

621.7.01

П 845

Міністерство освіти і науки України

Запорізька державна інженерна академія



В. М. Проценко

## **ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ОМТ, ТЕХНОЛОГІЯ ПРОЦЕСІВ ОМТ**

**Методичні вказівки**

**до виконання практичних занять,  
контрольних робіт, курсового проектування і самостійної роботи**

*для бакалаврів та спеціалістів ЗДІА  
спеціальності «Обробка металів тиском»  
всіх форм навчання*

Міністерство освіти і науки України  
Запорізька державна інженерна академія

**ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ОМТ,  
ТЕХНОЛОГІЯ ПРОЦЕСІВ ОМТ**

**Методичні вказівки до виконання практичних занять,  
контрольних робіт, курсового проектування і самостійної роботи**

для студентів ЗДІА спеціальності  
«Обробка металів тиском»  
всіх форм навчання

*Рекомендовано до видання  
на засіданні кафедри ОМТ  
протокол № 19 від 13.06.2016 р.*

Запоріжжя  
2016

*В.М. Проценко, к.т.н., доцент*

*Відповідальний за випуск: зав. кафедрою ОМТ  
д.т.н., професор В.О. Ніколас*

*Рецензент: Таратута К.В., к.т.н., доцент ЗДІА*

**Проценко В.М.**

П 845 Теорія процесів ОМТ, технологія процесів ОМТ: методичні вказівки до виконання практичних занять, контрольних робіт, курсового проектування і самостійної роботи для бакалаврів та спеціалістів ЗДІА спеціальності «Обробка металів тиском» всіх форм навчання / В.М. Проценко; Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2016. – 60 с.

В методичних вказівках наведено методики, алгоритми рішень і приклади задач по основним розділам теорії і технології процесів ОМТ: листовому прокатуванню, куванню і штампуванню, пресуванню і волочінню. Методичні вказівки призначені для студентів ЗДІА спеціальності «Обробка металів тиском» всіх форм навчання і можуть застосовуватись при виконання практичних занять, контрольних робіт, курсового проектування і самостійної роботи студентів.

357264

Запорізька державна  
інженерна академія

ЧИТАЛЬНИЙ  
ЗАЛ №1

## ЗМІСТ

1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФОРМОЗМІНЮВАННЯ ПРИ ПОЗДОВЖНОМУ ПРОКАТУВАННІ ШТАБИ (завдання № 1) .....	5
1.1 Теоретичний вступ .....	5
1.2 Завдання на виконання розрахунків параметрів формозмінювання при поздовжньому прокатуванні штаб .....	13
1.3 Визначення параметрів формозмінювання .....	14
1.4 Варіанти індивідуальних завдань .....	16
2 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ЛИСТОВОМУ ПРОКАТУВАННІ (Завдання № 2) .....	17
2.1 Алгоритм розрахунку .....	17
2.2 Приклад розрахунку .....	17
2.3 Варіанти індивідуальних завдань .....	20
3 МЕТОДИКА І АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ МАРШРУТУ І ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВОЛОЧІННЯ ПРУТКА (Завдання № 3) .....	21
3.1 Теоретичний вступ .....	21
3.2 Приклад розрахунку .....	23
3.3 Варіанти індивідуальних завдань розрахунку енергосилових параметрів волочіння прутка .....	27
4 СИЛА І НАПРУЖЕННЯ ПРИ КУВАННІ ЗАГОТОВОК.....	28
4.1 Теоретичний вступ .....	28
4.2 Розрахунок сили осадки (Завдання № 4) .....	33
4.3 Розрахунок маси частин молоту, що падають (Завдання №5) ..	35
4.4 Розрахунок параметрів при ковальському витяганні (Завдання №6) .....	35
4.5 Визначення сили кривошипного пресу (Завдання №7) .....	37
4.6 Визначення максимальної сили витягання гільзи (Завдання №8) .....	39
4.7 Варіанти виконання індивідуальних завдань №№ 4-8.....	40

5 ВИТЯГАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ (Завдання № 9) .....	45
5.1 Основи виконання технологічних розрахунків .....	45
5.2 Розрахунок параметрів технології витягання порожнистого циліндра .....	48
5.3 Розрахунок силових умов витягання порожнистого циліндра ..	51
5.4 Варіанти індивідуальних завдань розрахунку параметрів технології і силових умов витягання порожнистого циліндра .....	54
6 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕДУЦІРУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ЗАГОТОВКИ (Завдання № 10) .....	55
6.1 Теоретичний вступ і умови задач .....	55
6.2 Приклад вирішення задачі .....	57
6.3 Варіанти індивідуальних завдань .....	59
7 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .....	60

# 1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФОРМОЗМІНЮВАННЯ ПРИ ПОЗДОВЖНОМУ ПРОКАТУВАННІ ШТАБИ

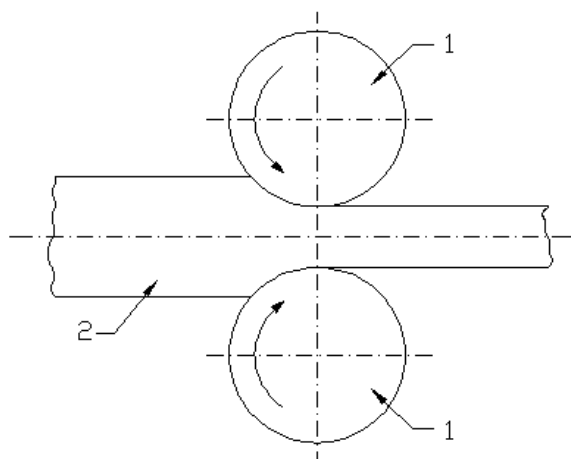
## (Завдання № 1)

### 1.1 Теоретичний вступ

Прокатка є основним способом обробки металів тиском. Методом прокатки отримують вироби найрізноманітнішої форми: тонкі і товсті листи, профілі квадратною і круглого перетинів, куточки, швелери, двотаврові балки, рейки, труби і багато інших виробів [1-4].

Прокаткою називається процес пластичної деформації металу між двома або декількома валками, що обертаються.

Проста і основна схема прокатки наведена на рис. 1.1. Тіло, що оброблюється, яке в загальному випадку називається штабою, пропускається між двома валками, що обертаються в протилежні сторони.

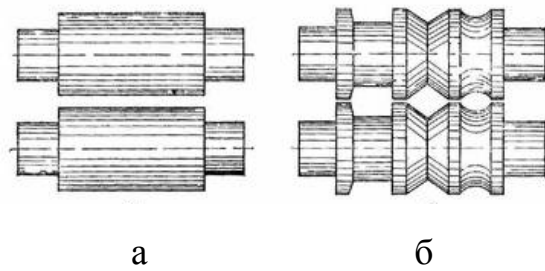


1 – валки; 2 – штаба

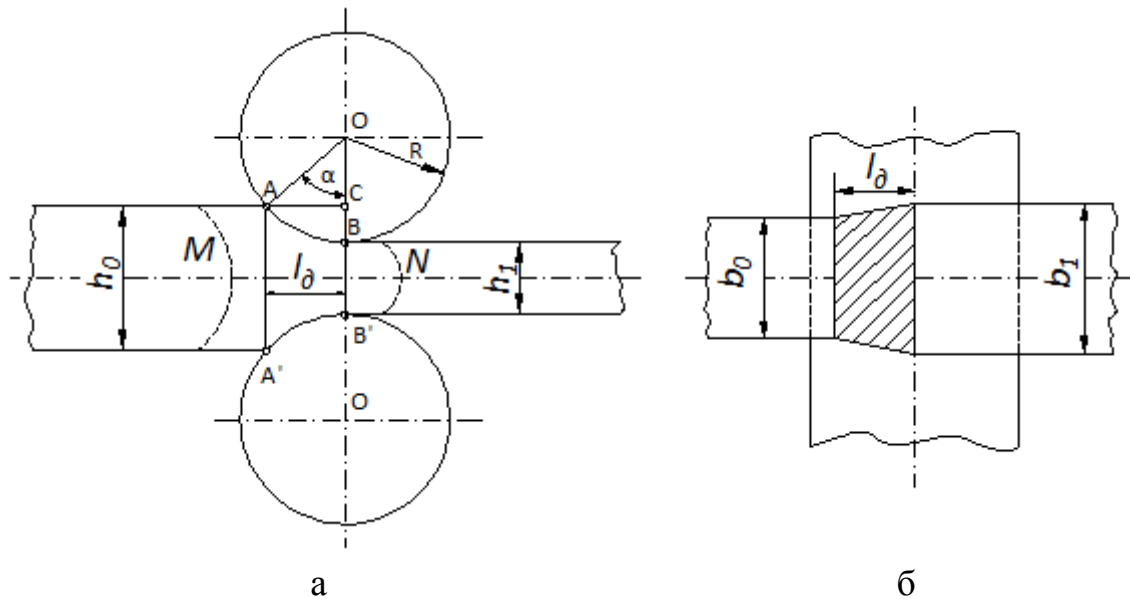
**Рисунок 1.1** – Схема процесу поздовжньої прокатки

При проходженні між валками товщина штаби зменшується, а довжина і ширина збільшуються. При прокатуванні виробів типу листів застосовуються валки, робоча частина (бочка) яких має форму циліндра без будь яких вирізів і виступів (рис.1.2, а). Прокатку в таких валках часто називають прокаткою «на гладкій бочці». При виробництві складніших (сортових) профілів застосовуються калібровані валки і деформація штаби здійснюється в калібрах (рис.1.2, б).

Метал втягується в валках завдяки силам тертя, що з'являються на поверхні контакту металу з валками. Штаба піддається деформації не одночасно по всій довжині, а тільки на деякій ділянці, яка називається геометричним осередком деформації і характеризується поздовжнім (рис.1.3, а) і поперечним (рис.1.3, б) перетинами.



**Рисунок 1.2** – Валки с гладкою бочкою (а) і калібровані валки (б)



а – поздовжній перетин; б – поперечний перетин

**Рисунок 1.3** – Осередок деформування при прокатуванні

Геометричний осередок деформування - це об'єм металу  $ABV'A'$ , обмежений дугами кіл валків  $AB$  і  $A'B'$ , площастями входу металу у валки  $AA'$  і виходу металу з валків  $BB'$  і боковими гранями штаби.

Проте експериментальними дослідженнями встановлено, що пластична деформація розповсюджується і на зони, прилеглі до геометричного осередку деформування, які називаються позаконтактними зонами деформації. Тому фактичний осередок деформування (область, що знаходиться між лініями  $M$  і  $N$ ) більше геометричного і включає поза контактні зони.

Форма поперечного перетину осередка деформації залежить від форми поперечного перетину профілю, що прокатується і може бути круглою, овальною, квадратною, а також мати форму куточка, балки, рейки і інших простих і складних перетинів. Коли деформацію здійснюють на гладких, циліндрових валках (прокатка листів, стрічки, штаби), форма поперечного перетину осередку деформування має простий вид прямокутного перетину.

До основних понять, які характеризують осередок деформування, відносяться:

- дуга АВ (також А'В'), по якій метал контактує з валком, називається *дугою контакту*;
- центральний кут АОВ ( $\alpha$ ) називається *кутам контакту*;
- горизонтальна проекція дуги контакту відповідає довжині осередка деформації і позначається  $l_d$ .

В процесі прокатки змінюються лінійні розміри штаби - товщина, ширина і довжина. Розглянемо систему показників, які характеризують величину деформації в кожному з цих напрямів.

Зміна товщини штаби характеризується величиною абсолютного і відносного обтиснення, а також коефіцієнтом обтиснення.

1. *Абсолютне обтиснення* - різниця між початковою і кінцевою товщиною штаби

$$\Delta h = h_0 - h_1, \quad (1.1)$$

де  $\Delta h$  - абсолютне обтиснення, мм;

$h_0$  - товщина штаби перед проходом, мм;

$h_1$  - товщина штаби після проходу, мм.

2. *Умовне відносне обтиснення* - відношення абсолютного обтиснення до початкової товщини штаби

$$\varepsilon_h = \Delta h / h_0, \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon_h$  - умовне відносне обтиснення.

3. *Істинне відносне обтиснення* - визначається як натуральний логарифм відношення початкової товщини штаби до кінцевої

$$\delta_h = \ln(h_0 / h_1), \quad (1.3)$$

де  $\delta_h$  - істинне відносне обтиснення.

Відносне обтиснення визначається в долях одиниці або у відсотках; в останньому випадку результати розрахунку по формулах (1.2) і (1.3) множаться на 100 %.

4. *Коефіцієнт обтиснення* - відношення початкової товщини штаби до кінцевої

$$1/\eta = h_0 / h_1, \quad (1.4)$$

де  $1/\eta$  - коефіцієнт обтиснення.

Зміна поперечних розмірів штаби називається розширенням. Показники розширення аналогічні показникам висотної деформації.

5. *Абсолютне розширення* - різниця між кінцевою і початковою шириною штаби

$$\Delta b = b_1 - b_0, \quad (1.5)$$

де  $\Delta b$  - абсолютне розширення, мм;



$b_1$  - ширина штаби після проходу, мм;  
 $b_0$  - ширина штаби перед проходом, мм.

6. *Умовне відносне розширення* - відношення абсолютного розширення до початкової ширини штаби

$$\varepsilon_b = \Delta b / b_0, \quad (1.6)$$

де  $\varepsilon_b$  – умовне відносне розширення.

7. *Істинне відносне розширення* - натуральний логарифм відношення кінцевої ширини штаби до початкової

$$\delta_b = \ln b_1 / b_0, \quad (1.7)$$

де  $\delta_b$  – істинне відносне розширення.

Умовне і істинне відносне розширення також визначається в долях одиниці або у відсотках.

8. *Коефіцієнт розширення* - відношення ширини штаби після проходу до початкової ширини штаби

$$\beta = b_1 / b_0, \quad (1.8)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт розширення.

9. *Показник розширення* - відношення абсолютного розширення до абсолютного обтиснення

$$a = \Delta b / \Delta h, \quad (1.9)$$

де  $a$  – показник розширення.

10. *Абсолютне подовження* - різниця між кінцевою і початковою довжинами штаби

$$\Delta l = l_1 - l_0, \quad (1.10)$$

де  $\Delta l$  - абсолютне подовження, мм;

$l_1$  - довжина штаби після проходу, мм;

$l_0$  - довжина штаби перед проходом, мм.

11. *Умовне відносне подовження* - відношення абсолютного подовження до початкової довжини штаби

$$\varepsilon_l = \Delta l / l_0, \quad (1.11)$$

де  $\varepsilon_l$  – умовне відносне подовження.

12. *Істинне відносне подовження* - натуральний логарифм відношення кінцевої довжини штаби до початкової

$$\delta_l = \ln(l_1 / l_0), \quad (1.12)$$

де  $\delta_l$  – істинне відносне подовження.

Величини  $\Delta l$ ,  $\varepsilon_l$  і  $\delta_l$  рідко застосовуються на практиці для характеристики поздовжньої деформації, проте дуже широко використовується показник, який називається коефіцієнтом витягання.

13. *Коефіцієнт витягання* - відношення довжини штаби після проходу до початкової довжини штаби

$$\mu = l_1/l_0, \quad (1.13)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт витягання.

Якщо технологічний процес включає декілька проходів штаби через валки, то в цьому випадку розрізняють *окремі коефіцієнти витягання* (у кожному проході) і *загальний коефіцієнт витягання*

$$\mu_{\text{заг}} = l_k/l_0, \quad (1.14)$$

де  $\mu_{\text{заг}}$  – загальний коефіцієнт витягання;

$l_k$  – кінцева довжина штаби після прокатки, мм.

Загальний коефіцієнт витягання можна визначити і з іншої формули

$$\mu_{\text{заг}} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \dots \cdot \lambda_n, \quad (1.15)$$

де  $\mu_1 \div \mu_n$  – окремі витягання в проходах;

$n$  – число проходів.

Існує також поняття *середнього коефіцієнта витягання* в декількох проходах. Під величиною середнього коефіцієнта витягання мається на увазі такий коефіцієнт витягання, який був би в тому випадку, якщо б коефіцієнти витягання у всіх проходах були однаковими. Тоді можна записати

$$\mu_{\text{заг}} = \mu_{\text{сер}} \cdot \mu_{\text{сер}} \cdot \mu_{\text{сер}} \dots \cdot \mu_{\text{сер}} = \mu_{\text{сер}}^n. \quad (1.16)$$

З формули (1.16) отримуємо величину середнього коефіцієнта витягання

$$\mu_{\text{сер}} = \sqrt[n]{\mu_{\text{заг}}}, \quad (1.17)$$

де  $\mu_{\text{сер}}$  – середній коефіцієнт витягання при прокатуванні.

Довжина осередку деформування визначається по формулі

$$l_d = \sqrt{R_B \cdot \Delta h}, \quad (1.18)$$

де  $l_d$  – довжина осередку деформування, мм;

$R_B$  – радіус валків кліті, мм, який дорівнює

$$R_B = D_B/2, \quad (1.19)$$

де  $D_B$  – діаметр валків, мм.

Кут контакту визначається по формулі

$$\alpha = \arccos[1 - (\Delta h/D_B)]. \quad (1.20)$$

В теорії пластичної деформації приймається умова сталості об'єму металу: об'єм тіла при пластичній деформації залишається незмінним. Насправді об'єм тіла в процесі пластичної деформації не залишається незмінним. Так при гарячій обробці литого металу відбувається його ущільнення в результаті заварювання раковин, порожнеч, мікротріщин і, відповідно, деяке зменшення об'єму металу. При холодній обробці тиском, навпаки, відбувається деяке збільшення об'єму в результаті утворення мікротріщин. Проте всі ці зміни незначні, і їх можна не враховувати.

Умова сталості об'єму широко використовується в розрахунках зміни форми тіл при всіх процесах обробки тиском.

Тоді маємо

$$V_0 = V_1, \quad (1.21)$$

де  $V_0, V_1$  - відповідно об'єм штаби до і після проходження в кліті.

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1,$$

звідки слідує

$$(h_1/h_0) \cdot (b_1/b_0) \cdot (l_1/l_0) = \eta \cdot \beta \cdot \mu = 1. \quad (1.22)$$

Таким чином, коефіцієнти деформації в трьох основних напрямках зв'язані між собою умовою сталості об'єму металу.

Виходячи з умови сталості об'єму металу можна отримати

$$\mu = l_1/l_0 = (h_0 \cdot b_0)/(h_1 \cdot b_1) = F_0/F_1, \quad (1.23)$$

де  $F_0, F_1$  - відповідно площа поперечного перетину штаби до і після проходження в кліті, мм<sup>2</sup>.

Таким чином, коефіцієнт витягання характеризує не тільки зміну довжини штаби, але і зміну її площі поперечного перетину.

Оскільки об'єм металу при деформації залишається постійним, то через будь-який поперечний перетин осередку деформування в одиницю часу повинна проходити однакова кількість металу. Ця умова в теорії прокатки називається умовою сталості секундних об'ємів.

Об'єм металу, що проходить через будь-який поперечний перетин осередку деформування в одиницю часу (секунду), складає:

$$F_i \cdot l_i/\tau = F_i \cdot v_i, \quad (1.24)$$

де  $F_i$  - площа поперечного перетину штаби у будь-якому перетині, мм<sup>2</sup>;

$l_i$  - поздовжнє переміщення штаби через цей перетин за час  $\tau$ , мм;

$v_i$  - швидкість руху штаби в даному перетині, м/с.

Тобто умова сталості секундних об'ємів записується

$$F_i \cdot v_i = \text{const},$$

$$F_0 \cdot v_0 = F_i \cdot v_i = F_1 \cdot v_1, \quad (1.25)$$

де  $v_0, v_1$  - відповідно швидкості руху штаби на вході і виході з валків, м/с.

Площі поперечного перетину штаби у міру просування її від площини входу у валки до площини виходу з валків зменшуються. Тому, щоб зберігалась рівність секундних об'ємів, швидкості часток металу у відповідних перетинах повинні поступово зростати.

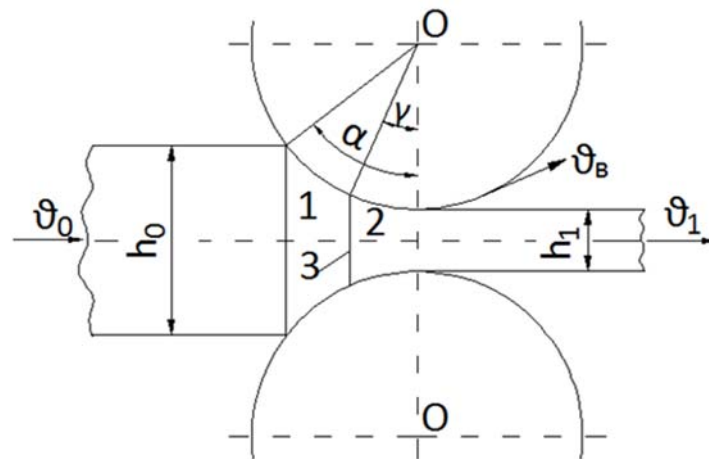
З формули (1.25) отримаємо

$$\begin{aligned}\vartheta_1 &= F_0 \cdot \vartheta_0 / F_1, \\ \vartheta_1 &= \lambda \cdot \vartheta_0.\end{aligned}\tag{1.26}$$

Таким чином, швидкість виходу штаби з валків більше швидкості входу штаби у валки на величину коефіцієнта витягання.

Окрім цього, дослідження показують, що при сталому процесі прокатки швидкість виходу штаби з валків більше окружної швидкості валків, а швидкість входу штаби у валки менше горизонтальної складової окружної швидкості валків. Це пов'язано з тим, що при обтисненні штаби по висоті деяка кількість металу видавлюється вперед по ходу прокатки: швидкість цих частинок, отримана в результаті деформації, складається з окружної швидкості валків. Інша частина зміщеного об'єму металу віджимается назад, проти ходу прокатки: швидкість цих частинок віднімається від окружної швидкості валків.

Таким чином, в осередку деформування є дві зони: зона позаднього руху металу або зона відставання (де швидкість штаби менше окружної швидкості валків) і зона попутного руху металу або зона випередження (де співвідношення швидкостей зворотне) (див. рис. 1.4).



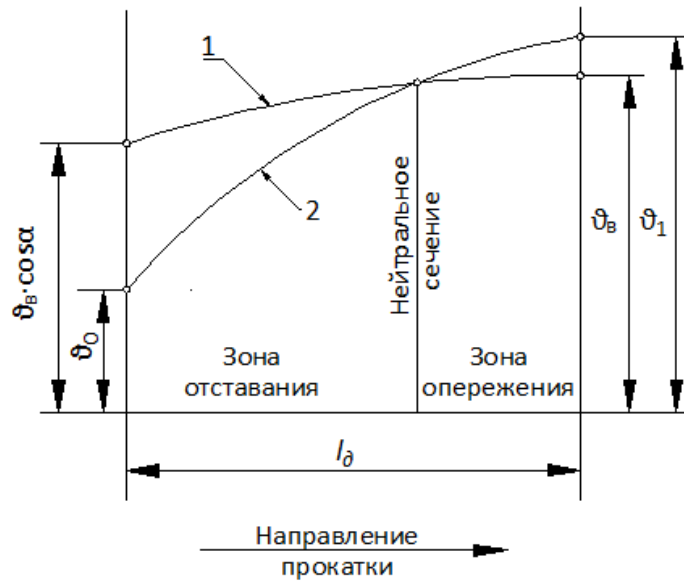
1 – зона відставання; 2 – зона випередження; 3 – нейтральний перетин

**Рисунок 1.4** – Зони відставання і випередження в осередку деформування

Перетин, де швидкості руху штаби і валків однакові, називається нейтральним перетином, а кут, відповідний цьому перетину, - нейтральним кутом.

Отже, випередження - це перевищення швидкості виходу металу з валків в порівнянні з їх окружною швидкістю, а відставання - зменшення швидкості

входу металу в валки в порівнянні з їх окружною швидкістю. На рис. 1.5 представлена діаграма, що відображає співвідношення швидкостей валків і металу на всьому протязі осередку деформування.



- 1 – горизонтальна складова окружної швидкості валків;  
2 – швидкість металу

**Рисунок 1.5** – Співвідношення швидкості валків і металу в осередку деформування

Випередження

$$S_{h1} = (\vartheta_1 - \vartheta_B) / \vartheta_B, \quad (1.27)$$

де  $S_{h1}$  – випередження;

$\vartheta_B$  – окружна швидкість обертання валків, м/с.

Випередження можна виразити у відсотках

$$S_{h1} = [(\vartheta_1 - \vartheta_B) / \vartheta_B] \cdot 100\%.$$

Відставання

$$S_{h0} = \frac{\vartheta_B \cdot \cos \alpha - \vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha} = 1 - \frac{\vartheta_0}{\vartheta_B \cdot \cos \alpha}. \quad (1.28)$$

Випередження в розрахунках процесу прокатки визначається за формулою Екелунда

$$S_{h1} = \frac{\gamma^2}{2} \cdot \left( \frac{D_B}{h_1} - 1 \right), \quad (1.29)$$

де  $\gamma$  - нейтральний кут (див. рис. 1.4), град.;

$D_B$  – діаметр валків, мм.

Для знаходження нейтрального кута можна скористатися формулою Екелунда - Павлова

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \beta}\right), \quad (1.30)$$

де  $\beta$  - кут тертя, град., який визначається з формули

$$\beta = \arctan f, \quad (1.31)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя.

Коефіцієнт тертя розраховується за формулою Бахтінова – Штернова [3]

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_m), \quad (1.32)$$

де  $k_1$  - коефіцієнт, що враховує матеріал валків;

$k_2$  - коефіцієнт, що враховує вплив швидкості прокатки;

$k_3$  - коефіцієнт, характеризуючий марку сталі;

$T_m$  - температура металу в даному проході, °C.

Якщо прокатка здійснюється на сталевих валках, то коефіцієнт  $k_1 = 1$ , якщо на чавунних валках -  $k_1 = 0,8$ .

Коефіцієнт, що враховує вплив швидкості прокатки, визначається за формулою

$$k_2 = 1,67 \cdot v_1^{-0,25} - 0,4. \quad (1.33)$$

При швидкостях прокатки менше 2 м/с коефіцієнт  $k_2 = 1$ , при швидкостях прокатки більше 20 м/с коефіцієнт  $k_2 = 0,4$ .

Коефіцієнт, характеризуючий марку сталі

$$k_3 = 0,97926 + [C] \cdot (0,0031 \cdot [Ni] + 0,00175 \cdot [W]) + 0,02457 \cdot [Mn] + 0,02144 \cdot [Cr] + 0,001 \cdot [Mo] \quad (1.34)$$

де [...] - вміст даного елементу в сталі у відсотках.

Для вуглецевих сталей коефіцієнт  $k_3 = 1$ .

## **1.2 Завдання на виконання розрахунків параметрів формозмінювання при поздовжньому прокатуванні штаб**

Для виконання розрахунку студентам указуються вихідні дані, які є обов'язковими і не можуть бути змінені в процесі розрахунку.

Як приклад нижче приведений розрахунок параметрів формозмінювання при прокатуванні заготовки товщиною  $h_0=180$  мм, шириною  $b_0=500$  мм і довжиною  $l_0=5000$  мм в реверсивній кліті за 7 проходів з обтисненнями в кожному проході  $\Delta h_1 \dots \Delta h_7$  відповідно 45, 40, 25, 20, 15, 10, 5 мм. При цьому розширення в кожному проході склало  $\Delta b_1 \dots \Delta b_7$  15, 14, 12, 12, 11, 9, 7 мм відповідно.

В результаті розрахунку повинні бути визначені:

- товщина штаби після кожного проходу;

- відносне і істинне відносне обтиснення після кожного проходу;
- ширина штаби після кожного проходу;
- довжина штаби після кожного проходу;
- коефіцієнти обтиснення, розширення і витягання;
- загальний коефіцієнт витягання;
- середній коефіцієнт витягання.

### 1.3 Визначення параметрів формозмінення

Проведемо розрахунок всіх параметрів деформації для першого проходу. Товщину штаби після проходу визначаємо по формулі

$$h_1 = h_0 - \Delta h_1 = 180 - 45 = 135 \text{ мм.}$$

Відносне обтиснення в першому проході

$$\varepsilon_{h1} = \Delta h_1 / h_0 = 45 / 180 = 0,25 \text{ или } 25 \, \%.$$

Істинне відносне обтиснення розраховуємо по формулі

$$\delta_{h1} = \ln(h_0 / h_1) = \ln(180 / 135) = 0,288 \text{ или } 28,8 \, \%.$$

Ширина штаби після проходу

$$b_1 = b_0 + \Delta b_1 = 500 + 15 = 515 \text{ мм.}$$

Довжину штаби після проходу можна знайти, використовуючи умову сталості об'єму металу при прокатуванні

$$h_0 \cdot b_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot b_1 \cdot l_1.$$

З умови сталості об'єму отримуємо

$$l_1 = \frac{h_0 \cdot b_0 \cdot l_0}{h_1 \cdot b_1} = \frac{180 \cdot 500 \cdot 5000}{135 \cdot 515} = 6472 \text{ мм.}$$

Коефіцієнт обтиснення в першому проході

$$1/\eta_1 = h_0 / h_1 = 180 / 135 = 1,333.$$

Коефіцієнт розширення

$$\beta_1 = b_1 / b_0 = 515 / 500 = 1,030.$$

Коефіцієнт витягання

$$\mu_1 = l_1 / l_0 = 6472 / 5000 = 1,294.$$

Загальний коефіцієнт витягання для 1-го проходу дорівнює:

$$\mu_{\text{заг1}} = l_1 / l_0 = 6472 / 5000 = 1,294,$$

для 2-го проходу  $\mu_{\text{заг2}} = l_2 / l_0$ , і т. д. до 7-го проходу.

Для решти проходів вищенаведені параметри розраховуються аналогічно. Кінцеві результати розрахунку зведені в таблицю 1.1.

**Таблиця 1.1** - Результати розрахунку параметрів формозмінювання при поздовжньому прокатуванні штаби

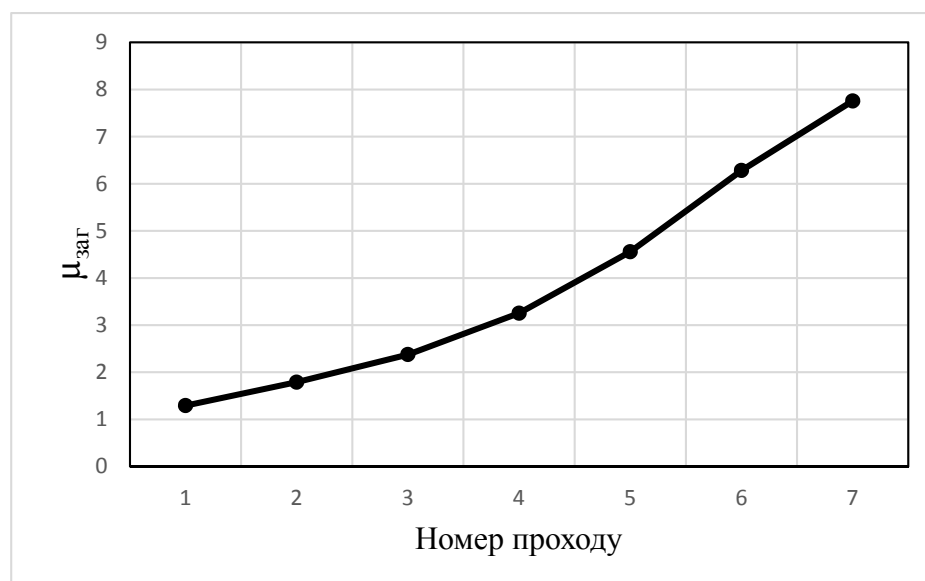
Номер проходу (n)	$h$ , мм	$b$ , мм	$l$ , мм	$\varepsilon_h$ , %	$\delta_h$ , %	$\frac{1}{\eta}$	$\beta$	$\mu$	$\eta \cdot \beta \cdot \mu$	$\mu_{\text{заг}}$
1	135	515	6472	25,0	28,8	1,333	1,030	1,294	1,0	1,294
2	95	529	8954	29,6	35,1	1,421	1,027	1,383	1,0	1,791
3	70	541	11882	26,3	30,5	1,357	1,023	1,327	1,0	2,377
4	50	553	16274	28,6	33,6	1,400	1,022	1,370	1,0	3,255
5	35	564	22795	30,0	35,7	1,429	1,020	1,401	1,0	4,559
6	25	573	31412	28,6	33,6	1,400	1,016	1,378	1,0	6,283
7	20	580	38791	20,0	22,3	1,250	1,012	1,235	1,0	7,759

Середній коефіцієнт витягання

$$\mu_{\text{сер}} = \sqrt[7]{\mu_{\text{заг}}} = \sqrt[7]{7,757} = 1,340.$$

Варіанти вихідних даних для виконання завдання № 1 приведені в табл. 1.2.

Побудувати графік залежності загального коефіцієнту витягання  $\mu_{\text{заг}}$  від номера проходу за прикладом рис. 1.6.



**Рисунок 1.6** – Залежність загального коефіцієнту витягання  $\mu_{\text{заг}}$  від номера проходу



## 1.4 Варіанти індивідуальних завдань

**Таблиця 1.2** – Вихідні дані для розрахунку параметрів формозмінювання при поздовжньому прокатуванні штаби

№ варіанту	h <sub>0</sub> , мм	b <sub>0</sub> , мм	l <sub>0</sub> , мм	Δh <sub>1</sub> , мм	Δh <sub>2</sub> , мм	Δh <sub>3</sub> , мм	Δh <sub>4</sub> , мм	Δh <sub>5</sub> , мм	Δh <sub>6</sub> , мм	Δh <sub>7</sub> , мм	Δb <sub>1</sub> , мм	Δb <sub>2</sub> , мм	Δb <sub>3</sub> , мм	Δb <sub>4</sub> , мм	Δb <sub>5</sub> , мм	Δb <sub>6</sub> , мм	Δb <sub>7</sub> , мм	D <sub>B</sub> , мм
1	200	550	4500	45	35	30	20	10	10	5	20	17	16	14	12	10	8	950
2	180	450	5000	30	30	25	20	15	10	5	15	15	13	12	10	9	7	850
3	220	530	4800	45	40	35	25	15	10	10	19	17	15	15	11	10	7	1000
4	150	500	5200	30	25	20	15	10	10	10	13	10	9	9	7	6	5	800
5	190	520	4600	40	30	30	20	15	10	5	17	15	11	10	8	7	6	900
6	210	500	5200	50	35	25	25	15	10	10	15	14	14	12	10	9	7	930
7	160	490	4600	35	30	20	10	10	10	5	18	16	15	12	9	8	8	1050
8	220	600	4500	50	40	30	20	20	10	10	20	18	14	12	12	7	6	800
9	170	500	5000	30	25	15	15	15	10	5	16	14	13	10	9	9	7	950
10	200	480	4900	45	35	25	20	15	10	5	20	17	15	14	11	10	6	900
11	240	650	5300	55	45	35	25	15	10	10	15	12	11	9	9	7	5	1000
12	140	500	4700	25	25	20	15	10	10	5	13	10	9	6	5	4	4	1200
13	210	570	5400	40	30	30	20	20	10	10	16	14	13	12	10	9	7	800
14	170	580	4900	35	25	20	20	10	5	5	15	12	10	9	9	6	5	930
15	160	550	5500	25	20	20	15	15	10	5	14	14	12	10	8	8	5	850
16	200	640	5000	45	30	20	15	15	10	10	18	15	13	13	9	8	7	800
17	140	480	5300	25	25	20	15	10	10	5	13	13	10	9	7	5	4	800
18	230	500	4900	45	35	25	20	15	15	10	17	15	15	12	11	9	7	950
19	190	620	6000	30	30	20	20	20	10	10	14	13	11	9	8	6	4	850
20	220	650	5000	40	30	30	20	15	15	10	19	16	15	12	9	9	6	1000

## 2 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ЛИСТОВОМУ ПРОКАТУВАННІ

(Завдання 2)

### 2.1 Алгоритм розрахунку

Алгоритм розрахунку розмірів осередку деформування представляє собою послідовність розрахунків вказаних нижче параметрів [1-4].

1. Абсолютне обтиснення штаби

$$\Delta h = h_0 - h_1. \quad (2.1)$$

2. Відносне обтиснення

$$\varepsilon = (h_0 - h_1)/h_0 = \Delta h/h_0. \quad (2.2)$$

3. Кут контакту

$$\alpha = \sqrt{2 \cdot \Delta h / D}. \quad (2.3)$$

4. Довжина дуги контакту штаби з валками

$$l_d = \sqrt{\Delta h \cdot D / 2} = \sqrt{\Delta h \cdot R}. \quad (2.4)$$

5. Ширина штаби після проходу  $b_1$  і величина розширення  $\Delta b$

$$b_1 = b_0 + \Delta b, \quad (2.5)$$

$$\Delta b = 0,4 \cdot \Delta h \cdot l_d / h_0 = 0,4 \cdot \varepsilon \cdot l_d. \quad (2.6)$$

6. Площа контактної поверхні

$$A_k = 0,5 \cdot l_d \cdot (b_0 + b_1). \quad (2.7)$$

7. Коефіцієнт витягання (визначається з умови постійності об'єму)

$$\lambda = h_0 \cdot b_0 / h_1 \cdot b_1. \quad (2.8)$$

8. Довжина штаби після проходу

$$L_1 = \lambda \cdot L_0. \quad (2.9)$$

9. Коефіцієнти розширення і обтиснення

$$\xi = b_0 / b_1; 1/\eta = h_0 / h_1. \quad (2.10)$$

### 2.2 Приклад розрахунку

Визначити вплив обтиснення на довжину осередку деформування при прокатуванні штаби у валках діаметром 300, 600, 900 і 1200 мм, якщо обтиснення приймають наступні значення 0,5; 1,0; 2; 4 і 8 мм. Побудувати графіки залежності довжини осередку деформування і кута контакту від обтиснення і діаметру валків.

### ***Рішення***

1. Обчислюємо довжину дуги контакту металу валками по формулі (табл. 2.1)

$$l_d = \sqrt{\Delta h \cdot R}.$$

**Таблиці 2.1** – Змінення довжини дуги контакту металу з валками від обтиснення і діаметра валків

Обтиснення $\Delta h$ , мм	Довжина дуги контакту $l_d$ , мм при діаметрі валків $D_v$ , мм			
	300	600	900	1200
0,5	8,66	12,25	14,14	17,32
1,0	12,25	17,32	20,00	24,50
2,0	17,32	24,50	28,28	34,64
4,0	24,50	34,64	40,00	48,99
8,0	34,64	48,99	56,57	69,28

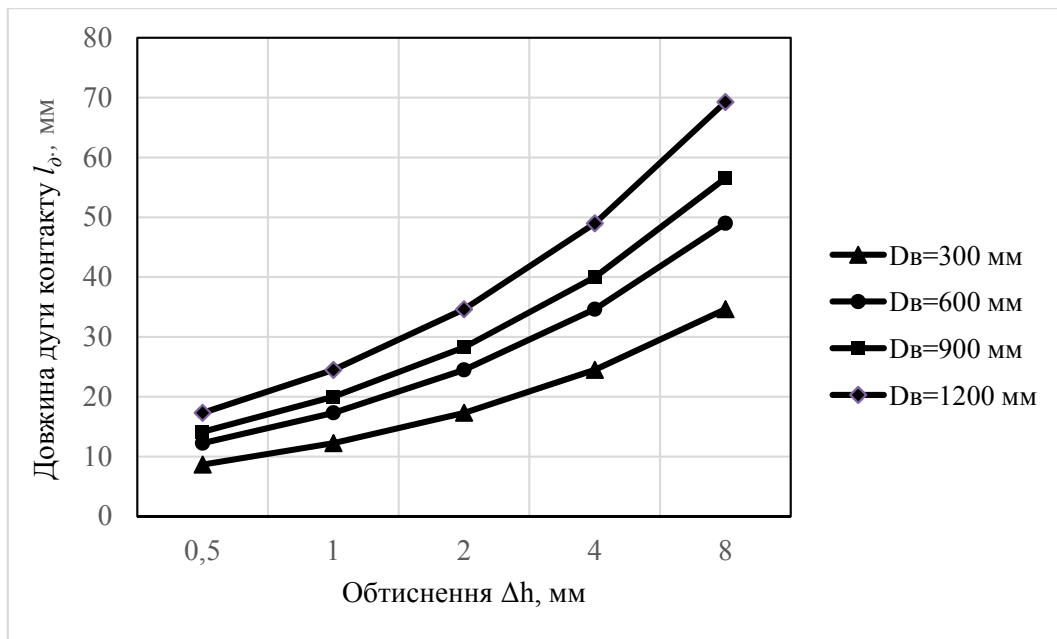
2. Розраховуємо кут контакту металу валками по формулі (табл. 2.2)

$$\alpha = \sqrt{\Delta h / R}.$$

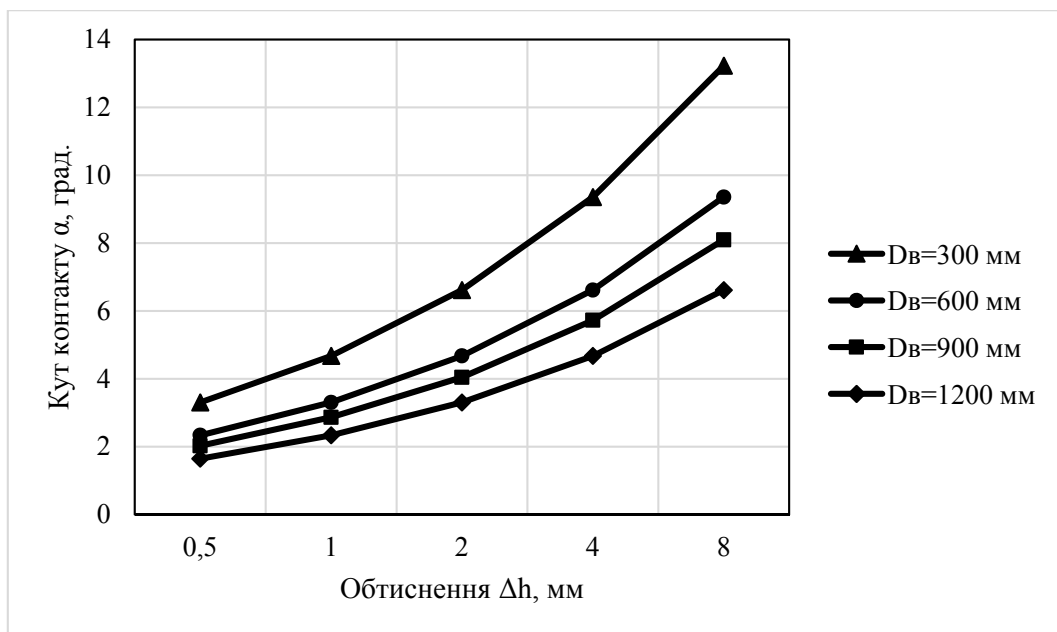
**Таблиці 2.2** – Змінення кута контакту від обтиснення і діаметра валків

Обтиснення $\Delta h$ , мм	Кут контакту $\alpha$ , град. при діаметрі валків $D_v$ , мм			
	300	600	900	1200
0,5	3,31	2,34	2,03	1,65
1,0	4,68	3,31	2,87	2,34
2,0	6,62	4,68	4,05	3,31
4,0	9,36	6,62	5,73	4,68
8,0	13,23	9,36	8,10	6,62

3. Використовуючи дані табл. 2.1 і 2.2, будуємо графіки вказаних залежностей (рис. 2.1 і 2.2).



**Рисунок 2.1** – Залежність довжини дуги контакту від обтиснення і діаметра валків



**Рисунок 2.2** – Залежність кута контакту від обтиснення і діаметра валків

## 2.3 Варіанти індивідуальних завдань

**Таблиці 2.3** – Варіанти індивідуальних завдань виконання розрахунку характеристик осередку деформування

№ варіанту	Діаметр валків $D_v$ , мм				Обтиснення $\Delta h$ , мм				
Приклад	300	600	900	1200	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
1	305	605	805	1205	0,55	1,05	2,05	4,05	8,05
2	310	610	810	1210	0,60	1,10	2,10	4,10	8,10
3	315	615	815	1215	0,60	1,15	2,15	4,15	8,15
4	320	620	820	1220	0,65	1,20	2,20	4,20	8,20
5	325	625	825	1225	0,70	1,25	2,25	4,25	8,25
6	330	630	830	1230	0,70	1,30	2,30	4,30	8,30
7	335	635	835	1235	0,75	1,35	2,35	4,35	8,35
8	340	640	840	1240	0,80	1,40	2,40	4,40	8,40
9	345	645	845	1245	0,80	1,45	2,45	4,45	8,45
10	350	650	850	1250	0,85	1,50	2,50	4,50	8,50
11	355	655	855	1255	0,88	1,55	2,55	4,55	8,55
12	360	660	860	1260	0,91	1,60	2,60	4,60	8,60
13	365	665	865	1265	0,95	1,65	2,65	4,65	8,65
14	370	670	870	1270	0,98	1,70	2,70	4,70	8,70
15	375	675	875	1275	1,01	1,75	2,75	4,75	8,75
16	380	680	880	1280	1,04	1,80	2,80	4,80	8,80
17	385	685	885	1285	1,08	1,85	2,85	4,85	8,85
18	390	690	890	1290	1,11	1,90	2,90	4,90	8,90
19	395	695	895	1295	1,14	1,95	2,95	4,95	8,95
20	400	700	900	1300	1,17	2,00	3,00	5,00	9,00

### 3 МЕТОДИКА І АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ МАРШРУТУ І ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВОЛОЧІННЯ ПРУТКА

(Завдання 3)

#### 3.1 Теоретичний вступ

Розрахунок маршрутів волочіння прутків від заготовки до готового виробу застосовується у тому випадку, коли, виходячи з технологічних міркувань, заздалегідь відомий діаметр початкової заготовки. Наприклад, мінімальний діаметр заготовки може визначатися мінімально можливим діаметром злитка і силовими можливостями існуючого пресового устаткування, на якому обробляється заготівка [5, 6].

Нехай  $D_H$  - діаметр початкової заготовки, а  $D_K$  - діаметр готового виробу. У кожному проході коефіцієнт витягання визначається по формулі, залежно від діаметра заготовки до і після волочіння. Так, наприклад, після першого проходу коефіцієнт витягання дорівнює

$$\lambda_1 = \frac{D_H^2}{D_1^2}, \quad (3.1)$$

після другого проходу

$$\lambda_2 = \frac{D_1^2}{D_2^2}, \quad (3.2)$$

після сьомого проходу

$$\lambda_7 = \frac{D_6^2}{D_K^2}, \quad (3.3)$$

де  $D_1, D_2 \dots, D_6$  – діаметр прутка після 1-го, 2-го..., 6-го проходів, мм.

Накопичений коефіцієнт витягання по проходах  $\lambda_{H1}$  визначається таким чином. Після першого проходу

$$\lambda_{H1} = \lambda_1, \quad (3.4)$$

після другого проходу

$$\lambda_{H2} = \lambda_2 \cdot \lambda_{H1}, \quad (3.5)$$

після сьомого проходу

$$\lambda_{H7} = \lambda_7 \cdot \lambda_{H6}. \quad (3.6)$$

Ступінь деформації по проходах дорівнює

$$\varepsilon_i = \left(1 - \frac{1}{\lambda_i}\right) \cdot 100 \%, \quad (3.7)$$

де  $i$  – номер проходу.

Накопичена ступінь деформації в  $i$ -тому проході дорівнює

$$\varepsilon_{Hi} = \left(1 - \frac{1}{\lambda_{Hi}}\right) \cdot 100 \%. \quad (3.8)$$

На механічні властивості при холодній обробці тиском впливає ступінь деформації. Напруження течії металу ( $\sigma_T$ , МПа) після кожного проходу визначається по формулі апроксимації

$$\sigma_{Ti} = (A \cdot B^{\varepsilon_i} + C) \cdot 9,81, \quad (3.9)$$

де  $A, B, C$  – коефіцієнти апроксимації для даного металу, задаються за довідковими даними.

Середнє напруження течії після першого проходу дорівнює

$$\sigma_{cp1} = \sqrt{\sigma_{T0} \cdot \sigma_{T1}}, \quad (3.10)$$

де  $\sigma_{T0}$  – початкове напруження течії металу у відпаленому стані, МПа (визначається за довідковими даними).

Середнє напруження течії після  $i$ -того проходу дорівнює

$$\sigma_{cpi} = \sqrt{\sigma_{T(i-1)} \cdot \sigma_{Ti}}. \quad (3.11)$$

Приведений напівкут волоки ( $\alpha_{\pi}$ , град.) після  $i$ -того проходу визначається з формули

$$\tan \alpha_{\pi i} = \frac{\tan \alpha}{1 + 2 \cdot m_i \cdot \frac{D_i}{D_{(i-1)} - D_i} \cdot \tan \alpha} \quad (3.12)$$

де  $\alpha$  – напівкут волоки, град.;

$$m_i = \frac{l_{\pi}}{D_i}, \quad (3.13)$$

$l_{\pi}$  – довжина пояски волоки, мм.

$$\alpha_{\pi i} = \arctan(\tan \alpha_{\pi i}). \quad (3.14)$$

Кут тертя дорівнює

$$\rho = \arctan \mu_T, \quad (3.15)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт тертя.

Позначимо після кожного проходу через  $a_i$  наступне рівняння

$$a_i = (\cos^2 \rho) \cdot (1 + \mu_T \cdot \cot \alpha_{\pi i}) - 1. \quad (3.16)$$

Тоді середня напруга волочіння після кожного проходу дорівнює

$$K_{Bi} = \frac{1}{\cos^2 \left( \frac{\alpha + \rho}{2} \right)} \cdot \sigma_{cpi} \cdot \frac{a_i + 1}{a_i} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_i}{D_{(i-1)}} \right)^{2 \cdot a_i} \right] + \\ + 0,11 \cdot \sigma_{T0} \cdot \left( \frac{D_i}{D_{(i-1)}} \right)^{2 \cdot a_i}. \quad (3.17)$$

Повна сила волочіння після кожного проходу дорівнює добутку середньої напруги на площу перетину кінця прутка, що виходить, тобто

$$P_i = \frac{\pi \cdot K_{Bi} \cdot D_i^2}{4 \cdot 1000}, \quad (3.18)$$

де  $P_i$  - повне зусилля волочіння, кН.

Після кожного проходу проводиться порівняння отриманих значень параметрів волочіння з допустимими (у квадратних дужках), а саме:

$$\lambda_i \leq [\lambda], \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_{hi} \leq [\varepsilon], \quad (3.20)$$

$$P_i \leq [P], \quad (3.21)$$

$$\gamma_i > 1, \quad (3.22)$$

де  $\gamma_i$  - коефіцієнт запасу по напруженню течії в  $i$  - тому проході:

$$\gamma_i = \frac{\sigma_{Ti}}{K_{Bi}}. \quad (3.23)$$

Якщо одна з умов не виконуватиметься, необхідно збільшити діаметр волоки в даному проході або провести відпал прутка для зменшення межі текучості металу.

### 3.2 Приклад розрахунку

Вихідні дані:

- матеріал виробу мідь М4;
- діаметр початкової заготовки:  $D_H = 9$  мм;
- діаметр готового прутка  $D_K = 3$  мм;
- діаметри прутка по переходам (сім переходів):  $D_1 = 7,7$  мм;  $D_2 = 6,6$  мм;  $D_3 = 5,6$  мм;  $D_4 = 4,8$  мм;  $D_5 = 4,1$  мм;  $D_6 = 3,5$  мм;
- напівкут волоки:  $\alpha = 8$  град., або  $0,1396$  рад.;
- коефіцієнт тертя:  $\mu_T = 0,06$ ;
- довжина поясочка волоки:  $l_{\Pi} = 2$  мм;
- напруження течії у відпаленому стані:  $\sigma_{T0} = 73,6$  МПа;
- коефіцієнти апроксимації:  $A = -33,208973$ ;  $B = 0,961337$ ;  $C = 41,003685$ ;
- максимальний коефіцієнт витягання за прохід  $[\lambda] = 1,4$ ;
- допустима накопичена ступінь деформації між відпалами  $[\varepsilon] = 80$  %;
- допустиме зусилля волочіння  $[P] = 8$  кН.

Після 4-го проходу необхідно провести відпал.

#### **1-й прохід.**

Коефіцієнт витягання по формулі (3.1) дорівнює:



$$\lambda_1 = \frac{D_H^2}{D_1^2} = \frac{9^2}{7,7^2} = 1,37 < [\lambda].$$

Накопичений коефіцієнт витягання по формулі (3.4) дорівнює:

$$\lambda_{H1} = \lambda_1 = 1,37.$$

Ступінь деформації по формулі (3.7) дорівнює:

$$\varepsilon_1 = \left(1 - \frac{1}{\lambda_1}\right) \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{1}{1,37}\right) \cdot 100 \% = 26,80 \%.$$

Накопичена ступінь деформації дорівнює

$$\varepsilon_{H1} = \left(1 - \frac{1}{\lambda_{H1}}\right) \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{1}{1,37}\right) \cdot 100 \% = 26,80 \% < [\varepsilon].$$

Для визначення середнього значення межі текучості, необхідно знайти значення межі текучості в кінці деформації. По формулі (3.9) знаходимо:

$$\begin{aligned}\sigma_{T1} &= (A \cdot B^{\varepsilon_1} + C) \cdot 9,81 = (-33,208973 \cdot 0,961337^{26,80} + 41,003685) \cdot 9,81 = \\ &= 289,019 \text{ МПа},\end{aligned}$$

$$\sigma_{cp1} = \sqrt{\sigma_{T0} \cdot \sigma_{T1}} = \sqrt{73,6 \cdot 289,019} = 145,849 \text{ МПа}.$$

По формулі (3.13) знаходимо

$$m_1 = \frac{l_{II}}{D_1} = \frac{2}{7,7} = 0,26.$$

По формулі (3.12) знаходимо

$$\begin{aligned}\tan \alpha_{H1} &= \frac{\tan \alpha}{1 + 2 \cdot m_1 \cdot \frac{D_1}{D_H - D_1} \cdot \tan \alpha} = \frac{\tan 0,1396}{1 + 2 \cdot 0,26 \cdot \frac{7,7}{9 - 7,7} \cdot \tan 0,1396} \\ &= 0,098,\end{aligned}$$

$$\alpha_{H1} = \arctan 0,098 = 5,60 \text{ град.}$$

Кут тертя по формулі (3.15) дорівнює

$$\rho = \arctan \mu_T = \arctan 0,06 = 3,434 \text{ град. или } 0,06 \text{ рад.}$$

По формулі (7.16) знаходимо:

$$\begin{aligned}a_1 &= (\cos^2 \rho) \cdot (1 + \mu_T \cdot \cot \alpha_{H1}) - 1 = (\cos^2 0,06) \cdot (1 + 0,06 \cdot \cot 0,098) - 1 \\ &= 0,606.\end{aligned}$$

Середнє напруження волочіння після першого проходу по формулі 3.17 дорівнює:

$$K_{B1} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha + \rho}{2}\right)} \cdot \sigma_{cp1} \cdot \frac{a_1 + 1}{a_1} \cdot \left[ 1 - \left(\frac{D_1}{D_H}\right)^{2 \cdot a_1} + 0,11 \cdot \sigma_{T0} \cdot \left(\frac{D_1}{D_H}\right)^{2 \cdot a_1} \right]$$

$$= \frac{1}{\cos^2\left(\frac{0,1396 + 0,06}{2}\right)} \cdot 145,849 \cdot \frac{0,606 + 1}{0,606} \cdot \left[ 1 - \left(\frac{7,7}{9}\right)^{1,212} + 0,11 \cdot 73,6 \cdot \left(\frac{7,7}{9}\right)^{1,212} \right] = 74,0 \text{ МПа.}$$

Повна сила волочіння по формулі (3.18) дорівнює:

$$P_1 = \frac{\pi \cdot K_{B1} \cdot D_1^2}{4 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 74,0 \cdot 7,7^2}{4 \cdot 1000} = 3,44 \text{ кН} < [P].$$

Коефіцієнт запасу по межі текучості дорівнює (формула 3.23):

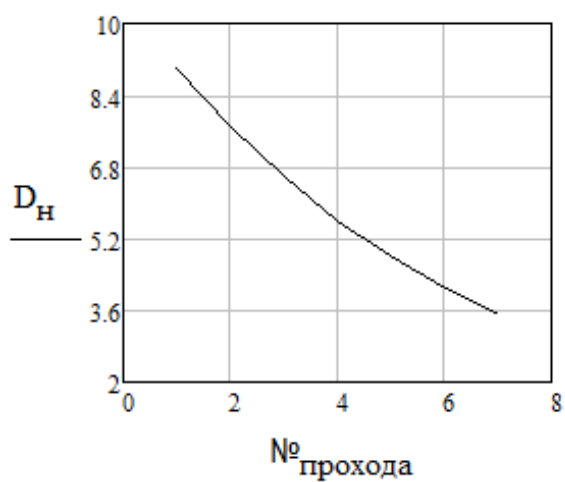
$$\gamma_1 = \frac{\sigma_{T1}}{K_{B1}} = \frac{289,019}{74,0} = 3,91 > 1.$$

Умова (3.22) виконується. Аналогічно розраховуються наступні переходи і за результатами розрахунків заповнюється таблиця 3.1.

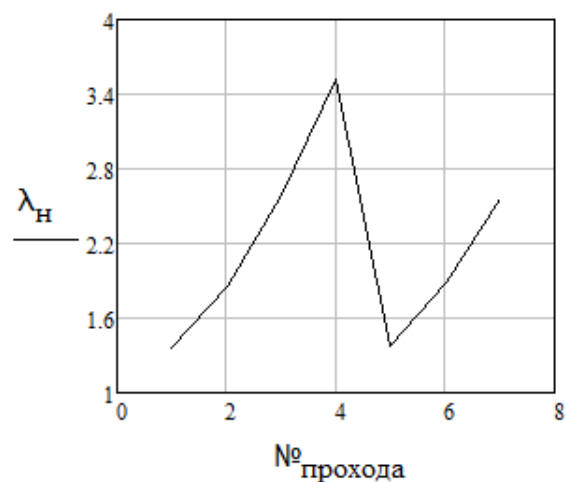
**Таблиця 3.1** – Результати розрахунку енергосилових параметрів волочіння прутка

Номер проходу	D <sub>H</sub> , мм	D <sub>K</sub> , мм	λ	ε, %	K <sub>B</sub> , МПа	P, кН	γ	λ <sub>H</sub>	ε <sub>H</sub> , %
1	9	7,7	1,37	26,8	74,0	3,44	3,91	1,37	26,8
2	7,7	6,6	1,36	26,53	140,3	4,80	2,05	1,86	46,22
3	6,6	5,6	1,39	28,01	150,7	3,71	1,95	2,58	61,28
4	5,6	4,8	1,36	26,53	146,3	2,65	1,97	3,52	71,56
Відпал									
5	4,8	4,1	1,37	27,04	79,3	1,05	3,66	1,37	27,04
6	4,1	3,5	1,37	27,13	155,0	1,49	1,87	1,88	46,83
7	3,5	3,0	1,36	26,53	155,5	1,10	1,85	2,56	60,94

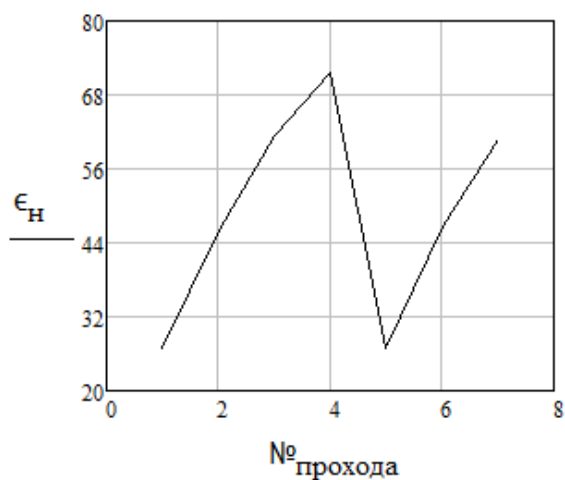
Побудувати графіки залежностей:  $D = f(\text{№ проходу})$ ;  $\lambda_H = f(\text{№ проходу})$ ;  $\epsilon_H = f(\text{№ проходу})$ ;  $K_B = f(\epsilon_H)$ . Приклад графіків наведено на рис. 3.1.



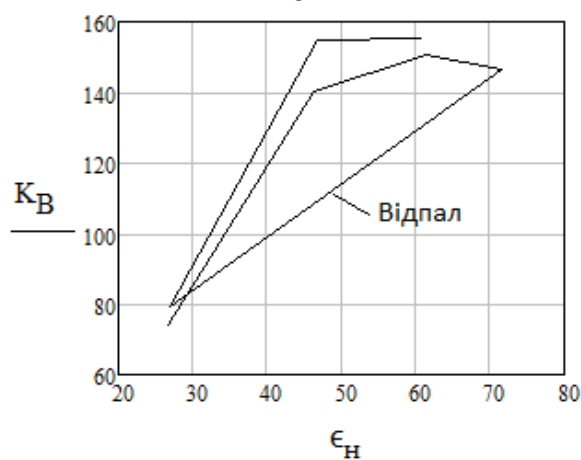
а



б



в



г

**Рисунок 3.1** – Залежність діаметра заготовки  $D_H$  (а), накопиченого коефіцієнту витягання  $\lambda_H$  (б) і накопиченої ступені деформації  $\epsilon_H$  (в) від номера проходу, середньої напруги волочіння  $K_B$  від  $\epsilon_H$  (г) в процесі волочіння мідного прутка

У табл. 3.2 наведено варіанти для виконання індивідуальних завдань.

### 3.3 Варіанти індивідуальних завдань розрахунку енергосилових параметрів волочіння прутка

Таблиця 3.2 - Варіанти індивідуальних завдань розрахунку енергосилових параметрів волочіння прутка

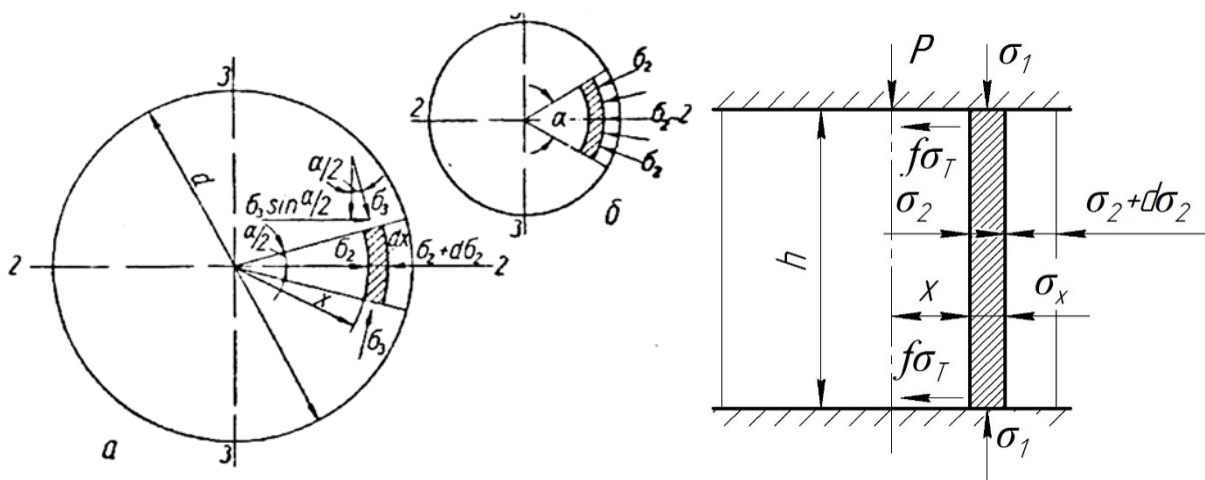
№ варіанта	D <sub>н</sub> , мм	Діаметр після і - того проходу, мм						D <sub>к</sub> , мм	α, град	μ <sub>т</sub>	l <sub>п</sub> , мм	σ <sub>то</sub> , МПа	[λ]	[ε], %	[Р], кН	Коефіцієнти апроксимації		
		D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>									A	B	C
Приклад	9	7.7	6.60	5.60	4.80	4.10	3.50	3	8	0.060	2	73.6	1.4	80	8	-33.208973	0.961337	41.003685
1	9	7.61	6.61	5.61	4.81	4.11	3.51	3	8	0.061	2	73.6	1.4	80	8	-33.218973	0.962337	41.004685
2	9	7.52	6.62	5.62	4.82	4.12	3.52	3	8	0.062	2	73.6	1.45	80	8	-33.228973	0.963337	41.005685
3	9	7.43	6.63	5.63	4.83	4.13	3.53	3	8	0.063	2	73.6	1.50	80	8	-33.238973	0.964337	41.006685
4	9	7.34	6.64	5.64	4.84	4.14	3.54	3	8	0.064	2	73.6	1.55	80	8	-33.248973	0.965337	41.007685
5	9	7.25	6.65	5.65	4.85	4.15	3.55	3	8	0.065	2	73.6	1.55	80	8	-33.258973	0.966337	41.008685
6	9	7.86	6.66	5.66	4.86	4.16	3.56	3	8	0.066	2	73.6	1.45	80	8	-33.268973	0.967337	41.009685
7	9	7.91	6.67	5.67	4.87	4.17	3.57	3	8	0.067	2	73.6	1.45	80	8	-33.278973	0.968337	41.010685
8	9	7.11	6.68	5.68	4.88	4.18	3.58	3	8	0.068	2	73.6	1.65	80	8	-33.288973	0.969337	41.011685
9	9	8.00	6.69	5.69	4.89	4.19	3.59	3	8	0.069	2	73.6	1.45	80	8	-33.298973	0.970337	41.012685
10	9	8.10	6.70	5.70	4.90	4.20	3.60	3	8	0.070	2	73.6	1.5	80	8	-33.308973	0.971337	41.013685
11	9	7.71	6.71	5.71	4.91	4.21	3.61	3	8	0.071	2	73.6	1.5	80	8	-33.318973	0.972337	41.014685
12	9	7.72	6.72	5.72	4.92	4.22	3.62	3	8	0.072	2	73.6	1.5	80	8	-33.328973	0.973337	41.015685
13	9	7.73	6.73	5.73	4.93	4.23	3.63	3	8	0.073	2	73.6	1.5	80	8	-33.338973	0.974337	41.016685
14	9	7.74	6.74	5.74	4.94	4.24	3.64	3	8	0.074	2	73.6	1.5	80	8	-33.348973	0.975337	41.017685
15	9	7.75	6.75	5.75	4.95	4.25	3.65	3	8	0.075	2	73.6	1.5	80	8	-33.358973	0.976337	41.018685
16	9	7.76	6.76	5.76	4.96	4.26	3.66	3	8	0.076	2	73.6	1.5	80	8	-33.368973	0.977337	41.019685
17	9	7.77	6.77	5.77	4.97	4.27	3.67	3	8	0.077	2	73.6	1.55	80	8	-33.378973	0.978337	41.020685
18	9	7.78	6.78	5.78	4.98	4.28	3.68	3	8	0.078	2	73.6	1.55	80	8	-33.388973	0.979337	41.021685
19	9	7.79	6.79	5.79	4.99	4.29	3.69	3	8	0.079	2	73.6	1.55	80	8	-33.398973	0.980337	41.022685
20	9	7.81	6.80	5.80	5.00	4.30	3.70	3	8	0.080	2	73.6	1.55	80	8	-33.408973	0.981337	41.023685

## 4 СИЛА І НАПРУЖЕННЯ ПРИ КУВАННІ ЗАГОТОВОК

### 4.1 Теоретичний вступ

#### *Сила при осаджуванні циліндричної заготовки*

Осадка є найбільш характерною операцією кування, коли одночасно увесь об'єм металу піддається пластичній деформації. Один із способів визначення зовнішнього нормального контактного напруження при осаджуванні зводиться до знаходження залежності між внутрішніми головними напруженнями  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , і  $\sigma_3$  з фізичними характеристиками матеріалу (напруженням течії металу при деформації) і коефіцієнтом (показником) тертя  $f$  ( $f_{\Pi}$ ), а також розмірами поковки на даній стадії осадки (рис. 4.1) [2].



**Рисунок 4.1** - Схема сил, діючих при осаджуванні циліндричної заготовки

Вказана залежність визначається, наприклад, з рішення диференціального рівняння рівноваги усіх сил, діючих на будь який виділений елемент поковки, спільно з рівнянням пластичності. Рішення диференціального рівняння наводиться в роботах С.Н. Петрова, Л. Прандтля, Е. Зібеля. Розглянемо рішення Е. Зібеля.

Визначимо контактне нормальне напруження металу при осаджуванні плоскими бойками циліндричної форми. Виділимо елементарний шар металу завтовшки  $dx$ , і заввишки  $h$  на відстані  $x$  від центру зразка (рис. 4.1). На цей шар металу діють наступні напруження: ( $\sigma_1$ - головне нормальне контактне напруження (перпендикулярно торцю зразка):  $\sigma_2 + \sigma_2$  - головне нормальне поперечне напруження (перпендикулярно бічній поверхні зразка) із зовнішнього боку;  $\sigma_2$  – те ж саме з внутрішнього боку;  $\sigma_3$  - головне нормальне напруження, яке діє по окружності контакту;  $\alpha$ - нескінченно малий кут.

Вплив контактних сил тертя відображено напруженням  $\tau = f_{\Pi} \cdot \sigma_T$ , (умова тертя Е. Зібеля), діючим на контакті у напрямі центру зразка. Прийнято, що на бічній грані зразка при  $x = d/2 = a$  напруження  $\sigma_2 = 0$ , а в центрі зразка завдяки

впливу зовнішніх сил тертя  $\sigma_2$  має максимальне значення (рис. 4.1).

Середнє нормальне контактне напруження (СНКН) з умов тертя  $\tau = f_{\Pi} \cdot \sigma_T$ , визначають (Е. Зібель).

$$p_{cp} = \sigma_T \cdot \left(1 + 0,33 \cdot f_{\Pi} \cdot \frac{d}{h}\right). \quad (4.1)$$

Є.П. Унков вирішив задачу розрахунку СНКН з використанням рівнянь рівноваги напружень і пластичності. Так, для осаджування циліндричної заготовки за наявності на контакті тільки зон ковзання і умови тертя Г. Амонтона ( $\tau = f \cdot p_{cp}$ ) отримано наступне рівняння

$$p_{cp} = 2 \cdot \sigma_T \cdot \frac{h^2}{f^2 \cdot d^2} \cdot \left(e^{\frac{f \cdot d}{h}} - \frac{f \cdot d}{h} - 1\right). \quad (4.2)$$

Формула (1.2) може бути використана в широкому діапазоні зміни відношення  $d/h$  і коефіцієнта тертя  $f$ .

У разі, якщо при осаджуванні циліндричної заготовки на контакті з інструментом прийняти умови тертя Е. Зібеля, то із загальної формули Є.П. Унков отримав простішу формулу для розрахунку СНКН у вигляді

$$p_{cp} = \sigma_T \cdot \left(1 + 0,25 \cdot f_{\Pi} \cdot \frac{d}{h}\right). \quad (4.3)$$

Формули (4.2) і (4.3) для осаджування циліндричної заготовки при правильному визначенні  $f$  і  $f_{\Pi}$ , тобто якщо вони відповідають фактичним умовам контактного тертя, можуть бути використані для аналізу параметрів осадки в плоских бойках.

### ***Розрахунок параметрів при ковальському витяганні***

Витягання при куванні (рис. 4.2, г) є операцією, за допомогою якої збільшується довжина заготовки за рахунок зменшення її поперечного перерізу. Витягання в загальному випадку здійснюється шляхом послідовного обтиснення заготовки її кантуванням після кожного проходу (після проходу усієї довжини). Два обтиснення з кантуванням заготовки між ними називають переходом. На кожному обтисненні процес витягання прямокутного бруса можна представити як послідовне осаджування окремих ділянок заготовки по її довжині. При цьому до осаджуваної ділянки примикають з обох кінців ділянки заготовки, які знаходяться поза дією бойка і, будучи зовнішніми зонами, стримують течію металу в поперечному напрямку, тим самим, зменшуючи розширення.

Без урахування цього впливу зовнішніх зон, коефіцієнт розширення і абсолютне середнє значення ширини поковки можна визначити за формулою (4.4) при  $tg \theta = 1$

$$\beta_y = \frac{1/\eta}{\sqrt{1+B \cdot tg \theta \cdot (1/\eta - 1)/a}}; \quad (4.4)$$

$$\lambda = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{1}{\beta_y}, \quad (4.5)$$

де  $B$  - ширина заготовки;  $a$  - довжина бойка;  $1/\eta = H/h$  - коефіцієнт обтиснення;  $\lambda$ - коефіцієнт подовження;  $\beta_y$ - коефіцієнт розширення.

При ковальському витяганні для розрахунку нормального напруження використовують формулу С.І. Губкіна, яка отримана за умови максимального впливу тертя ( $\tau = \tau_s = 0,5 \cdot \sigma_\phi = 0,5 \cdot \lambda \cdot \sigma_T$ ). Оскільки в практиці можливо  $b < a$ , то формулу С.І. Губкіна можна записати у вигляді

$$p_{cp} = \beta \cdot \sigma_T \cdot \left(1 + \frac{1-m/3 \cdot n}{4} \cdot \frac{m}{h}\right). \quad (4.6)$$

Якщо  $b < a$ , то  $m = b$  і  $n = a$ ; якщо  $b > a$ , то  $m = a$  і  $n = b$ .

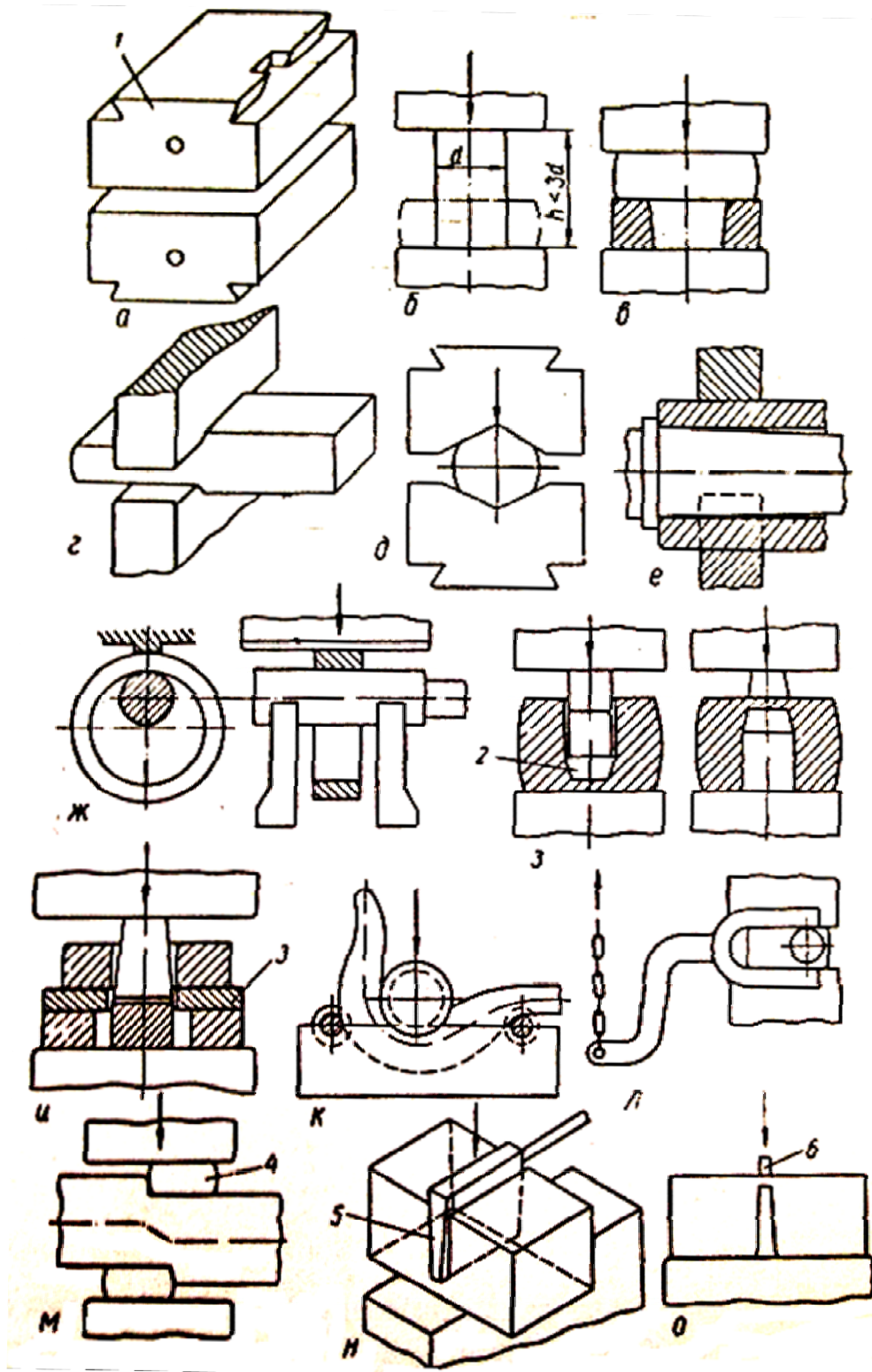
### ***Сили при гарячій деформації у відкритих штампах***

Деформацію в штампах використовують для отримання практично готових заготовок для подальшого отримання деталей складної форми (шестерні, лопатки для авіадвигунів, осі для автомобілів, приналежності для побутових приладів, тощо). Основний недолік штампування - висока вартість інструменту - штамів, особливо для остаточного доведення розмірів, де застосовують ручну працю. Технологічний процес штампування передбачає різання прокату на заготовки, їх нагрів, власне штампування, обрізання задирок (облоя), правку виробу, термічну обробку, видалення окалини, холодне калібрування (карбування) і контроль якості.

При об'ємному гарячому штампуванні нагріту заготовку поміщають в порожнину однієї частини штампу і під дією іншої частини штампу роблять деформацію, в процесі якої метал заповнює порожнину, набуваючи її форму (рис. 4.3).

Розрізняють два види штампування: у штампах відкритого типу (штампування із задиркою) і в штампах закритого типу. При відкритому, найбільш поширеному, штампуванні метал, що деформується, не лише заповнює порожнину, але і тече в роз'єм між верхнім і нижнім штампами, утворюючи задирку і облой (рис. 4.3). При закритому штампуванні метал деформується в замкнутій порожнині штампу з незначною, у ряді випадків, задиркою при затіканні металу в роз'єм між частинами штампу (рис. 4.3). Для витягання деталі після деформації нижні штампи мають вертикальні роз'єми.

В процесі найбільш поширеного відкритого штампування на кінцевій стадії використовують чорновий і чистовий штампи. Чистовий штамп за формою точно відповідає поковці, розміри його перевищують розміри поковки на значення усадки при охолодженні. Навколо чистового мостика розташована канавка для облоя. Чорнові штампи застосовують з метою виконання основної пластичної деформації. Вони відрізняються від чистового відсутністю канавки для облоя, великими глибиною, ухилами і радіусами закруглень, меншою шириною.

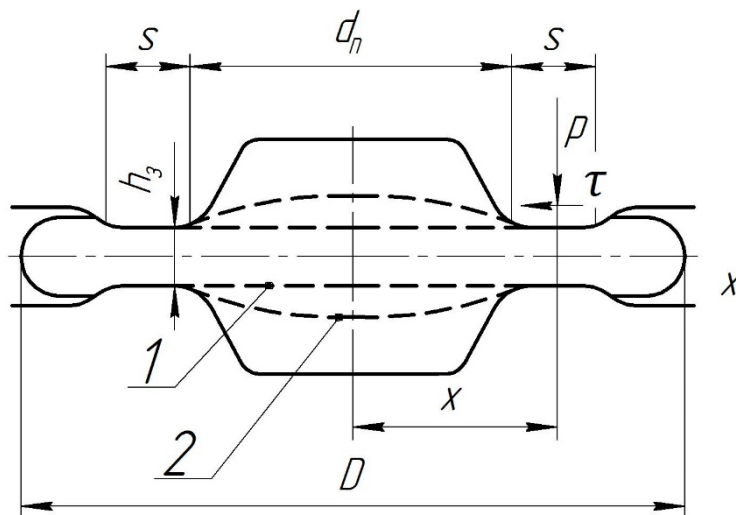


**Рисунок 4.2** - Схеми виконання основних операцій вільного кування: а - бойки; б - осадка; в - висадка; г - витягання плоскими бойками; д - витягання фасонними бойками; е - витягання за допомогою оправки; ж - роздача на оправці; з - прошивка; и - прошивка на підкладному кільці; к - гнучка; л - закручування; м - передача; н - рубка; о - закінчення рубки відсіченням.



У перший період штампування в чорновому штампі порожнина штампу заповнюється і одночасно витікає метал в задирку, в другий період (чистовий штамп) відбувається тільки витікання металу в задирку з утворенням облоя (надлишку металу), наявного в заготовці порівняно з готовою поковкою.

Для розрахунку сили при гарячому відкритому штампуванні металу відомі декілька теоретичних методів, у яких повну силу деформації визначають, як суму складових сил на окремих елементах штампу.



**Рисунок 4.3** - Схема відкритого штампування

Відомо також, що максимальна сила деформації відповідає кінцевому моменту штампування, тобто при повному заповненні порожнини інструменту металом (момент доштамповки) і утворенні задирки. При цьому, наприклад, при виготовленні бочкоподібної поковки (рис. 4.3) силу, яка необхідна для деформації в кінцевий момент штамповки, представляють у виді

$$P = P_3 + P_{\Pi}, \quad (4.7)$$

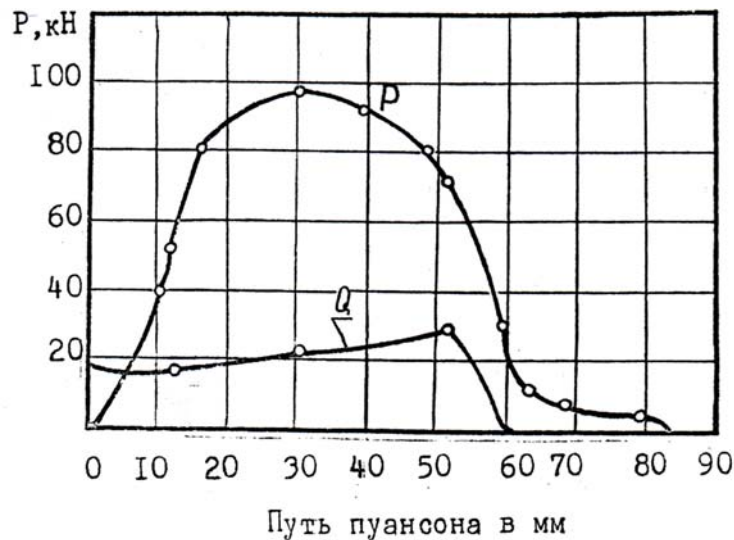
де  $P_3$  - доля сили деформації металу в задирці;  $P_{\Pi}$  - доля сили деформації металу в порожнині штампу.

#### ***Розрахунок максимальної сили холодного (листового) штампування***

При холодному штампуванні (витяганні гільзи) сила деформації змінюється в процесі руху пуансона і важливо знати її максимальне значення для розрахунку (рис. 4.4).

Значну трудність при розрахунку сили штампування представляє визначення напруження течії металу з урахуванням зміцнення. Відомо, що зміну напруження течії металу в результаті зміцнення представляють залежно від головної деформації - відносного обтиснення. При штампуванні ж визначають умовну міру витягання  $k_B = D/d$ , яка по абсолютному значенню не відповідає прийнятому у формулах відносному обтисненню. Крім того, міра витягання  $k_B$  характеризує загальне формозміну виробу, а максимальна сила деформації

відповідає проміжному положенню пуансона, оскільки зміцнення металу відбувається на ділянці виходу штаби з радіусу матриці.



**Рисунок 4.4** - Зміна сили P в процесі витягання гільзи і сили притиску Q

Аналіз експериментальних даних з нанесенням координатної сітки на заготовки показує, що при мірі витягання  $k_B = 2 \dots 2,19$  максимум сили деформації відповідає інтенсивності деформації ( $\epsilon_e = 0,54 \dots 0,62$ ). Для цих значень інтенсивності деформації відносна деформація металу складає  $\epsilon_e = 0,41 \dots 0,46$ . Ці значення відносних обтиснень і можна використати для визначення напруження течії металу.

#### 4.2 Розрахунок сили осадки (Завдання № 4)

Визначити максимальну силу деформації при осаджуванні по методу В.О. Ніколаєва [2] на фрикційному пресі циліндричної заготовки діаметром  $D = 250$  мм і висотою  $H = 250$  мм із сталі 45 з обтисненням  $\Delta h = 100$  мм при температурі  $1000^\circ\text{C}$ , швидкість осадки  $v_z = 80$  мм/с.

Визначаємо:

- міру деформації

$$\epsilon = \Delta h / H = 100 / 250 = 0,4;$$

- швидкість деформації у кінці осадки

$$u = v_z / h = 80 / 150 = 0,53 \text{ с}^{-1},$$

де  $h = H - \Delta h = 250 - 100 = 150$  мм.

Напруження течії у кінці осадки визначимо за формулою

$$\sigma_T = \sigma_{T6} \cdot k_t \cdot k_\epsilon \cdot k_u.$$

Для  $N_1 < 5$  (вуглецеві, конструкційні, низьколеговані, інструментальні сталі) маємо:

$$N_1 = C + Si + Mn + Cr + Ni + \dots;$$

$$\sigma_{T6} = 80 + 25 \cdot \{1 - [(5 - N_1)/4,5]^{1,8}\},$$

де  $\sigma_{T6}$  - базове напруження течії металу при  $t = 1000^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 0,1$  і  $u = 10 \text{ c}^{-1}$ ;  $N_1$  - сумарний вміст хімічних елементів в сталі, % (окрім сірки, фосфору і заліза).

Коефіцієнти  $k_t$ ,  $k_\varepsilon$ ,  $k_u$  визначаються за формулами, що наводяться нижче:

$$k_t = 1,66 - 1,1 \cdot (t/400 - 2)^{0,7}.$$

Для вуглецевих, інструментальних і низьколегованих сталей при  $\varepsilon \geq 0,1$  і  $u \leq 10 \text{ c}^{-1}$  маємо:

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43 \cdot [1 - 6,3 \cdot (0,5 - \varepsilon)^2];$$

$$k_u = 0,38 + 0,065 \cdot (7 + \ln u).$$

Після підстановки значень маємо:

$$N_1 = 0,45 + 0,2 + 0,2 + 0,05 + 0,03 = 0,93;$$

$$\sigma_{T6} = 80 + 25 \cdot \{1 - [(5 - 0,93)/4,5]^{1,8}\} = 84,1 \text{ МПа};$$

$$k_t = 1,66 - 1,1 \cdot (1000/400 - 2)^{0,7} = 0,98;$$

$$k_u = 0,38 + 0,065 \cdot (7 - 0,63) = 0,79;$$

$$k_\varepsilon = 1 + 0,43 \cdot [1 - 6,3 \cdot (0,5 - 0,4)^2] = 1,4;$$

$$\sigma_T = \sigma_{T6} \cdot k_t \cdot k_\varepsilon \cdot k_u = 84,1 \cdot 0,98 \cdot 1,4 \cdot 0,79 = 92,1 \text{ МПа}.$$

Діаметр циліндричної деталі у кінці осадки дорівнює

$$d = D \cdot \sqrt{H/h} = 250 \cdot \sqrt{250/150} = 323 \text{ мм}.$$

Коефіцієнт тертя і показник тертя (при  $d/h = 323/150 = 2,15$ ) дорівнюють:

$$f = 0,49 - 0,035 \cdot (4,5 - d/h) = 0,41;$$

$$f_{\Pi} = 1,13 \cdot f \cdot d/h = 1,13 \cdot 0,41 \cdot 2,15 = 1;$$

$$C_H = 0,2 + 0,031 \cdot (4,4 - f \cdot d/h)^{0,95} = \\ = 0,2 + 0,031 \cdot (4,4 - 0,41 \cdot 2,15)^{0,95} = 0,3.$$

Середнє нормальне контактне напруження у кінці осадки дорівнює

$$p_{cp} = \sigma_T \cdot \left(1 + C_H \cdot f_{\Pi} \cdot \frac{d}{h}\right) = 92,1 \cdot (1 + 0,3 \cdot 1 \cdot 2,15) = 151,6 \text{ МПа}.$$

Сила осадки визначається з формули

$$P = p_{cp} \cdot (\pi/4) \cdot d^2 = 151,6 \cdot (\pi/4) \cdot 323^2 \cdot 10^{-6} = 12,4 \text{ МН}.$$

Для осадки заготовки в плоских плитах для приведених умов деформації потрібний прес з силою стискування не менше  $P = 13 \text{ МН}$ .

У таблиці 4.1 наведено варіанти виконання індивідуальних завдання.

#### 4.3 Розрахунок маси частин молота, що падають (Завдання № 5)

Визначити масу частин молота, що падають, при осаджуванні заготовки з діаметром  $D = 100$  мм і заввишки  $H = 100$  мм до висоти  $h = 85$  мм,  $v = 6$  м/с. Матеріал заготовки - маловуглецева сталь, температура деформації  $t = 1150^\circ\text{C}$ .

Кінцевий діаметр поковки дорівнює:

$$d = D \cdot \sqrt{\frac{H}{h}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{100}{85}} \approx 108 \text{ мм.}$$

Швидкість деформації при русі частин, що падають зі швидкістю 6 м/с дорівнює

$$u = \frac{v}{h} = \frac{6000}{85} \approx 71 \text{ с}^{-1}.$$

Ступінь деформації за удар  $\varepsilon = (H - h)/H = (100 - 85)/100 = 0,15$ . Напруження течії металу сталі марки 4Х13 у кінці осадки дорівнює  $\sigma_T = 90,5$  МПа. Показник тертя при  $d/h = 1,28$ :

$$f = 0,43 - 0,058 \cdot \left(4,50 - \frac{d}{h}\right) = 0,43 - 0,058 \cdot (4,50 - 1,26) = 0,24;$$

$$f_{\Pi} = 1,13 \cdot f \cdot \frac{d}{h} = 1,13 \cdot 0,24 \cdot 1,26 = 0,35.$$

Середнє нормальне напруження дорівнює:

$$P_{cp} = \sigma_T \cdot \left(1 + 0,33 \cdot f_{\Pi} \cdot \frac{d}{h}\right) = 90,5 \cdot (1 + 0,33 \cdot 0,35 \cdot 1,28) = 103,9 \text{ МПа.}$$

Сила осадки дорівнює:

$$P = p_{cp} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 103,9 \cdot \frac{3,14}{4} \cdot 108^2 \cdot 10^{-6} = 0,96 \text{ МН.}$$

Маса частин молота, що падають, при  $P = 0,96$  МН, ККД молота  $\eta_{\Pi} = 0,8$ , і  $\Delta h = H - h = 100 - 85 = 15$  мм, дорівнює:

$$G = \frac{P \cdot 10^2 \cdot \frac{\Delta h}{1000} \cdot 2q}{\eta_{\Pi} \cdot v^2} = \frac{0,96 \cdot 10^2 \cdot 0,015 \cdot 2 \cdot 9,8}{0,8 \cdot 6^2} = 0,98 \text{ т} = 980 \text{ кг.}$$

Таким чином, для зменшення заготовки до  $h = 85$  мм потрібний молот з мінімальною масою частин, що падають  $G = 980$  кг. При меншій потужності молота задану величину обтиснення  $\Delta h = 15$  мм здійснити не вдасться.

#### 4.4 Розрахунок параметрів при ковальському витяганні (Завдання № 6)

Зробити витягання заготовки із сталі 45 з розмірами  $H = 200$  мм,  $B = 200$  мм,  $L = 400$  мм на квадратний переріз  $140 \times 140$  мм. Приймаємо довжину бойка  $a = 100$  мм, а відносне обтиснення  $\varepsilon = 0,2$ .

*Перше обтиснення.* Товщина заготовки після удару:

$h = H \cdot (1 - \varepsilon) = 200 \cdot (1 - 0,2) = 160$  мм; коефіцієнт зменшення висоти  $1/\eta = H/h = 200/160 = 1,25$ .

Тоді при  $tg\theta = 1$  і заздалегідь прийнятій ширині після витягання  $b_{1обтисн} \approx 204$  мм отримаємо

$$\beta_y = \frac{1/\eta}{\sqrt{1 + b_{1обтисн} \cdot \frac{[(1/\eta) - 1]}{a}}} = \frac{1,25}{\sqrt{1 + 204 \cdot \frac{(1,25 - 1)}{100}}} = 1,02.$$

Ширина заготовки після деформації:

$$b_{1обтисн} = \beta_y \cdot B = 1,02 \cdot 200 = 204 \text{ мм.}$$

Оскільки відмінність між прийнятою для розрахунку  $b$  і отриманої в результаті розрахунку ширини відсутня, то вважаємо розрахунок закінченим. При істотній відмінності прийнятого і розрахункового значень  $b$  потрібний ітераційний процес.

Довжина заготовки після необхідного обтиснення з урахуванням розширення:

$$\lambda = \frac{1/\eta}{\beta_y} = \frac{1,25}{1,02} = 1,23;$$

$$L_1 = L \cdot \lambda = 400 \cdot 1,23 = 492 \text{ мм.}$$

Число ударів по довжині заготовки

$$n = L/a = 400/100 = 4.$$

*Друге обтиснення:* після першого обтиснення і кантовки маємо:

$$H = b = 204 \text{ мм,} \quad B = h = 160 \text{ мм.}$$

За умовами завдання відносно обтиснення  $\varepsilon = 0,2$ , тоді

$$h = H \cdot (1 - \varepsilon) = 200 \cdot 0,8 = 163 \text{ мм,}$$

$$\frac{1}{\eta} = \frac{H}{h} = \frac{200}{163} = 1,25.$$

Коефіцієнт розширення при  $tg\theta = 1$  і  $b_{2обтисн} \approx 167$  мм дорівнює:

$$\beta_y = \frac{1/\eta}{\sqrt{1 + b_{2обтисн} \cdot \frac{[(1/\eta) - 1]}{a}}} = \frac{1,25}{\sqrt{1 + 167 \cdot \frac{(1,25 - 1)}{100}}} = 1,05.$$

Ширина заготовки після осадки

$$b_{2обтисн} = \beta_y \cdot B = 1,05 \cdot 160 = 168 \text{ мм,}$$

що мало відрізняється від прийнятої заздалегідь.

Довжина заготовки після обтиснення:

$$\lambda = \frac{1/\eta}{\beta_y} = \frac{1,25}{1,05} = 1,19;$$

$$L_2 = L_1 \cdot \lambda = 492 \cdot 1,19 = 585 \text{ мм.}$$

Число ударів по довжині заготовки

$$n = L_2/a = 585/100 = 5,85 \approx 6.$$

Таким чином, після другого обтиснення (першого переходу) отримали заготовку, розміри поперечного перерізу якої  $b=163$  мм і  $h=168$  мм. Аналогічним чином роблять подальше витягання з метою отримання заданих розмірів поковки.

Визначимо силу осадки для першого обтиснення, коли ширина заготовки максимальна, температура деформації  $t = 1150^\circ\text{C}$ , а швидкість осадки  $v = 6$  м/с. Для цих умов опір металу деформації  $\sigma_T = 92,5$  МПа. Середнє нормальне напруження при  $a < b$ ,  $m = a = 100$  мм і  $n = b = 204$  мм дорівнює:

$$p_{cp} = \sigma_\Phi \cdot \left( 1 + \frac{1 - \frac{m}{3 \cdot n}}{4} \cdot \frac{m}{h_1} \right) = 92,5 \cdot \left( 1 + \frac{1 - \frac{100}{3 \cdot 204}}{4} \cdot \frac{100}{160} \right) = 104,6 \text{ МПа.}$$

Сила осадки дорівнює:

$$P = p_{cp} \cdot a \cdot \frac{b_1 + B_1}{2} \cdot 10^{-6} = 2,11 \text{ МН.}$$

#### 4.5 Визначення сили кривошипного пресу (Завдання № 7)

Визначити силу кривошипного пресу для штампування круглої деталі із сталі марки Ст.40Х в штампі відкритого типу. Форма деталі відповідає рис. 4.3, причому діаметр заготовки  $D = 48$  мм,  $h_0 = 40$  мм,  $h_3 = 2,5$  мм, діаметр поковки по фланцях –  $d = 80$  мм,  $S = 10$  мм, швидкість осадки  $v=0,8$  м/с, середній діаметр поковки в штампі -  $d_1=60$  мм (облой відсутній). Температура деформації  $t = 1050^\circ\text{C}$ .

Для розрахунку напруження течії металу і середнього нормального контактного напруження (СНКН) необхідно визначити об'єм  $V_d$  і середню товщину  $h_{cp}$  деталі за формулами:

$$V_d = \frac{\pi}{4} \cdot [(d^2 - d_1^2) \cdot h_3 + d_1^2 \cdot h_0];$$

$$h_{cp} = 4 \cdot \frac{V_d}{\pi} \cdot d^2.$$

З урахуванням розмірів поковки маємо:

$$V_d = \frac{\pi}{4} \cdot [(80^2 - 60^2) \cdot 2,5 + 60^2 \cdot 40] = 118595 \text{ мм}^3;$$

$$h_{cp} = 4 \cdot \frac{118595}{\pi} \cdot 80^2 = 23,6 \text{ мм.}$$

Визначимо висоту заготовки при її діаметрі  $D = 48 \text{ мм}$  з формули

$$H = \frac{4 \cdot V_D}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 118595}{\pi \cdot 48^2} = 65,6 \text{ мм.}$$

Відносне обтиснення і швидкість деформації дорівнюють:

$$\varepsilon = (H - h_{cp})/H = (65,6 - 23,6)/65,6 = 0,64,$$

$$u = \vartheta \cdot 1000/h_{cp} = 0,8 \cdot 1000/23,6 = 33,91 \text{ с}^{-1}.$$

При  $\varepsilon = 0,64$  і  $u = 33,91 \text{ с}^{-1}$  напруження течії з [2] дорівнює  $\sigma_T = 122,8 \text{ МПа}$ . Площі поковки  $F_{\Pi}$  і задирки  $F_3$  дорівнюють:

$$F_{\Pi} = \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 60^2 = 2827 \text{ мм}^2;$$

$$F_3 = \frac{\pi}{4} \cdot [(d_1 + 2S)^2 - d_1^2] = \frac{\pi}{4} \cdot [(60 + 2 \cdot 10)^2 - 60^2] = 2200 \text{ мм}^2.$$

Загальна площа контакту поковки з штампом дорівнює

$$F = F_{\Pi} + F_3 = 2827 + 2200 = 5027 \text{ мм}^2.$$

Середнє нормальне контактне напруження (СНКН) при штампуванні деталі визначимо по формулі ( $f_2=0,4$  и  $n=1,0$ ):

$$n_{\sigma} = \left( n + \frac{f_2 \cdot S}{h_3} \right) \cdot \frac{F_3}{F} + \left[ \frac{2f_2 \cdot S}{h_3} + \ln \left( 1,25 \cdot \frac{d_1}{h_0} \right) - 0,375 \right] \cdot \frac{F_{\Pi}}{F};$$

$$n_{\sigma} = \left( 1 + \frac{0,4 \cdot 1}{2,5} \right) \cdot \frac{2200}{5027} + \left[ \frac{2 \cdot 0,4 \cdot 1}{2,5} + \ln \left( 1,25 \cdot \frac{60}{40} \right) - 0,375 \right] \cdot \frac{2827}{5027} = 3,08;$$

$$p_{cp} = n_{\sigma} \cdot \sigma_T = 3,08 \cdot 122,8 = 378,2 \text{ МПа.}$$

Сила штамповки дорівнює:

$$P = p_{cp} \cdot F = 378,2 \cdot 5027 \cdot 10^{-6} = 1,9 \text{ МН.}$$

Визначимо СНКН і силу деформації з використанням наступної формули:

$$p_{cp} = \sigma_T \cdot \left\{ \left[ (1 + 0,9n_1) + (f_{\Pi} \cdot n_{\Phi} \cdot d_1/h_0) + 2f_{\Pi} \cdot \frac{S}{h_3} \right] \cdot \frac{F_{\Pi}}{F} + f_{\Pi} \cdot \frac{S}{h_3} \cdot \frac{F_3}{F} \right\}$$

$$n_1 = 0,5; F_{\Pi\Phi} = 1,57 \cdot d_1 \cdot h_0 + F_{\Pi} + F_3; n_{\Phi} = F_{\Pi\Phi}/F,$$

$F_{\Pi\Phi}$  - повна площа поверхні поковки.

Заздалегідь встановлюємо ( $n_1 = 0,5$ ,  $f_{\Pi} = 0,4$ ):

$$F_{\Pi\Phi} = 1,57 \cdot 60 \cdot 40 + 2827 + 2200 = 8795 \text{ мм}^2;$$

$$n_{\Phi} = F_{\Pi\Phi}/F = 8795/5027 = 1,75;$$

$$p_{cp} = 122,8 \cdot \left\{ \left[ (1 + 0,9 \cdot 0,5) + (0,4 \cdot 1,75 \cdot 60/40) + 2 \cdot 0,4 \cdot \frac{1}{2,5} \right] \cdot \frac{2827}{5027} + 0,4 \cdot \frac{1}{2,5} \cdot \frac{2200}{5027} \right\} = 479,7 \text{ МПа.}$$

Значення коефіцієнта напруженого стану  $n_\sigma$ , отримані по вищенаведеній формулі  $p_{cp}$  помітно ближче до дослідних даних, чим по формулі:

$$n_\sigma = \left( n + \frac{f_2 \cdot S}{h_3} \right) \cdot \frac{F_2}{F} + \left( \frac{2f_2 \cdot S}{h_3} + \ln \left( 1,25 \cdot \frac{d}{h} \right) - 0,375 \right) \cdot \frac{F_1}{F},$$

де  $f_2$  ( $f_\Pi$ ) - показник тертя (з умови Е. Зібеля) на поверхнях мостика і металу;  $F_2$  і  $F_1$  - відповідно горизонтальна проекція площі контакту задирки з мостиком і площа проекції тіла поковки;  $F$  - повна горизонтальна проекція поковки з урахуванням задирки;  $n$  - коефіцієнт, що відбиває граничні умови на задирці.

#### 4.6 Визначення максимальної сили витягання гільзи (Завдання № 8)

Визначити максимальну силу витягання гільзи при радіусі заготовки  $R_H=67$  мм і її товщині  $S=1$  мм із сталі 08кп. Радіус пуансона  $R_U \approx 30,7$  мм, радіус закруглення матриці  $r_M=8$  мм. Сила притиску  $Q=18,5$  кН. Коефіцієнт тертя при використанні в якості мастила мінерального масла з наповнювачами  $f = 0,113$ . Середнє напруження течії після деформації при  $\varepsilon=46\%$  і  $\sigma_{T0} = 230$  МПа дорівнює [2]:

$$\sigma_{T1} = \sigma_{T0} + 34,6 \cdot \varepsilon^{0,6};$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0} + 0,67 (\sigma_{T1} - \sigma_{T0});$$

$$\sigma_{T1} = 230 + 34,6 \cdot 46^{0,6} = 574 \text{ МПа};$$

$$\sigma_T = 230 + 0,67 \cdot (574 - 230) = 460,6 \text{ МПа.}$$

Максимальне напруження витягання дорівнює:

$$\sigma_p = 1,1 \cdot \sigma_T \cdot \left[ \ln \left( \frac{R_H}{R_U} \right) + \frac{f \cdot Q \cdot 1000}{\pi \cdot R_H \cdot \sigma_T \cdot S} + \frac{S}{2 \cdot r_M} \right] \cdot e^{\frac{f \cdot \pi}{2}},$$

$$\sigma_p = 1,1 \cdot 460,6 \cdot \left[ \ln \left( \frac{67}{30,7} \right) + \frac{0,113 \cdot 18,5 \cdot 1000}{\pi \cdot 67 \cdot 460,6 \cdot 1} + \frac{1}{2 \cdot 8} \right] \cdot e^{\frac{0,113 \cdot \pi}{2}} = 523 \text{ МПа}$$

Сила витягання визначається по формулі:

$$P_M = 2 \cdot \sigma_p \cdot \pi \cdot R_U \cdot S \cdot 10^{-3},$$

$$P_M = 2 \cdot 523 \cdot \pi \cdot 30,7 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 110 \text{ кН.}$$



#### 4.7 Варіанти виконання індивідуальних завдань

**Таблиця 4.1** – Варіанти виконання індивідуальних завдань розрахунку сили осадки (Завдання № 4)

Варіанти	Марка сталі	D, мм	H, мм	$\Delta h$ , мм	t, °C	$v_z$ , мм/с	N <sub>1</sub> , %
1	У12	200	205	50	950	81	0,85
2	1Х13	205	210	55	955	82	0,84
3	4Х13	210	215	60	960	88	0,81
4	9Х18	215	220	65	965	97	0,80
5	Х28	220	225	70	970	98	0,92
6	Р18	265	270	115	1015	99	0,91
7	СХ8	270	275	120	1020	87	0,95
8	1Х17Н2	275	280	125	1025	83	0,85
9	1Х18Н9Т	280	285	130	1030	84	0,84
10	ЭИ736	245	255	95	995	85	0,83
11	ЭИ481	255	260	105	1005	86	0,82
12	ЭИ435	260	265	110	1010	100	0,81
13	ЭИ437Б	225	230	75	975	101	0,80
14	ЭИ992	230	235	80	980	102	0,94
15	ЭИ602	235	240	85	985	103	0,95
16	ЭИ736Ш	240	245	90	990	104	0,96
17	ОХ23Ю5	285	290	135	1035	89	0,97
18	ОХ19Н9Ф2С	290	295	140	1040	90	0,86
19	ЭИ736	310	315	160	1060	91	0,92
20	ЭИ481	315	320	165	1065	92	0,91
21	ЭИ435	320	325	170	1070	93	0,90
22	ЭИ437Б	295	300	145	1045	94	0,89
23	ЭИ992	300	305	150	1050	95	0,88
24	ЭИ602	305	310	155	1055	96	0,87
25	ЭИ736Ш	325	330	175	1075	105	0,86

**Примітка:** інші значення, не наведені у таблиці, беруться такі ж самі, як у прикладі.

**Таблиця 4.2** – Варіанти виконання індивідуальних завдань розрахунку маси частин молоту, що падають (Завдання № 5)

Варіанти	Марка сталі	D, мм	H, мм	h, мм	T, °C	v, м/с	$\sigma_T$ , МПа ( $\beta=1$ )
1	У12	160	160	145	1100	5.5	80.3
2	1Х13	165	165	150	1110	5.6	82.6
3	Ст 45	170	170	155	1120	5.7	72.2
4	9Х18	175	175	160	1130	5.8	73.9
5	Х28	180	180	165	1140	5.9	74.4
6	P18	130	130	115	1015	6.1	75.5
7	СХ8	135	135	120	1020	6.2	91.1
8	1Х17Н2	140	140	125	1025	6.3	92.7
9	1Х18Н9Т	145	145	130	1030	6.4	93.5
10	ЭИ736	150	150	135	1145	6.5	94.8
11	ЭИ481	155	155	140	1005	5.7	70.3
12	ЭИ435	105	105	90	1010	5.8	71.4
13	ЭИ437Б	110	110	95	1130	5.9	87.9
14	ЭИ992	115	115	100	1135	6.1	88.1
15	ЭИ602	120	120	105	1125	6.3	85.6
16	ЭИ736Ш	125	125	110	1120	6.4	86.7
17	ОХ23Ю5	185	185	170	1035	6.5	83.5
18	ОХ19Н9Ф2С	190	190	175	1040	5.7	84.9
19	ЭИ736	195	195	180	1060	6.1	89.1
20	ЭИ481	200	200	185	1065	6.2	90.3
21	ЭИ435	205	205	190	1070	6.3	76.5
22	ЭИ437Б	210	210	195	1045	6.4	77.2
23	ЭИ992	215	215	200	1050	6.5	78.7
24	ЭИ602	220	220	205	1055	5.7	79.9
25	ЭИ736Ш	225	225	210	1075	6.1	95.8

**Примітка:** інші значення, не наведені у таблиці, беруться такі ж самі, як у прикладі.

**Таблиця 4.3** – Варіанти виконання індивідуальних завдань розрахунку ковальського витягання (Завдання № 6)

Варіанти	Марка сталі	H, мм	B, мм	L, мм	h <sub>k</sub> , мм	b <sub>k</sub> , мм	a, мм	ε	σ <sub>T</sub> , МПа (β=1)	b <sub>1обтисн</sub> , мм	b <sub>2обтисн</sub> , мм
1	У12	205	205	420	143	143	105	0.41	80.1	221	146
2	1Х13	210	210	440	145	145	110	0.41	82.3	228	150
3	4Х13	215	215	460	147	147	115	0.43	72.7	236	152
4	9Х18	220	220	480	150	150	120	0.40	73.4	240	160
5	Х28	225	225	500	155	155	125	0.38	74.9	245	167
6	Р18	230	230	520	160	160	130	0.37	75.5	250	172
7	СХ8	235	235	540	165	165	135	0.38	91.8	257	175
8	1Х17Н2	240	240	560	170	170	140	0.37	92.2	263	181
9	1Х18Н9Т	245	245	580	175	175	145	0.38	93.6	270	184
10	ЭИ736	250	250	600	180	180	150	0.36	94.8	274	191
11	ЭИ481	255	255	620	185	185	155	0.4	70.5	285	190
12	ЭИ435	260	260	640	190	190	160	0.36	71.1	287	199
13	ЭИ437Б	265	265	660	190	190	165	0.38	87.3	295	200
14	ЭИ992	270	270	680	190	190	170	0.41	88.2	305	200
15	ЭИ602	275	275	700	195	195	175	0.4	85.7	310	206
16	ЭИ736Ш	280	280	720	200	200	180	0.37	86.8	313	214
17	ОХ23Ю5	285	285	740	210	210	185	0.37	83.4	319	219
18	ОХ19Н9Ф2С	290	290	760	215	215	190	0.36	84.3	324	225
19	ЭИ736	295	295	780	220	220	195	0.35	89.6	329	230
20	ЭИ481	300	300	800	215	215	200	0.43	90.1	347	221
21	ЭИ435	305	305	820	215	215	205	0.44	76.9	355	224
22	ЭИ437Б	310	310	840	210	210	210	0.45	77.5	363	226
23	ЭИ992	315	315	860	220	220	215	0.43	78.4	366	233
24	ЭИ602	320	320	880	240	240	220	0.35	79.2	359	252
25	ЭИ736Ш	325	325	900	225	225	225	0.44	95.1	380	240

**Примітка:** інші значення, не наведені у таблиці, беруться такі ж самі, як у прикладі.

**Таблиця 4.4** – Варіанти виконання індивідуальних завдань визначення сили кривошипного пресу (Завдання № 7)

Варі- анти	Марка сталі	$h_0$ , мм	$h_3$ , мм	$d$ , мм	$S$ , мм	$D$ , мм	$v$ , м/с	$d_1$ , мм	$t$ , °C	$\sigma_T$ , МПа ( $\beta=1$ )
1	У12	58	3.625	116	14.5	137.75	0.81	87	1000	80.1
2	1Х13	76	4.750	152	19.0	180.50	0.82	114	1010	82.3
3	4Х13	94	5.875	188	23.5	223.25	0.83	141	1020	72.7
4	9Х18	112	7.000	224	28.0	266.00	0.84	168	1030	73.4
5	Х28	130	8.125	260	32.5	308.75	0.85	195	1100	74.9
6	Р18	148	9.250	296	37.0	351.50	0.86	222	1110	75.5
7	СХ8	166	10.375	332	41.5	394.25	0.87	249	1120	91.8
8	1Х17Н2	184	11.500	368	46.0	437.00	0.88	276	1130	92.2
9	1Х18Н9Т	202	12.625	404	50.5	479.75	0.89	303	1060	93.6
10	ЭИ736	220	13.750	440	55.0	522.50	0.90	330	1070	94.8
11	ЭИ481	238	14.875	476	59.5	565.25	0.70	357	1080	70.5
12	ЭИ435	256	16.000	512	64.0	608.00	0.71	384	1090	71.1
13	ЭИ437Б	274	17.125	548	68.5	650.75	0.72	411	1030	87.3
14	ЭИ992	292	18.250	584	73.0	693.50	0.73	438	1100	88.2
15	ЭИ602	310	19.375	620	77.5	736.25	0.74	465	1110	85.7
16	ЭИ736Ш	328	20.500	656	82.0	779.00	0.75	492	1060	86.8
17	ОХ23Ю5	346	21.625	692	86.5	821.75	0.76	519	1070	83.4
18	ОХ19Н9Ф2С	364	22.750	728	91.0	864.50	0.77	546	1080	84.3
19	ЭИ736	382	23.875	764	95.5	907.25	0.78	573	1000	89.6
20	ЭИ481	400	25.000	800	100.0	950.00	0.79	600	1010	90.1
21	ЭИ435	202	12.625	836	104.5	650.75	0.89	627	1030	76.9
22	ЭИ437Б	220	13.750	872	109.0	693.5	0.90	654	1100	77.5
23	ЭИ992	238	14.875	908	113.5	736.25	0.70	681	1090	78.4
24	ЭИ602	310	17.125	944	118.0	180.5	0.85	708	1030	79.2
25	ЭИ736Ш	328	18.25	980	122.5	223.25	0.86	735	1100	95.1

**Примітка:** інші значення, не наведені у таблиці, беруться такі ж самі, як у прикладі.

**Таблиця 4.5** – Варіанти виконання індивідуальних завдань визначення максимальної сили витягання гільзи (Завдання № 8)

Варіанти	Марка сталі	R <sub>H</sub> , мм	S, мм	R <sub>U</sub> , мм	r <sub>м</sub> , мм	Q, кН	f	ε, %	σ <sub>Т0</sub> , МПа
1	У12	67.5	0.9	31.3	8.8	19.4	0.123	46.2	80.1
2	1Х13	67.6	0.8	31.4	8.9	19.5	0.124	46.4	82.3
3	4Х13	67.7	0.7	31.5	7.1	17.5	0.125	45.6	72.7
4	9Х18	67.8	0.6	31.6	7.2	17.6	0.117	45.8	73.4
5	Х28	67.1	1.5	31.7	8.5	19.0	0.132	47.4	74.9
6	Р18	67.2	1.6	30.8	8.6	19.1	0.133	47.8	75.5
7	СХ8	67.3	1.7	30.9	8.7	19.2	0.134	45.0	91.8
8	1Х17Н2	67.4	1.8	31.0	8.1	19.3	0.135	45.2	92.2
9	1Х18Н9Т	67.9	1.9	31.1	8.2	18.6	0.122	47.0	93.6
10	ЭИ736	66.9	0.9	31.2	8.3	18.7	0.114	47.2	94.8
11	ЭИ481	66.8	0.8	31.8	8.4	18.8	0.115	45.2	70.5
12	ЭИ435	66.7	0.7	31.9	7.3	18.9	0.116	45.4	71.1
13	ЭИ437Б	66.6	0.6	30.0	7.4	17.7	0.126	46.6	87.3
14	ЭИ992	66.5	0.5	30.1	7.5	17.8	0.127	46.8	88.2
15	ЭИ602	66.4	1.5	30.2	7.6	17.9	0.128	47.8	85.7
16	ЭИ736Ш	66.3	1.6	30.3	7.7	18.0	0.129	45.0	86.8
17	ОХ23Ю5	66.2	1.7	30.4	7.8	18.1	0.130	47.2	83.4
18	ОХ19Н9Ф2С	66.1	1.8	30.5	7.9	18.2	0.131	46.8	84.3
19	ЭИ736	67.8	1.9	30.6	8.4	18.3	0.118	47.0	89.6
20	ЭИ481	67.9	1.1	30.8	7.3	18.4	0.119	47.4	90.1
21	ЭИ435	66.9	1.2	30.9	7.4	18.8	0.120	47.6	76.9
22	ЭИ437Б	66.8	1.3	31.7	8.9	18.9	0.121	47.8	77.5
23	ЭИ992	66.5	1.4	31.8	7.1	19.0	0.136	45.0	78.4
24	ЭИ602	66.4	0.6	31.9	7.9	17.7	0.137	45.2	79.2
25	ЭИ736Ш	66.3	0.5	30.0	8.4	17.8	0.138	45.4	95.1

**Примітка:** інші значення, не наведені у таблиці, беруться такі ж самі, як у прикладі.

## 5 ВИТЯГАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ДЕТАЛЕЙ

### (Завдання № 9)

#### 5.1 Основи виконання технологічних розрахунків

Заготовки при витяганні розраховують за принципом рівності площ поверхонь (або об'ємів) заготовки і готової деталі з припуском на обрізання [7].

Є три методи розрахунку: аналітичний, графічний і графоаналітичний. Всі вони допустимі для будь-якого виду штампового виробництва. Але, перший найбільш універсальний і доступний для технолога і конструктора, його переваги - можливість використання сучасної обчислювальної техніки, висока точність. Обчислення діаметра заготовки можна звести до розрахунку за формулами для найбільше поширених форм витягнутих деталей, які наведені в [7, 8].

Для витяжок, не потребуючих більшої точності, розрахунок ведеться за зовнішніми розмірами деталі. Якщо витягання ведеться без різання деталей із матеріалу товщиною більше 1 мм, розрахунки виконують по середній лінії. Рекомендуємі припуски на обрізання після витягання вибирають в залежності від висоти виробу і діаметра фланця.

Метод розрахунку та побудови форми заготовки при витяганні прямокутних коробчастих деталей в значній мірі залежить від відносної висоти коробки  $H/B$  і відносного радіуса кутового закруглення.

В залежності від співвідношення указаних параметрів спостерігається різне витиснення металу в бічні стінки, тому встановлені окремі області, яким відповідають різні способи побудови форми заготовки.

Розміри заготовок при витяганні в стрічці з надрізами розраховують таким самим чином, як і при витяганні із штучних заготовок. Якщо витягання ведеться в цілій стрічці, розраховують діаметр умовної заготовки з рахунком коефіцієнта уточнення (для однорядного витягання  $\alpha = 0,96...0,98$ ; для багаторядної  $\alpha = 0,92...0,95$ ):

$$F_{\text{загот}} = A \cdot \alpha. \quad (5.1)$$

Число переходів при витяганні залежить від пластичності і структурного стану металу. Критерієм для визначення числа переходів служить граничне значення ступеня деформації, тобто припущений коефіцієнт витягання. Числові значення мінімальних коефіцієнтів витягання наведені в [7, 8]. Розміри на переходах циліндричних деталей з фланцем і без нього розраховують по відомим мінімально допустимим коефіцієнтам витягання [7, 8].

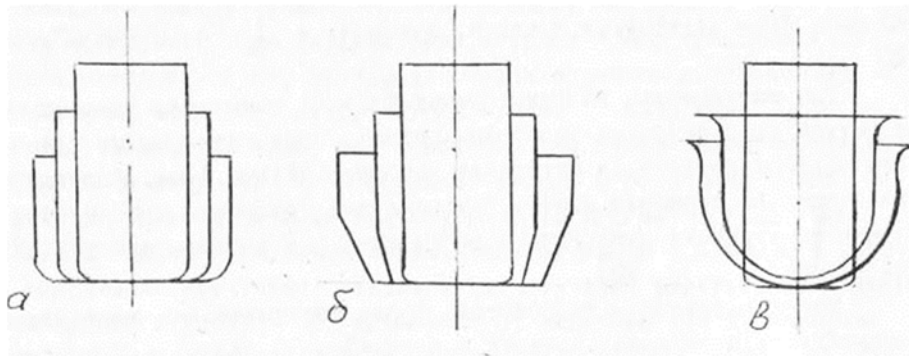
При витяганні деталей типу тіл обертання, проміжні переходи в плані завжди потрібні, але форма їх утворюючих може бути різною.

Проміжні переходи для циліндричних деталей зводяться до трьох основних форм:

- з плоским дном і закругленням  $r$  (рис. 5.1, а);
- з дном у вигляді перерізаного конуса (рис. 5.1, б);

– із сферичним дном (рис. 5.1, в).

Ці форми можуть бути з фланцем і без нього в залежності від обраного технологічного процесу і заданого креслення. Якщо фланець незначно більше діаметра витягання, то один або декілька переходів виконуються без нього, а потім в наступних операціях утворюється фланець.



**Рисунок 5.1** - Проміжні переходи для циліндричних деталей

Коли деталь задана з великим фланцем, то всі проміжні переходи виконуються також з фланцем.

Перша форма допустима при будь-яких розмірах циліндра, друга - практично мало допустима для циліндрів діаметром менше 20 мм, але при великих діаметрах вона доцільніше першої.

Третя форма зручна для дрібних деталей і особливо при послідовному витяганні в стрічці (штабі).

Радіуси закруглення кромки матриць і пуансонів, призначених для витягання порожнистих деталей, приймають за таблицями, наведеними в [7], або розраховують за формулою:

$$r_m \approx K \sqrt{(D - d) \cdot S}, \quad (5.2)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який залежить від товщини металу;

$S$ , мм	до 0,6	0,6 - 1	1 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 10
$K$	1,0	0,9	0,85	0,8	0,7	0,6

$D$  – діаметр плоскої заготовки або попереднього витягання, мм;

$d$  - діаметр деталі після даного переходу витягання, мм;

$S$  – товщина штампуемого металу, мм.

Радіуси закруглення пуансона  $r_{II}$  для перших переходів рекомендується приймати рівними радіусам матриці  $r_m$ . Проте, при відповідних значеннях коефіцієнтів витягання допускається зменшення радіусів пуансонів до  $r_{II} = 0,5 \dots 1 \cdot S$ .

У процесі калібрування і чекання можна отримати деталі радіусів  $r_{II} < 0,5 \cdot S$ .

На кожному переході радіуси закруглення  $r_M$  і  $r_{II}$  повинні бути різними. На 1 переході вони досягають максимальних значень, а на наступних - зменшуються на 25 %, тобто приймаються  $0,75 \cdot r_{Mi}$  і  $0,75 \cdot r_{III}$ . Спочатку доцільно назначити радіуси матриць і пуансонів для останнього переходу. Витягання проводиться з притиском заготовки і без нього. Необхідність застосування притиску належить встановити за формулою:

$$\frac{D}{S} \cdot 100 \leq 4,5 \cdot (1 - m_1), \quad (5.3)$$

Для кожного переходу однобічний зазор між матрицею і пуансоном приймається в залежності від товщини металу: для I –  $Z_1 = (1,3 - 1,5) \cdot S$ ; для II –  $Z_2 = (1,2 - 1,3) \cdot S$ ; для III і наступних  $Z_3 = Z_4 = (1,1 - 1,2) \cdot S$ .

Розмір зазору між матрицею і пуансоном при витяганні порожнистих деталей з утоншенням матеріалу:  $Z_B = 0,65 - 0,85$ .

Для кольорових металів коефіцієнт  $K$  можна приймати по нижній межі, а для сталей - по верхній.

Зусилля витягання порожнистої циліндричної деталі можна визначити за формулами:

$$P_1 = \pi \cdot d_1 \cdot S \cdot \sigma_B \cdot C_1; \quad (5.4)$$

$$P_2 = \pi \cdot d_2 \cdot S \cdot \sigma_B \cdot C_2; \quad (5.5)$$

$$P_n = \pi \cdot d_n \cdot S \cdot \sigma_B \cdot C_n. \quad (5.6)$$

де  $d_1, d_2, d_n$  - діаметр деталі відповідно після першої, другої і останньої витягання;  $C_1, C_2, C_n$  - поправочний коефіцієнт відповідно для першої, другої і наступної операцій витягання.

Наведем значення оптимальних коефіцієнтів витягання у відповідності з поправочними коефіцієнтами:

m	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65	0,675	0,7	0,725	0,75	0,8
$C_1$	1,0	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,6	0,55	0,5	0,4
$C_2-C_n$	-	-	-	-	-	-	1,0	0,95	0,9	0,8

Зусилля витягання деталей будь-якої складної форми без наявності перетяжних ребр (порогів) визначається за формулою:

$$P = (P_B + P_r) \cdot K, \quad (5.7)$$

де  $P_B$  - зусилля, яке необхідне для витягання кутів закруглень (це зусилля розраховують за формулою для витягання циліндричних деталей);  $P_r$  - зусилля, яке необхідне для вигину прямих ділянок; коефіцієнт  $K = 1,1 \dots 1,2$ .

Зусилля притиску при витяганні деталей будь-якої форми (в загальному вигляді).

$$Q = F \cdot q, \quad (5.8)$$

де  $F$  - площа заготовки під притиском,  $q$  - питоме зусилля притиску.

Повне зусилля витягання, необхідне для підбору преса дорівнює:



$$P_{\text{пр}} = P + Q. \quad (5.9)$$

Як запобігання розривів заготовки до початку процесу витягання, максимальна швидкість повинна бути на крупних пресах  $V_{\text{max}} = 15...45$  см/с, на невеликих  $V_{\text{max}} = 70$  см/с.

Максимальну швидкість витягання можна визначити за емпіричною формулою:

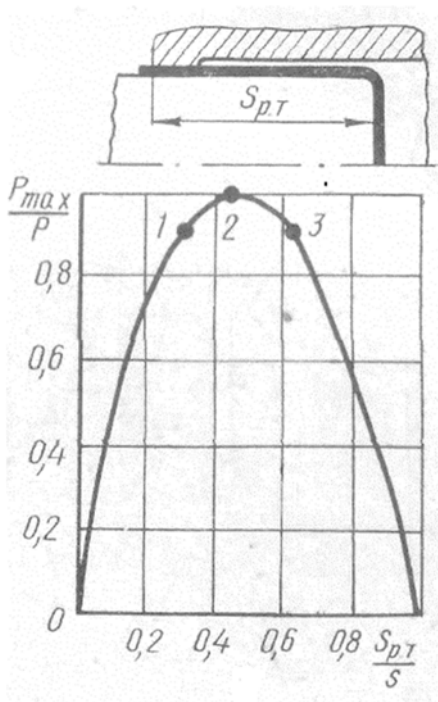
$$V_{\text{max}} = 3,33 \cdot (1 + m_1) \cdot \sqrt{D - d_1}, \quad (5.10)$$

або

$$V_{\text{max}} = 0,105 \cdot v_b \cdot \sqrt{H \cdot (H - h)} \quad (5.11)$$

де  $v_b$  – швидкість обертання валу об/хвил;  $h$  – робоча частина ходу (від початку деформації), мм;  $H$  – повний хід повзуна, мм.

Графік робочих навантажень при витяганні без фланця «напрорал» можна збудувати за трьома характерними точками (рис. 5.2):



1 – з координатами  $0,9 \cdot P_{\text{max}}$  і  $0,3 \cdot S_P$ ;

2 – з координатами  $P_{\text{max}}$  і  $0,42 \cdot S_P$ ;

3 – з координатами  $0,9 \cdot P_{\text{max}}$  і  $0,63 \cdot S_P$ .

**Рисунок 5.2** – Побудова графіку робочих навантажень при витяганні

Повний робочий хід  $S_P$  приймається рівним висоті  $H$  виробу.

Прес вибирається по зусиллю, роботі, потужності, деформації, величині і швидкості ходу, закритій висоті і розмірам штапового простору. Щоб легше було видаляти відштаповані деталі, хід витягаючого повзуна повинен в 2,2 – 2,5 рази перевищувати висоту деталі.

## 5.2 Розрахунок параметрів технології витягання порожнистого циліндра

Розрахувати параметри технології витягання порожнистого циліндра (рис. 5.3, а).

Вихідна заготовка – лист

0 - 1,0 x 1000 x 2000 ДСТУ 19904 - 74

1 – м – ОСВ – 08Ю ДСТУ 9045 - 80

Річна програма - 100 тис. шт.

Згідно випуску (програми) деталей вид виробництва - серійний.

В умовах серійного виробництва рекомендується використовувати операційні штампи, які встановлюються на універсальних пресах. Відповідно до вимог технологічності конструктивної форми, радіус дна витягнутого виробу не повинен перебільшувати  $3S$ . Відхилення на зовнішньому діаметрі складає не менше 0,7 мм, а від площини дна - не менше 0,9 мм. Ці значення можуть бути отримані на останній операції калібрування. Відхилення  $\pm 2$  мм по висоті деталі забезпечується при обрізанні [7]. Радіус дна 1 мм. Припуск на обрізання  $\Delta h = 9$  мм [8], тобто висота виробу після калібрування  $h_6 = 240 + 9 = 249$  мм.

В залежності від зовнішнього діаметру готового виробу  $d$ , діаметр плоскої заготовки дорівнює:

$$D_0 = (d^2 + 4 \cdot d \cdot h_b - 1,72 \cdot r \cdot d - 0,56 \cdot r^2)^{0,5} \\ = (100^2 + 4 \cdot 100 \cdot 249 - 1,72 \cdot 1 \cdot 100 - 0,56 \cdot 1^2)^{0,5} \approx 331 \text{ мм.}$$

При багатоопераційному інтенсивному витяганні помітно збільшується площа поверхні заготовки, що враховується введенням коефіцієнта  $\beta = 1,06$  [7], тому доцільно виробити заготовку діаметром:

$$D_p = D_0 / \beta = 331 / 1,06 \approx 312 \text{ мм.}$$

Оптимальні коефіцієнти витягання із заготовки, відносна товщина якої  $(S/D) \cdot 100 = (1/312) \cdot 100 = 0,32 \%$ , складають:  $m_1 = 0,56$ ;  $m_2 = 0,76$ ;  $m_3 = 0,78$ ;  $m_4 = 0,96$ . Витягання відбувається з притиском [8]. Визначаємо кількість переходів:

$$n_{\text{переходи}} = 1 + \frac{\ln d - \ln(m_1 \cdot D_p)}{\ln m_2} = 1 + \frac{\ln 100 - \ln(0,56 \cdot 312)}{\ln 0,76} = 3,03.$$

Приймаємо 4 переходи.

Діаметри переходів:

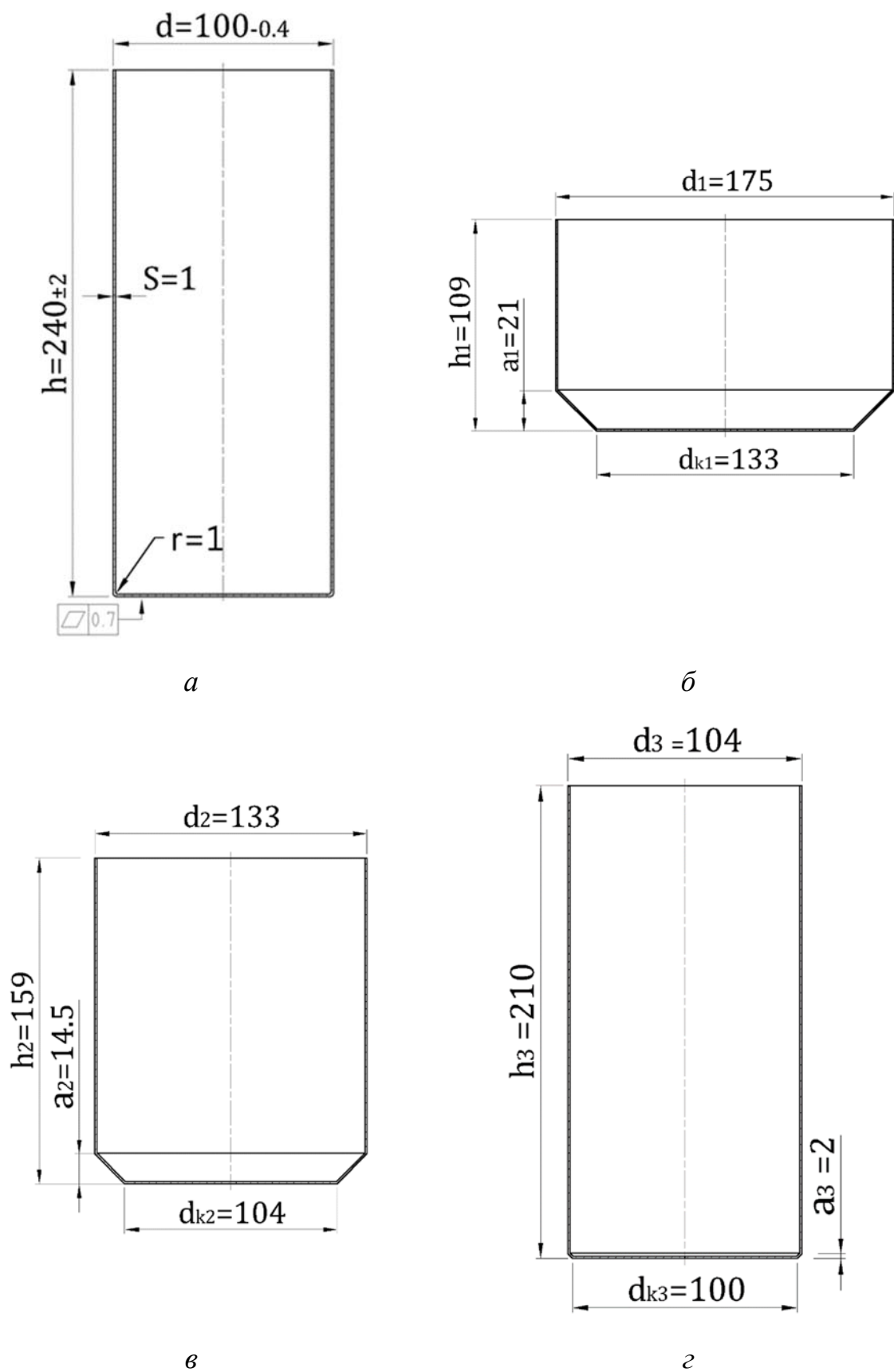
$$d_1 = m_1 \cdot D_p = 0,56 \cdot 312 = 175 \text{ мм;}$$

$$d_2 = m_2 \cdot d_1 = 0,76 \cdot 175 = 133 \text{ мм;}$$

$$d_3 = m_3 \cdot d_2 = 0,78 \cdot 133 = 104 \text{ мм;}$$

$$d_4 = m_4 \cdot d_3 = 0,96 \cdot 104 = 100 \text{ мм.}$$

Для полегшення процесу витягання приймаємо форму дна із скривленням під кутом  $45^\circ$  (рис. 5.3, б-г). Висота конічних ділянок за переходами:  $a_1 = 21$  мм;  $a_2 = 14,5$  мм;  $a_3 = 2$  мм. Діаметри дна переходів  $d_k$  при витяганні деталей з переріzanим конусом:  $d_{k1} = d_2$ ;  $d_{k2} = d_3$  і т.д. Для даного випадку  $d_{k1} = 133$  мм.



**Рисунок 5.3** – Креслення деталі (а) і схеми переходів витягання (б-г)

Тому:

$$a_1 = \frac{d_1 - d_{k1}}{2} = \frac{175 - 133}{2} = 21 \text{ мм};$$

$$a_2 = \frac{d_2 - d_{k2}}{2} = \frac{133 - 104}{2} = 14,5 \text{ мм};$$

$$a_3 = \frac{d_3 - d_{k3}}{2} = \frac{104 - 100}{2} = 2 \text{ мм}.$$

Висота деталей, які витягаються після кожної операції дорівнює:

$$\begin{aligned} h_1 &= 0,25 \cdot \left( \frac{D_p}{m_1} - d_1 \right) + 0,57 \cdot \left( \frac{a_1}{d_1} \right) \cdot (d_1 + 0,86 \cdot a_1) \\ &= 0,25 \cdot \left( \frac{312}{0,56} - 175 \right) + 0,57 \cdot \left( \frac{21}{175} \right) \cdot (175 + 0,86 \cdot 21) = 109 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_2 &= 0,25 \cdot \left( \frac{D_p}{m_1 \cdot m_2} - d_2 \right) + 0,57 \cdot \left( \frac{a_2}{d_2} \right) \cdot (d_2 + 0,86 \cdot a_2) = 0,25 \cdot \left( \frac{312}{0,56 \cdot 0,76} - \right. \\ &\left. 133 \right) + 0,57 \cdot \left( \frac{14,5}{133} \right) \cdot (133 + 0,86 \cdot 14,5) = 159 \text{ мм}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_3 &= 0,25 \cdot \left( \frac{D_p}{m_1 \cdot m_2 \cdot m_3} - d_3 \right) + 0,57 \cdot \left( \frac{a_3}{d_3} \right) \cdot (d_3 + 0,86 \cdot a_3) \\ &= 0,25 \cdot \left( \frac{312}{0,56 \cdot 0,76 \cdot 0,78} - 104 \right) + 0,57 \cdot \left( \frac{2}{104} \right) \cdot (104 + 0,86 \cdot 2) \\ &= 210 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Аналогічно  $h_4 = 249 \text{ мм}$ .

Заготовка діаметром  $d_{заг} = 104 \text{ мм}$  і висотою  $h_3 = 210 \text{ мм}$  надходить на IV операцію калібрування. Висока пластичність матеріалу І-М-ОСВ-08Ю (ДСТУ 9045-80) та оптимальні технологічні параметри дозволяють виконувати усі операції без проміжного відпалу [7].

### 5.3 Розрахунок силових умов витягання порожнистого циліндра

Визначаємо силові умови витягання: зусилля витягання і зусилля притиску на операціях штамповки полого циліндру (рис. 5.3).

На I операції вирубается плоска заготовка діаметром  $D_p = 312 \text{ мм}$  і товщиною  $S = 1 \text{ мм}$ , тобто  $S/D_p < 0,2$ . Тому:

$$\sigma_{ср} = 0,8 \cdot \sigma_{в} = 0,8 \cdot 323 = 258,4 \text{ МПа}.$$

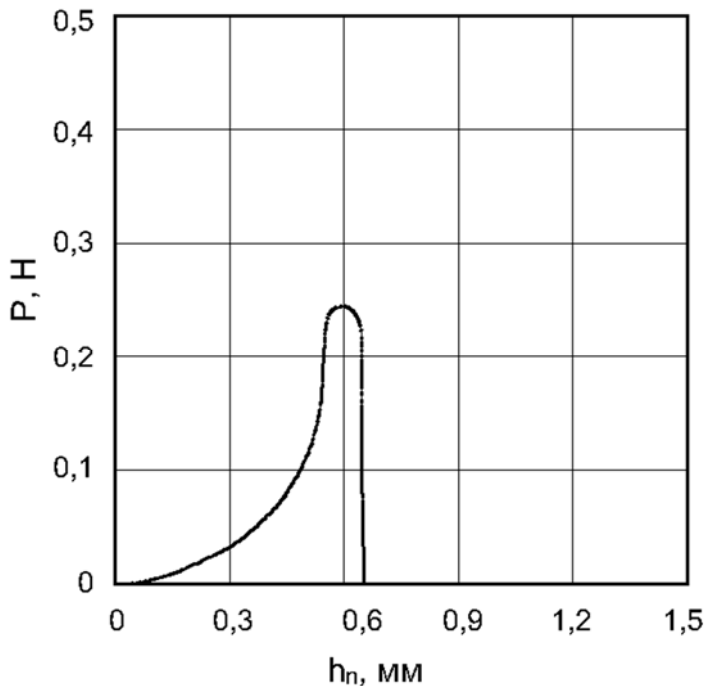
Значення  $\sigma_{в}$  для сталі І-М-ОСВ-08Ю приймаємо за ДСТУ 9045-80. Максимальне зусилля вирубання:

$$P = \pi \cdot D_p \cdot S \cdot \sigma_{ср} \cdot 10^{-6} = 3,14 \cdot 312 \cdot 1 \cdot 258,4 \cdot 10^{-6} = 0,25 \text{ МН}.$$

Абсциса точки з максимальним зусиллям на графіку робочих навантажень при  $n = 70$  (число ходів преса у хвилину) визначається:

$$h_n = S \cdot (0,76 - 0,035 \cdot S - 0,0014 \cdot n) = 1 \cdot (0,76 - 0,035 \cdot 1 - 0,0014 \cdot 70) = 0,62 \text{ мм.}$$

Графік зусилля деформації при вирубанні зображений на рис. 5.4.



**Рисунок 5.4** – Графік робочих навантажень

Для виконання операції по ДСТУ 9408-83 вибираємо однокривошипний відкритий прес простої дії з номінальним зусиллям 0,4 МН моделі К2І24 з розмірами стола  $L \times B = 710 \times 580$  мм; закрита висота 340 мм.

Максимальне зусилля на операціях витягання (див. рис. 5.3, б-г) розраховується за формулою:

$$P_n = \pi \cdot d_n \cdot S \cdot \sigma_b \cdot C_n \cdot 10^{-6}.$$

Після підстановки відповідних кількісних значень отримаємо:

$$P_1 = 3,14 \cdot 175 \cdot 1 \cdot 323 \cdot 1,1 \cdot 10^{-6} = 0,2 \text{ МН,}$$

$$P_2 = 3,14 \cdot 133 \cdot 1 \cdot 323 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,13 \text{ МН,}$$

$$P_3 = 3,14 \cdot 104 \cdot 1 \cdot 323 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 0,1 \text{ МН.}$$

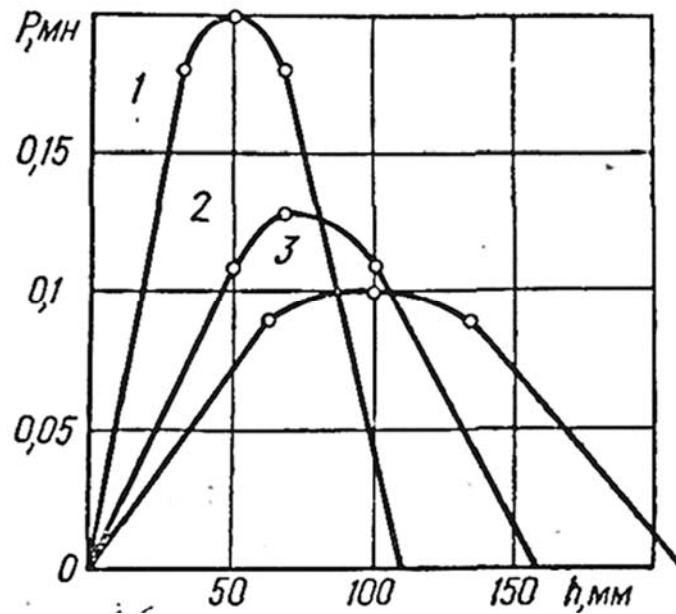
На рис. 5.5 показані графіки робочих навантажень витягання, які побудовані за описаною раніше методикою.

Тиск притиску на І операції витягання визначається:

$$q_1 = 2 \cdot \left( \frac{D_p}{d_1} - 1,2 \right) \cdot \left( \frac{D_p}{S \cdot 100} \right) = 2 \cdot \left( \frac{312}{175} - 1,2 \right) \cdot \left( \frac{312}{1 \cdot 100} \right) \approx 3,6 \text{ МПа.}$$

На наступних операціях можна приймати менший тиск:

$$q_{2,3} = 2 \cdot \left( \frac{175}{133} - 1,2 \right) \cdot \left( \frac{175}{1 \cdot 100} \right) \approx 0,4 \text{ МПа.}$$



**Рисунок 5.5** – Графіки робочих навантажень при витяганні у першому (1), другому (2) і третьому (3) переходах

Радіус закруглення витяжних кромки матриць  $r_m$  вибирається в залежності від відносної товщини заготовки і коефіцієнта витягання. На всіх операціях приймаємо  $r_m = 8$  мм.

Зусилля притиску на  $n$ -ій операції витягання визначається за формулою:

$$Q_n = 0,25 \cdot \pi \cdot [d_{n-1}^2 - (d_n + 2 \cdot r_m)^2] \cdot q_n \cdot 10^{-6}.$$

Після підстановки числових значень отримаємо:

$$Q_1 = 0,25 \cdot 3,14 \cdot [312^2 - (175 + 2 \cdot 8)^2] \cdot 3,6 \cdot 10^{-6} \approx 0,175 \text{ МН};$$

$$Q_2 = 0,25 \cdot 3,14 \cdot [175^2 - (133 + 2 \cdot 8)^2] \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \approx 0,003 \text{ МН};$$

$$Q_3 = 0,25 \cdot 3,14 \cdot [133^2 - (104 + 2 \cdot 8)^2] \cdot 0,4 \cdot 10^{-6} \approx 0,001 \text{ МН}.$$

Прес для витягання вибираємо по технологічним зусиллям і за умови, що хід  $H$  витяжного повзуна повинен у 2,5 рази перебільшувати висоту деталі, тобто  $H > 2,5 \cdot 249 = 623$  мм. Цім вимогам відповідав прес однокривошипний, закритий, подвійної дії з номінальним зусиллям витяжного повзуна 3,15 МН, притискного 2 МН і ходом витяжного повзуна  $H = 630$  мм. Швидкість інструмента до початку процесу витягання визначається за формулою:

$$v \approx 0,105 \cdot v_b \cdot \sqrt{h_b \cdot (H - h_b)} = 0,105 \cdot 12 \cdot \sqrt{249 \cdot (623 - 249)} \approx 384 \text{ мм/с}.$$

Кількість неперервних ходів повзуна за хвилину приймаємо  $n = 12$  (ДСТУ 7639-75). Висота робочої частини ходу  $h$  прийнята рівною максимальній висоті заготовки. Отримане значення швидкості відповідає рекомендованому для операцій витягання [7].

## 5.4 Варіанти індивідуальних завдань розрахунку параметрів технології і силових умов витягання порожнистого циліндра

Варіант	d	h	S	r	$\Delta h$	$\beta$	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$\sigma_b$	n	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$r_m$	$\vartheta_b$
Приклад	100	240	1	1	9	1,06	0,56	0,76	0,78	0,96	323	70	1,1	1	1	8	12
1	101	242	1	1	8	1,06	0,57	0,77	0,79	0,96	324	70	0,93	0,95	0,8	5	13
2	102	244	1	1	8	1,06	0,58	0,78	0,8	0,96	325	70	0,86	0,9	0,95	6	14
3	103	246	1	1	8	1,06	0,56	0,76	0,78	0,96	326	70	0,79	0,8	0,9	7	10
4	104	248	1	1	8	1,06	0,57	0,77	0,79	0,96	327	70	0,72	0,95	0,8	8	11
5	105	250	1	1	8	1,06	0,58	0,78	0,8	0,96	328	70	0,66	0,9	0,8	9	12
6	106	252	1	1	8	1,06	0,56	0,76	0,78	0,96	329	70	0,6	0,8	0,95	10	13
7	107	254	1	1	8	1,06	0,57	0,77	0,79	0,96	330	70	0,55	0,95	0,9	5	14
8	108	256	1	1	8	1,06	0,58	0,78	0,8	0,96	331	70	0,5	0,9	0,8	6	10
9	109	258	1	1	8	1,06	0,56	0,76	0,78	0,96	332	70	0,4	0,8	0,95	7	11
10	110	260	1	1	8	1,06	0,57	0,77	0,79	0,96	333	70	1,1	0,95	0,9	8	12
11	99	238	1	1	9	1,06	0,58	0,78	0,8	0,96	322	70	0,93	0,9	0,8	9	13
12	98	236	1	1	9	1,06	0,56	0,76	0,78	0,96	321	70	0,86	0,8	0,95	10	14
13	97	234	1	1	9	1,06	0,57	0,77	0,79	0,96	320	70	0,79	0,95	0,9	5	10
14	96	232	1	1	9	1,06	0,58	0,78	0,8	0,96	319	70	0,72	0,9	0,95	6	11
15	95	230	1	1	9	1,06	0,56	0,76	0,78	0,96	318	70	0,66	0,8	0,9	7	12
16	94	228	1	1	9	1,06	0,57	0,77	0,79	0,96	317	70	0,6	0,95	0,8	8	13
17	93	226	1	1	9	1,06	0,58	0,78	0,8	0,96	316	70	0,55	0,9	0,95	9	14
18	92	224	1	1	9	1,06	0,56	0,76	0,78	0,96	315	70	0,5	0,8	0,9	10	10
19	91	222	1	1	9	1,06	0,57	0,77	0,79	0,96	314	70	0,4	0,95	0,95	5	11
20	90	220	1	1	9	1,06	0,58	0,78	0,8	0,96	313	70	1,1	0,9	0,9	6	12
21	109	258	1	1	8	1,06	0,56	0,76	0,78	0,96	312	70	0,93	0,8	0,8	7	13
22	110	260	1	1	8	1,06	0,57	0,77	0,79	0,96	311	70	0,86	0,95	0,95	8	14
23	99	238	1	1	9	1,06	0,58	0,78	0,8	0,96	310	70	0,79	0,9	0,9	9	10
24	98	236	1	1	9	1,06	0,56	0,76	0,78	0,96	334	70	0,72	0,8	0,95	10	11
25	97	234	1	1	9	1,06	0,57	0,77	0,79	0,96	335	70	0,66	0,95	0,9	9	12

## 6. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РЕДУЦІРУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ЗАГОТОВКИ

(Завдання № 10)

### 6.1 Теоретичний вступ і умови задачі

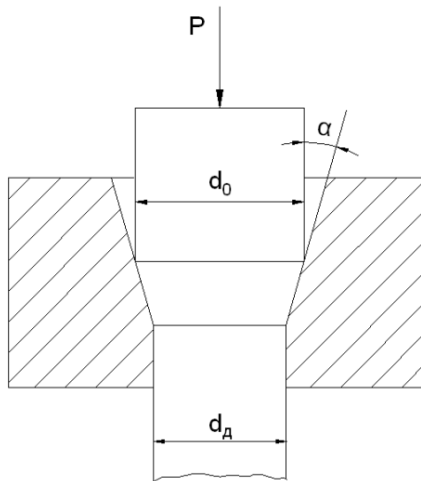
Редуцирування в технології кування, штампування – процес витягання круглої заготовки в гарячому або холодному стані який полягає в зменшенні її поперечного перетину всебічним боковим обтисненням, наприклад, на ротаційно-кувальній машині, або шляхом видавлювання заготовки через матрицю, яка має профіль виробу [9].

Сила редуцирування циліндричної заготовки в жорсткій конічній матриці (рис. 6.1) визначається за формулою:

$$P = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \frac{a \cdot \sigma_s}{a-1} \cdot \left[ \left( \frac{d_0}{d_d} \right)^{2 \cdot (a-1)} - 1 \right], \quad (6.1)$$

$$a = \frac{1 + \mu \cdot \cot \alpha}{1 - \mu \cdot \tan \alpha}, \quad (6.2)$$

де  $\sigma_s$  – межа текучості матеріалу заготовки, МПа;  $\alpha$  – кут матриці, рад.;  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $d_0$ ,  $d_d$  – відповідно діаметр заготовки до і після редуцирування.



**Рисунок 6.1** – Схема редуцирування циліндричної заготовки в жорсткій конічній матриці

Необхідно встановити найбільше значення

$$x = d_0/d_d, \quad (6.3)$$

при якому процес редуцирування може протікати стабільно. Розглянути деформацію при коефіцієнтах тертя  $\mu_1 = 0,05$ ,  $\mu_2 = 0,25$  и  $\mu_3 = 0,5$ . Побудувати графіки залежності  $x$  від кута  $\alpha_{\text{град}}$ . Зробити висновки.



Найбільше значення  $x = d_0/d_d$ , при якому процес редуцирування може протікати стабільно, визначається умовою  $P = P_{oc}$ , де  $P_{oc}$  – сила осадки заготовки. При редуцируванні недеформуєма частина заготовки через яку передається зусилля  $P$ , знаходиться в одноосному напруженому стані. Тому силу осадки можна визначити за формулою:

$$P_{oc} = \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 \cdot \sigma_s. \quad (6.4)$$

З умови

$$\frac{\pi d_0^2}{4} \cdot \frac{a \sigma_s}{a-1} \cdot [x^{2(a-1)} - 1] = \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 \cdot \sigma_s. \quad (6.5)$$

отримаємо

$$\frac{a}{a-1} \cdot [x^{2(a-1)} - 1] = 1. \quad (6.6)$$

Звідки

$$x = \exp \frac{\ln(2 - \frac{1}{a})}{2(a-1)}. \quad (6.7)$$

Для кута  $\alpha$  область визначення лежить у межах  $0 < \alpha < 90^\circ$  і визначається відповідно до варіантом завдання (табл. 6.5).

Застосовується наступний порядок виконання розрахунків:

1. Градуси переводять в радіани за формулою

$$\alpha_{\text{рад}} = \pi \cdot \alpha_{\text{град}} / 180,$$

і заповнюють табл. 6.1.

**Таблиця 6.1** – Перерахунок градусів в радіани кута матриці

$\alpha_{\text{град}}$								
$\alpha_{\text{рад}}$								

2. Розраховують значення  $a$  і  $x$  відповідно по формулам (6.2) і (6.3) для трьох значень коефіцієнта тертя  $\mu_1 = 0,05$ ,  $\mu_2 = 0,25$  и  $\mu_3 = 0,5$  і заповнюють табл. 6.2.

**Таблиця 6.2** – Значення  $a$  і  $x$  при різних значеннях кута матриці і коефіцієнта тертя

$\mu$	$\alpha_{\text{рад}} =$		$\alpha_{\text{рад}} =$		$\alpha_{\text{рад}} =$		$\alpha_{\text{рад}} =$		$\alpha_{\text{рад}} =$		$\alpha_{\text{рад}} =$		$\alpha_{\text{рад}} =$		$\alpha_{\text{рад}} =$	
	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$
0,05																
0,25																
0,5																

3. Будують графік залежності  $x = f(\alpha_{\text{град}})$  при різних значеннях  $\mu$  (три графіка).

## 6.2 Приклад вирішення задачі

**Таблиця 6.3** – Вихідні дані ( $\alpha_{\text{град}}$ ) і перерахунок кута матриці в радіани

$\alpha_{\text{град}}$	11,5	21,5	31,5	41,5	51,5	61,5	71,5	81,5
$\alpha_{\text{рад}}$	0,2007	0,3752	0,5498	0,7243	0,8988	1,0734	1,2479	1,4224

Результати розрахунків наведено у табл. 6.4 і на графіках рис. 6.2.

### Висновки:

1. Параметр  $x = d_0/d_D$  пов'язаний з коефіцієнтом витягання  $\lambda = (d_0/d_D)^2$ .

2. При коефіцієнті тертя  $\mu = 0,05$  максимальне значення  $x_{\text{max}} = 1,541$  при  $\alpha = 43,569^\circ$ . Тобто при цьому куті матриці можливо досягнути максимального витягання  $\lambda = 1,541^2 = 2,373$ , або відносне обтиснення  $\varepsilon = (1 - 1/\lambda) \cdot 100 = 57,9 \%$ .

3. При  $\mu = 0,25$   $x_{\text{max}} = 1,293$  при  $\alpha = 37,582^\circ$ . Тобто при цьому куті матриці можливо досягнути максимального витягання  $\lambda = 1,293^2 = 1,672$ , або відносне обтиснення  $\varepsilon = (1 - 1/\lambda) \cdot 100 = 40,2 \%$ .

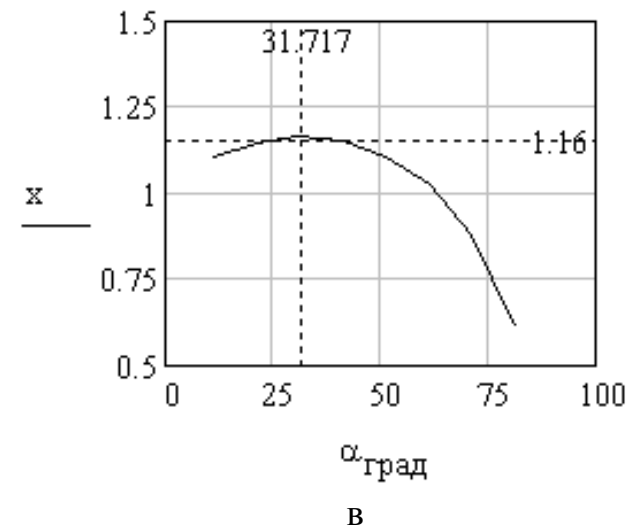
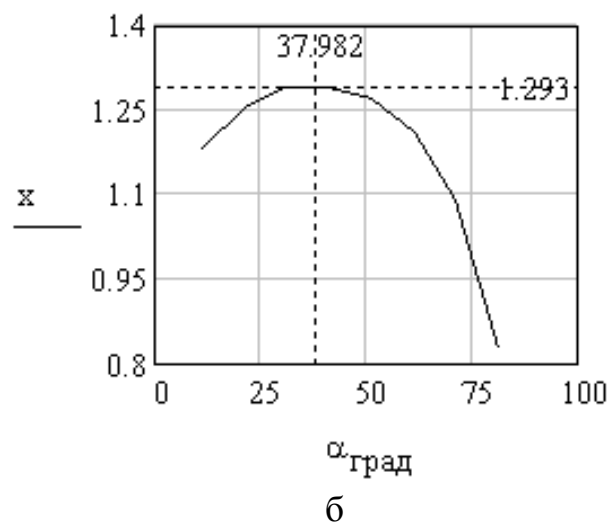
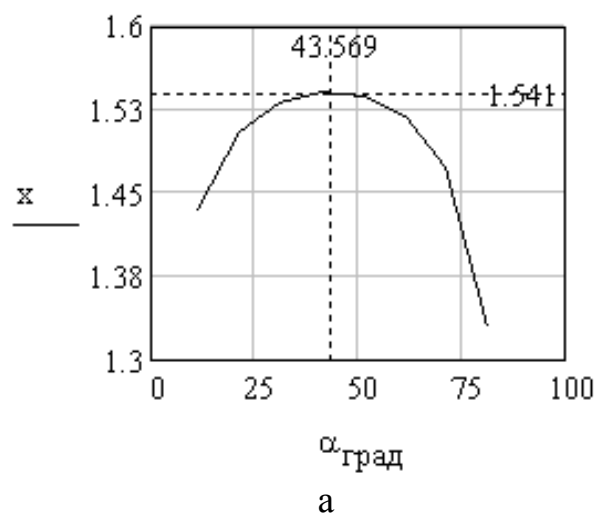
4. При  $\mu = 0,5$   $x_{\text{max}} = 1,16$  при  $\alpha = 31,717^\circ$ . Тобто при цьому куті матриці можливо досягнути максимального витягання  $\lambda = 1,16^2 = 1,346$ , або відносне обтиснення  $\varepsilon = (1 - 1/\lambda) \cdot 100 = 25,7 \%$ .

5. Таким чином, при збільшенні коефіцієнта тертя  $\mu$  максимальний коефіцієнт витягання знижується і зменшується необхідний кут матриці  $\alpha$ .

Варіанти індивідуальних завдань наведено у табл. 6.5

**Таблиця 6.4** – Результати розрахунку за формулами (6.2 і 6.3)

$\mu$	$\alpha_{\text{рад}} = 0,2007$		$\alpha_{\text{рад}} = 0,3752$		$\alpha_{\text{рад}} = 0,5498$		$\alpha_{\text{рад}} = 0,7243$		$\alpha_{\text{рад}} = 0,8988$		$\alpha_{\text{рад}} = 1,0734$		$\alpha_{\text{рад}} = 1,2479$		$\alpha_{\text{рад}} = 1,4224$	
	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$	$a$	$x$
0,05	1,259	1,435	1,150	1,505	1,116	1,532	1,105	1,540	1,110	1,537	1,131	1,519	1,195	1,473	1,514	1,329
0,25	2,348	1,183	1,813	1,256	1,663	1,288	1,647	1,292	1,748	1,269	2,105	1,210	4,286	1,090	1,542	0,826
0,5	3,849	1,102	2,826	1,146	2,618	1,160	2,807	1,147	3,763	1,105	16,071	1,022	2,361	0,877	0,458	0,612



а –  $\mu = 0,05$ ; б –  $\mu = 0,25$ ; в –  $\mu = 0,5$

**Рисунок 6.2** - Графіки визначення найбільшого значення  $x = d_0/d_d$  при якому процес редуцирування може протікати стабільно

### 6.3 Варіанти індивідуальних завдань

**Таблиця 6.5** - Варіанти індивідуальних завдань для розрахунку параметрів редуцирування циліндричної заготовки

№ варіанта	Кут $\alpha$ , градуси							
Приклад	11,5	21,5	31,5	41,5	51,5	61,5	71,5	81,5
1	6,0	16,0	26,0	36,0	46,0	56,0	66,0	76,0
2	6,5	16,5	26,5	36,5	46,5	56,5	66,5	76,5
3	7,0	17,0	27,0	37,0	47,0	57,0	67,0	77,0
4	7,5	17,5	27,5	37,5	47,5	57,5	67,5	77,5
5	8,0	18,0	28,0	38,0	48,0	58,0	68,0	78,0
6	8,5	18,5	28,5	38,5	48,5	58,5	68,5	78,5
7	9,0	19,0	29,0	39,0	49,0	59,0	69,0	79,0
8	9,5	19,5	29,5	39,5	49,5	59,5	69,5	79,5
9	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0
10	10,5	20,5	30,5	40,5	50,5	60,5	70,5	80,5
11	11,0	21,0	31,0	41,0	51,0	61,0	71,0	81,0
12	12,0	22,0	32,0	42,0	52,0	62,0	72,0	82,0
13	12,5	22,5	32,5	42,5	52,5	62,5	72,5	82,5
14	13,0	23,0	33,0	43,0	53,0	63,0	73,0	83,0
15	13,5	23,5	33,5	43,5	53,5	63,5	73,5	83,5
16	14,0	24,0	34,0	44,0	54,0	64,0	74,0	84,0
17	14,5	24,5	34,5	44,5	54,5	64,5	74,5	84,5
18	15,0	25,0	35,0	45,0	55,0	65,0	75,0	85,0
19	15,5	25,5	35,5	45,5	55,5	65,5	75,5	85,5
20	16	26	36,0	46,0	56,0	66,0	76,0	86,0

## 7 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Николаев, В.А. Теория прокатки полос [Текст] / В.А. Николаев. – Запорожье, ЗГИА, 2014. – 259 с.
2. Ніколаєв, В.О. Теорія обробки металів тиском [Текст] / В.О. Ніколаєв. - Запоріжжя, ЗДІА, 2015. – 112 с.
3. Грудев, А.П. Теория прокатки [Текст] / А.П. Грудев. - М.: Металлургия, 1988. – 240 с.
4. Сафьян М.М. Технология процессов прокатки волочения. Листопрокатное производство [Текст] / М.М. Сафьян, В.Л. Мазур, А.М. Сафьян, А.И. Молчанов. – К.: Вища школа, 1988. – 351 с.
5. Николаев В.А. Теория и практика волочения металла. Учебное пособие. – [Текст] / В.А. Николаев. – Запорожье, ЗГИА, 2005. – 149 с.
6. Перлин, И.Л. Теория волочения [Текст] / И.Л. Перлин, М.З. Ерманок. - М.: Металлургия, 1971. – 447 с.
7. Омельченко, П.П. Технологические процессыковки, штамповки. Курсовое проектирование [Текст] / П.П. Омельченко, Б.С. Каргин, А.Д. Кирицев и др. – К., Донецк: Вища школа, 1986. – 151 с.
8. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
9. Евстратов, В.А. Теория обработки металлов давлением. Сборник задач и упражнений [Текст] / В.А. Евстратов. – Х.: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1984. – 104 с.

**В. М Проценко**

*к.т.н., доцент*

## **ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ОМТ, ТЕХНОЛОГІЯ ПРОЦЕСІВ ОМТ**

**Методичні вказівки**

**до виконання практичних занять,  
контрольних робіт, курсового проектування і самостійної роботи**

*для бакалаврів та спеціалістів ЗДІА  
спеціальності «Обробка металів тиском»  
всіх форм навчання*

Підписано до друку 16.06.2015р. Формат 60х84 1/32. Папір офсетний.

Умовн. друк. арк. 3,3. Наклад 1 прим.

Внутрішній договір № 80/16 *Оц. 4,00*

Запорізька державна інженерна академія

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

Віддруковано друкарнею  
Запорізької державної інженерної академії  
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226  
ЗДІА