H .

Варіанти даних	1	2	3	4
H , мм	260	120	180	375
e_1	0,12	0,18	0,1	0,16
e_2	0,1	0,16	0,08	0,08
e_3	0,08	0,1	0,06	0,08
e_4	0,06	0,06	0,05	0,06

9. Із заготовки діаметром D пресується пруток діаметром d . Визначити логарифмічні деформації при пресуванні прутка та коефіцієнт витяжки.

Варіанти даних	1	2	3	4
D , мм	150	115	80	180
d , мм	30	50	24	22

10. Плита довжиною L , шириною B і товщиною H розтягується рівномірно доти, доки її довжина не збільшиться до l . Вважаючи матеріал плити не ізотропним, визначити справжні деформації та кінцеві розміри плити.

Варіанти даних	1	2	3	4
L , мм	1200	2500	900	2000
B , мм	360	450	750	550
H , мм	10	40	80	50
l , мм	1440	3600	1600	2450

11. Плита довжиною 1000 мм, шириною 300 мм і товщиною 6 мм розтягується рівномірно до тих пір, поки деформація в поздовжньому на-



прямку не становитиме 4%. Вважати матеріал плити ізотропним, визначити розміри плити після деформації.

Варіанти даних	1	2	3	4
L , мм	1200	2500	900	2000
B , мм	360	450	750	550
H , мм	10	40	80	50
ε_l , %	4	8	5	12

12. Розрахувати показники деформації при прокатці плит у три проходи та зробити висновки.

Показники	Прохід		
	1	2	3
Начальна товщина, мм	100	90	80
Кінцева товщина, мм	90	80	70
Абсолютна деформація, мм			
Відносна деформація за Лагранжем			
Відносна деформація за Ейлером			
Істинна деформація			

13. Після осаджування прямокутного паралелепіпеда висотою H , шириною B і довжиною L на величині Δh ширина збільшилася до b . Приймаючи деформацію рівномірної, визначити відносні та справжні деформації, коефіцієнти деформації. Перевірити умову сталості обсягу за показниками деформації.

Варіанти даних	1	2	3	4
H , мм	40	100	20	450
B , мм	70	100	40	650
L , мм	90	300	160	1250
Δh , мм	8	12	5,4	125
b , мм	82	112	42	725

14. Кінцевий діаметр круглого профілю дорівнює 40 мм, а довжина 2400 мм. Цей пруток піддавався сортовій прокатці початкового діаметра 60 мм. Визначити початкові розміри прутка та кінцеві деформації.

Варіанти даних	1	2	3	4
d , мм	40	100	20	450
L , мм	2400	3600	2000	4200
D , мм	60	112	42	625

15. На сталевий лист була нанесена сітка зі стороною квадрата A , після деформації вона стала прямокутною з розмірами $a \times b$. Визначити величину кінцевих деформацій. Чи зміниться результат завдання, якщо розглядати круглу сітку з d_0 , яка перетворилася б на еліпс із головними осями $2a \times 2b$?

Варіанти даних	1	2	3	4
A , мм	55	78	40	50
$a \times b$, мм	40 x 60	60 x 80	30 x 38	40 x 50
d_0 , мм	55	78	40	50
$2a \times 2b$, мм	60 x 40	80 x 60	38 x 30	50 x 40

16. Смуга завдовжки L була прокатана до l . Вважаючи напружений стан лінійним, матеріал ізотропним, а обсяг постійним, визначити деформації по ширині і товщині смуги.

Варіанти даних	1	2	3	4
L , мм	250	2800	3000	2000
l , мм	300	3800	3750	2400

17. Пруток із ізотропного матеріалу був прокатаний таким чином, що його довжина збільшилася в N рази. Яким став кінцевий діаметр дроту, якщо початковий діаметр D ? Які величини деформацій?

Варіанти даних	1	2	3	4
N	1,2	1,16	1,6	2,15
D , мм	30	36	28	32

19. Пливу довжиною L , шириною B і товщиною H проковували до того, доки її довжина не стала дорівнює l . Вважаючи деформацію плоскою, тобто без розширення, визначити: а) кінцеві деформації; б) кінцеві розміри плити; в) інтенсивність деформацій.

Варіанти даних	1	2	3	4
L , мм	2400	3000	1200	1900
B , мм	400	450	750	550
H , мм	10	40	60	50
l , мм	2800	3600	1600	2450

20. Лист товщиною H , довжиною L і шириною B прокочують до отримання поздовжньої деформації e_x . Вважаючи ширину незмінною, визначити кінцеві розміри листа.

Варіанти даних	1	2	3	4
H , мм	6	8	4	20
B , мм	400	700	750	550
L , мм	800	2500	1600	2000
e_x	0,15	0,12	0,18	0,14

21. Труба із зовнішнім діаметром d , товщиною стінки s і довжиною L піддавалася розтягуванню до l . Вважаючи матеріал ізотропним, знайти деформації та кінцеві розміри труби.

Варіанти даних	1	2	3	4
d , мм	80	60	45	20
s , мм	4	5	3	2,5
L , мм	800	750	1200	600
l , мм	1000	810	1450	670

22. Встановити зв'язок між ступенем деформації за площею ε_F і коефіцієнтом витяжки λ . При пресуванні з ε_F знайти λ .

Варіанти даних	1	2	3	4
ε_F , %	52	40	15	25

23. При пресуванні заготовки на довжину Δl отримано пруток задовжки l . Визначити коефіцієнт витяжки.

Варіанти даних	1	2	3	4
l , мм	2250	900	3600	2800
Δl , мм	150	200	180	100

24. Круглий профіль довжиною L прокочують у круглому калібрі за

кілька проходів до l_1 , l_2 та l_3 відповідно. Для цього випадку перевірити властивість адитивності відносних та логарифмічних деформацій.

Варіанти даних	1	2	3	4
L , мм	100	600	2200	400
l_1 , мм	104	608	2250	404
l_2 , мм	108	615	2280	408
l_3 , мм	112	622	2310	410

25. Визначити середню швидкість осадження циліндричної заготовки з висоти 100 мм до висоти 50 мм зі швидкістю деформування 4 м/с за умов лінійної схеми стиснення.

Варіанти даних	1	2	3	4
H , мм	100	200	80	120
h , мм	50	110	60	80
V_{def} , м/с	4	6	3	4,5

26. Визначити середню швидкість деформації при сортовій прокатці, якщо початкова площа поперечного перерізу заготовки F , а площа калібру F_p . Швидкість обертання валків V_{def} .

Варіанти даних	1	2	3	4
F , мм ²	115	200	80	120
F_p , мм ²	88	175	72	105
V_{def} , м/хв	15	9	26	22

27. У валках діаметром R 650 мм здійснюється прокатка смуги з абсолютним обтисненням Δh $h = 25$ мм. Відносне обтиснення (деформація за Ейлером) ε , окружна швидкість валків V . Визначити середню швидкість деформації під час прокатки.

Варіанти даних	1	2	3	4
R , мм	650	1350	800	105
Δh , мм	25	56	12	0,8
ε	0,4	0,6	0,5	0,25
V , м/с	10	4	5	12

28. Визначити, як змінюється швидкість деформації з часом по довжині стрижня при розтягуванні його одним рухливим захватом. Швид-



кість руху захвата $V_{def} = const$.

29. Один із двох однакових стрижнів піддається стиску, інший - розтягуванню. Визначити, як змінюється співвідношення швидкостей деформації з часом t .

30. Знайти середню швидкість деформації при пресуванні труби $a \times b$ із контейнера діаметром D через плоску матрицю. Пресування проводиться зворотним способом зі швидкістю V .

Варіанти даних	1	2	3	4
$a \times b$, мм	60 x 40	100 x 100	40 x 36	200 x 220
D , мм	150	280	120	650
V , м/хв	3	3,6	2,8	3,15

31. Циліндричний зразок довжиною L розтягується до довжини l із швидкістю V_{def} . Визначити швидкості деформацій у початковий та кінцевий моменти деформування, а також середні швидкості малої та справжньої деформації.

Варіанти даних	1	2	3	4
L , мм	150	500	20	63
l , мм	160	720	22	81
V_{def} , м/с	0,005	0,004	0,008	0,003

32. Заготовка висотою H осаджується на молоті на Δh . Швидкість бойка постійна і становить V . Обчислити швидкість деформації на початку та в кінці процесу.

Варіанти даних	1	2	3	4
H мм	100	120	80	75
Δh , мм	20	15	38	10
V , м/с	15	12	8	18

33. Висота заготовки до і після осадці на пресі зі швидкістю V_{def} 30 м/с дорівнюють 250 мм і 150 мм. Осадка проводиться за один хід преса. Визначити середні швидкості відносної та логарифмічної деформацій.

Варіанти даних	1	2	3	4
H мм	250	120	80	75
h , мм	150	75	67	50
V_{def} , м/с	30	25	38	20

34. Обчислити швидкість деформації на початку і наприкінці деформування, якщо відомо, що довжина зразка в процесі деформації змінювалася за законом $L = 4t^3 + 2t + 100$ (мм), сумарний час деформування дорівнює t . Визначити швидкість інструменту наприкінці i – ої секунди деформування, а також вид процесу.

Варіанти даних	1	2	3	4
t , с	1,5	2,5	2,0	2,8
i	1	1	2	2



ЛІТЕРАТУРА

1. Danchenko V. N. Metal forming : text-book. Dnepropetrovsk : NMetAU, 2007. 183 p.
2. Hosford W. F., Caddell R. M. Metal Forming. Mechanics and Metallurgy. 4th Edition. Cambridge : Cambridge University Press, 2011. 344 p.
3. Kumar S. Technology of Metal Forming Processes. New Delhi : PHI Learning Pvt. Ltd., 2008. 376 p.
4. Nielsen Ch. V., Martins P. A. F. Metal Forming : Formability, Simulation, and Tool Design. London : Elsevier Academic Press, 2021, 412 p.
5. Sluzalec A. Theory of Metal Forming Plasticity : Classical and Advanced Topics. New York, NY : Springer, 2003. 278 p.
6. Wang Z. R., Hu Weilong, Yuan S. J., Wang Xiaosong. Engineering Plasticity : Theory and Applications in Metal Forming. New Jersey : WILEY Higher Education Press, 2018. 520 p.
7. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. Теорія поздовжньої прокатки : підручник. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.
8. Данченко В. М., Гринкевич В. О., Головка О. М. Теорія процесів обробки металів тиском : підручник. Дніпропетровськ : Пороги, 2008. 372 с.
9. Каргин В. Р., Нестеренко Е. С. Теория обработки металлов давлением в примерах и задачах : учебное пособие. Самара : Издательство Самарского университета, 2020. 112 с.
10. Теория прокатки : справочник / А. И. Целиков и др. М : Металлургия, 1982, 335 с.