

Міністерство освіти і науки України  
Запорізька державна інженерна академія

## **ПРОКАТКА ЛИСТІВ ТА ШТАБ**

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

*для студентів ЗДІА,  
що навчаються за спеціальністю 136 «Металургія»  
(спеціалізація «Обробка металів тиском»),  
галузь знань 13 «Механічна інженерія»,  
всіх форм навчання*

*Рекомендовано до видання  
на засіданні кафедри ОМТ  
протокол № 20 (8) від 08.06.17 р.*

Запоріжжя  
ЗДІА  
2017

*В.М. Проценко, к.т.н., доцент*

***Відповідальний за випуск:*** *зав. кафедрою ОМТ*

*д.т.н., професор О.В. Явтушенко*

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

**Проценко В.М.**

Прокатка листів та штаб: методичні вказівки до виконання практичних занять, контрольних робіт і самостійної роботи для студентів ЗДІА, що навчаються за спеціальністю 136 «Металургія» (спеціалізація «Обробка металів тиском») всіх форм навчання / В.М. Проценко. Запоріз. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2017. – 67 с.

В методичних вказівках наведено методики, алгоритми рішень і приклади задач по основним розділам теорії і технології прокатного виробництва листів та штаб. Застосовано програмний комплекс Mathcad для побудови тримірних (контурних) графіків і програмування розрахунків. Методичні вказівки призначені для студентів ЗДІА, що навчаються за спеціальністю 136 «Металургія» (спеціалізація «Обробка металів тиском») всіх форм навчання і можуть використовуватись при виконання практичних занять, контрольних робіт і самостійної роботи студентів.

## 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 Приклад визначення параметрів формозмінювання .....	14
1.4 Варіанти індивідуальних завдань № 1 .....	16
2 РОЗРАХУНОК ЗМІНЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ МЕТАЛУ ПРИ ГОРЯЧОМУ ПРОКАТУВАННІ В РЕВЕРСИВНІЙ КЛІТІ (завдання № 2).	17
2.1 Теоретичний вступ.....	17
2.2 Завдання для розрахунку змінювання температури металу по проходам при реверсивному прокатуванні .....	24
2.3 Приклад визначення температури металу по проходам .....	25
2.4 Варіанти індивідуальних завдань № 2 .....	30
3 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ПРОКАТУВАННІ ШТАБИ (завдання № 3) .....	32
3.1 Теоретичний вступ .....	32
3.2 Завдання на виконання розрахунку енергосилових параметрів прокатки .....	34
3.3 Приклад визначення енергосилових параметрів прокатки .....	35
3.4 Варіанти індивідуальних завдань № 3.....	38
4 ОСЕРЕДОК ДЕФОРМАЦІЇ (завдання № 4) .....	39
4.1 Алгоритм розрахунку характеристик осередку деформації .....	39
4.2 Приклад виконання завдання № 4 .....	40
4.3 Варіанти індивідуальних завдань № 4 .....	43
5 РОЗРАХУНОК ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ШТАБИ І ОКРУЖНОЇ ШВИДКОСТІ ВАЛКІВ ПРИ НЕПЕРЕРВНОМУ ПРОКАТУВАННІ (завдання № 5) .....	44
5.1 Алгоритм розрахунків при прокатуванні в двоклітьовій групі прокатного стану .....	44
5.2 Приклад виконання завдання № 5а .....	44
5.3 Варіанти індивідуальних завдань № 5а .....	46
5.4 Приклад виконання завдання № 5 б .....	47

5.5 Варіанти індивідуальних завдань № 5 б .....	49
<b>6 НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН І РОЗШИРЕННЯ ШТАБИ</b> <b>(завдання № 6) .....</b>	<b>50</b>
6.1 Особливості розрахунку розширення штаби при прокатуванні ..	50
6.2 Приклад виконання завдання № 6а .....	50
6.3 Варіанти індивідуальних завдань № 6а .....	51
6.4 Приклад виконання завдання № 6 б .....	52
6.5 Варіанти індивідуальних завдань № 6 б .....	54
<b>7 ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ ПРОКАТКИ (завдання № 7) .....</b>	<b>55</b>
7.1 Методика розрахунку зусилля і моменту прокатки .....	55
7.2 Приклад виконання завдання № 7а .....	57
7.3 Варіанти індивідуальних завдань № 7а .....	61
7.4 Приклад виконання завдання № 7 б .....	62
7.5 Варіанти індивідуальних завдань № 7 б .....	65
7.6 Програма для розрахунку максимального обтиснення при гарячому прокатуванні (завдання № 7 б) відповідно до блок-схеми на рис. 7.3, розроблена у програмі Mathcad .....	65
<b>8 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>67</b>

# 1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФОРМОЗМІНЮВАННЯ ПРИ ПОЗДОВЖНОМУ ПРОКАТУВАННІ ШТАБИ

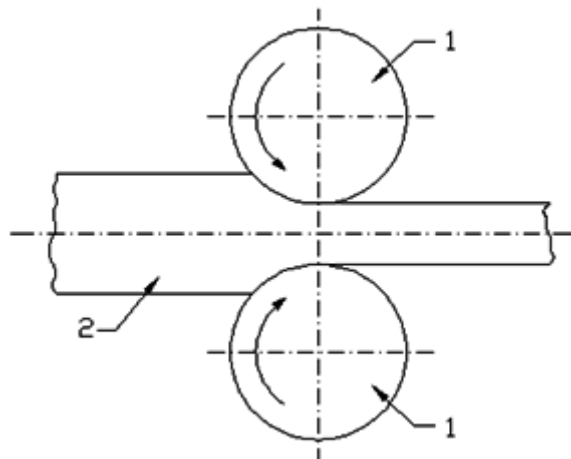
## (Завдання № 1)

### 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.

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

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

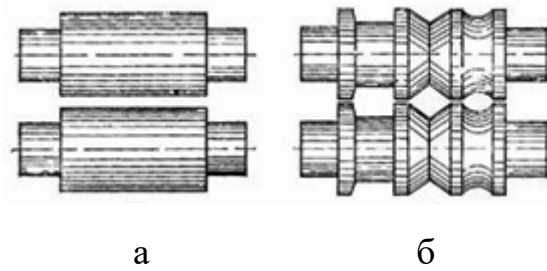


1 – валки; 2 – штаба

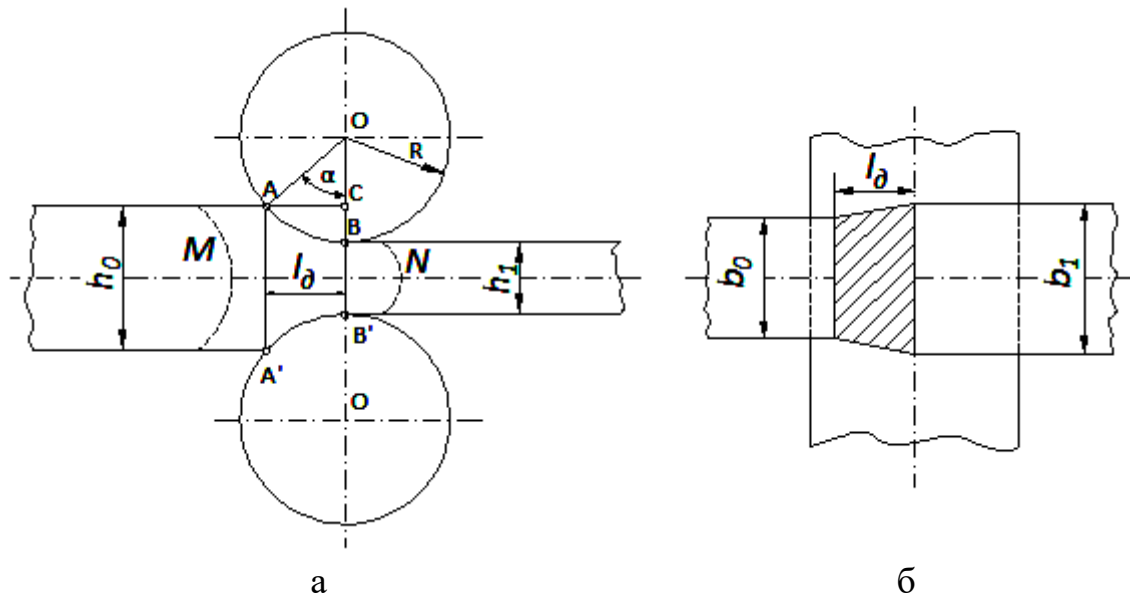
**Рисунок 1.1** – Схема процесу поздовжньої прокатки

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  $ABB'A'$ , 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 [1]:

- дуга  $AB$  (також  $A'B'$ ), по якій метал контактує з валком, називається *дугою захвату*;

- центральний кут АОВ ( $\alpha$ ) називається *кутам захвату*;
- горизонтальна проекція дуги захвату відповідає довжині осередка деформації і позначається  $l_0$ .

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  $\delta_l$  не часто застосовуються на практиці для характеристики подовжньої деформації, проте дуже широко використовується показник, який називається коефіцієнтом витягання.



13. *Коефіцієнт витягання* - відношення довжини штаби після проходу до початкової довжини штаби [2]

$$\lambda = l_1/l_0 \quad (1.13)$$

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*

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

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

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

Загальний коефіцієнт витягання можна визначити і з іншої формули

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

де  $\lambda_1 \div \lambda_n$  – 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

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

З формули (1.16) отримуємо величину середнього коефіцієнта витягання

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

де  $\lambda_{\text{сер}}$  – 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 захвату визначається по формулі

$$\alpha = \arccos[1 - (\Delta h/D_B)] \approx \sqrt{\Delta h/R} \quad (1.20)$$

Об'єм тіла при пластичній деформації змінюється не значно. Тому 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 и після проходження в кліті.

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

звідки слідує

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

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

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

де  $F_0, F_1$  - відповідно площа поперечного перетину штаби до и 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:

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

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;

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

Тобто умова сталості секундних об'ємів записується

$$F_i \cdot \vartheta_i = const,$$

$$F_0 \cdot \vartheta_0 = F_i \cdot \vartheta_i = F_1 \cdot \vartheta_1 \quad (1.25)$$

де  $\vartheta_0, \vartheta_1$  - 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.

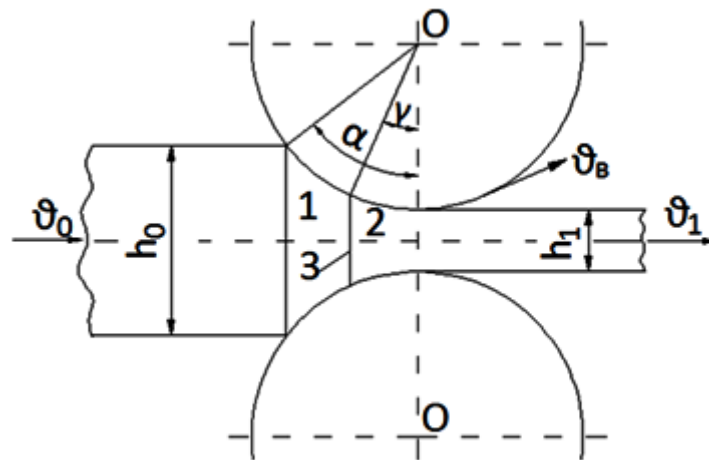
З формули (1.25) отримаємо

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= F_0 \cdot \vartheta_0 / F_1 \\ \vartheta_1 &= \lambda \cdot \vartheta_0 \end{aligned} \quad (1.26)$$

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 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 віджимається 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).

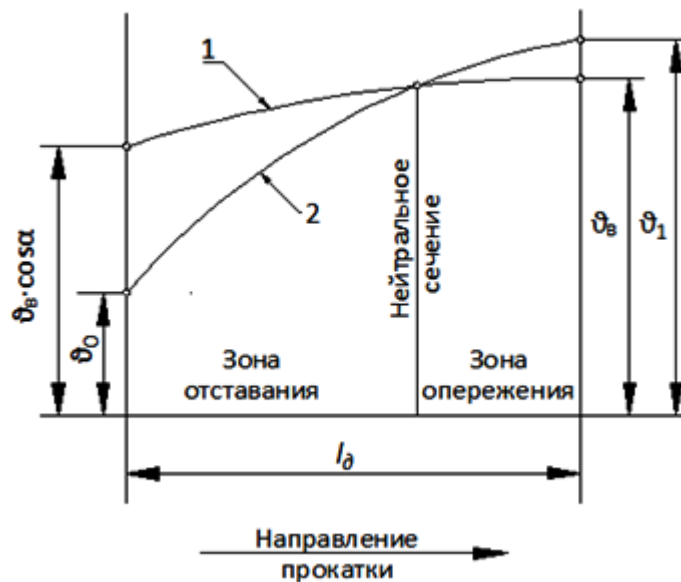


1 – зона відставання; 2 – зона випередження; 3 – нейтральний перетин

**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 [2].

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 [3]

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

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 [1]

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

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

$D_B$  – діаметр валків, мм.

Для знаходження нейтрального кута можна скористатися формулою Екелунда – Павлова [1]

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

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

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

де  $f$  – коефіцієнт тертя.

Коефіцієнт тертя розраховується за формулою [4, 6]

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

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

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

$k_3$  - коефіцієнт, що характеризує марку сталі;

$T_M$  - температура металу в даному проході, °С.

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, що характеризує 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 елемента 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 склали  $\Delta b_1 \dots \Delta b_7$  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 Приклад визначення параметрів формозмінення при прокатуванні

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

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

Істинне відносне обтиснення розраховуємо по формулі

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

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

$$\lambda_1 = l_1 / l_0 = 6472 / 5000 = 1,294.$$

Загальний коефіцієнт витягання для 1-го проходу дорівнює:

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

для 2-го проходу  $\lambda_{\text{заг2}} = l_2 / l_0$ , 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	$h$ , мм	$b$ , мм	$l$ , мм	$\varepsilon_h$ , %	$\delta_h$ , %	$\frac{1}{\eta}$	$\beta$	$\lambda$	$\eta \cdot \beta \cdot \lambda$	$\lambda_{\text{заг}}$
---------------	----------	----------	----------	---------------------	----------------	------------------	---------	-----------	----------------------------------	------------------------

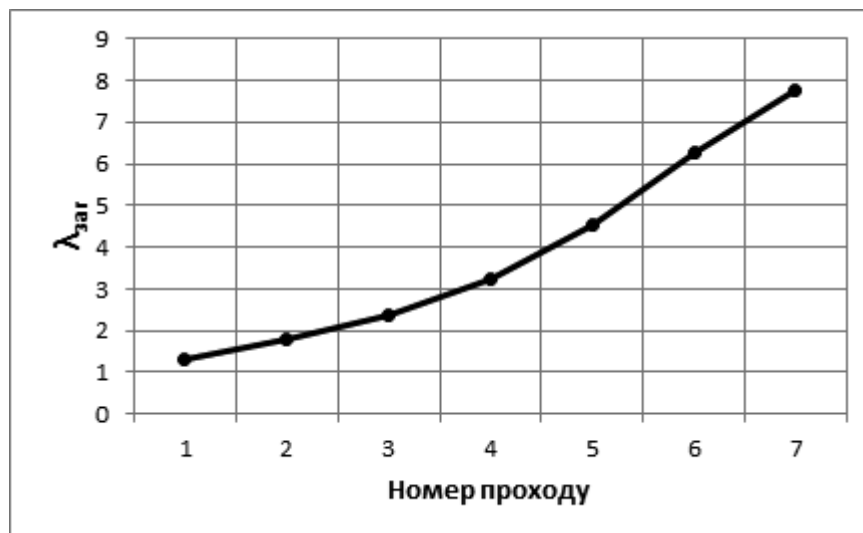
(n)										
1	135	515	6472	25,0	28,8	1,333	1,030	1,294	1,0	1,294
2	95	529	8954	29,6	35,1	1,421	1,027	1,383	1,0	1,791
3	70	541	11882	26,3	30,5	1,357	1,023	1,327	1,0	2,377
4	50	553	16274	28,6	33,6	1,400	1,022	1,370	1,0	3,255
5	35	564	22795	30,0	35,7	1,429	1,020	1,401	1,0	4,559
6	25	573	31412	28,6	33,6	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

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

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

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



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

## 1.4 Варіанти індивідуальних завдань № 1

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 ЗМІНЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ МЕТАЛУ ПРИ ГОРЯЧОМУ ПРОКАТУВАННІ В РЕВЕРСИВНІЙ КЛІТІ

### (Завдання № 2)

#### 2.1 Теоретичний вступ

Тепловий режим є одним з визначальних чинників технології прокатки. Він безпосередньо пов'язаний з режимами обтиснень, швидкостей, натягнень; від нього залежать енергосилові параметри прокатних станів, зусилля, що діють на валки і інші деталі робочих клітей, механічні властивості, точність розмірів профілю, форма, структура і якість поверхні готового прокату, профілізація і стійкість прокатних валків, стабільність всього технологічного процесу.

Тепловий режим розраховується з урахуванням теплового балансу, залежного від процесів конвективного, контактного, променевого теплообміну штаби і прокатних валків з рідиною, що охолоджує, навколишнім середовищем і деталями прокатного стану. Ці процеси протікають при гарячому і холодному прокатуванні з істотними відмінностями, що вимагають принципово різного підходу до методів розрахунку основних параметрів теплового режиму: температури штаби по проходах, температури і теплового профілю робочих і опорних валків, витрати рідини, необхідної для їх охолодження.

При гарячому прокатуванні визначальним параметром теплового режиму є температура штаби, заздалегідь нагрітої до 1100 - 1280°C і яка остигає в процесі деформації до 800 - 1100°C [2]. Втрата тепла штабою відбувається шляхом контактного теплообміну з валками, випромінювання в навколишнє середовище, конвекції охолоджуючої води і навколишнього повітря. Одночасно з охолодженням штаби під час прокатки відбувається і деяке підвищення її температур за рахунок виникнення тепла в результаті роботи, що витрачається на деформацію і тертя між металом і валками. Температура валків при гарячому прокатуванні на порядок нижче за температуру штаби (60 – 120°C) і визначається нею, як незалежний початковий параметр. Коливання температури валків, викликані зміною витрати і температури води, що подається на валки, мало впливають на температуру прокатуваного металу.

Через деякий час після початку роботи стану середня температура валків, проводкової арматури і інших деталей стану, дотичних з гарячою штабою, встановлюється приблизно постійною і змінюється лише при зміні сортаменту, ритму або режиму прокатки.

При холодному прокатуванні визначальним параметром теплового режиму є тепловиділення за рахунок пластичної деформації і тертя в зоні контакту штаби і валків. При цьому в стан зазвичай поступає штаба, що має температуру, близьку до температури навколишнього середовища (20 – 40°C); по мірі обтиснення температура штаби збільшується і на виході із стану досягає 150 – 300°C. Температура валків при холодному прокатуванні одного порядку з температурою штаби і залежить від розподілу тепла, що виділилося, між

штабою і валками, і інтенсивності теплообміну їх з охолоджувальною рідиною і навколишнім середовищем.

Отже, на відміну від гарячої прокатки, температура штаби при розрахунку теплового режиму холодної прокатки не може бути незалежним початковим параметром і підлягає визначенню одночасно з температурою валків.

Враховуючи істотні відмінності теплових процесів, що протікають на станах гарячої і холодної прокатки, тепловий розрахунок цих станів проводиться по-різному.

У даних методичних вказівках розглянута тільки методика теплового розрахунку станів гарячої прокатки. Розрахунок полягає в наступному.

Спочатку задається температура нагріву металу під прокатку, що є початковим параметром теплового режиму стана.

Потім визначаються послідовно, від проходу до проходу, зміни температури металу, викликані контактом з валками, виділенням тепла за рахунок пластичної деформації, гідрозбивом окалини, охолодженням на рольгангах, тощо. При виконанні цих розрахунків температуру валків вважають заздалегідь відомою, приймаючи її наближене середнє значення. Зміни температури металу, викликані кожним з чинників, обчислюються незалежно один від одного. Для розрахунків вказаних змін температури використовуються або емпіричні формули, що виправдали себе на практиці, або формули, засновані на теорії теплопередачі, уточнені за практичними даними.

При виведенні формул для розрахунку зниження температури штаби за рахунок втрат тепла випромінюванням приймають наступні допущення:

температурний градієнт по товщині, ширині і довжині охолоджуваного металу відсутній;

тепловипромінювання верхньої і нижньої поверхонь штаби однакове;

теплоємність, щільність і коефіцієнт випромінювання є постійними величинами, не залежними від температури і стана випромінюючої поверхні.

Залежності, що описують падіння температури унаслідок випромінювання, зазвичай отримують сумісним вирішенням рівняння Стефана - Больцмана і рівняння, що характеризує зміни тепловмісту штаби за час  $\tau$ :

$$dQ = F \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{серед}}}{100} \right)^4 \right] \cdot d\tau \quad (2.1)$$

$$dQ = c \cdot \rho \cdot V \cdot dT \quad (2.2)$$

де  $dQ$  – змінення тепловмісту за час  $d\tau$ ;

$F$  - поверхня випромінювання,  $\text{м}^2$ ;

$\varepsilon_{\text{пр}}$  - коефіцієнт випромінювання;

$\sigma$  - коефіцієнт Стефана – Больцмана,  $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$T_0$  – початкова температура металу,  $\text{К}$ ;

$T_{\text{серед}}$  - температура навколишнього середовища,  $\text{К}$ ;

$c$  - коефіцієнт теплоємності, Дж/(кг К);  
 $\rho$  - щільність металу, кг/м<sup>3</sup>;  
 $V$  - об'єм металу, м<sup>3</sup>.

Не враховуючи величину  $\left(\frac{T_{\text{серед}}}{100}\right)^4$ , як істотно меншу, ніж величина  $\left(\frac{T_0}{100}\right)^4$ , отримаємо:

$$\frac{dT}{T^4} = \frac{10^{-8} \cdot F \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot d\tau}{c \cdot \rho \cdot V} \quad (2.3)$$

Після інтегрування формули (2.3) можна отримати формулу для визначення температури металу після втрат тепла випромінюванням

$$T_{\text{випр}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot 10^9 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot V}\right) + \left(\frac{1000}{T_0}\right)^3}} \quad (2.4)$$

де  $T_{\text{випр}}$  – температура штаби після втрат тепла випромінюванням, К;

$\tau$  - час охолодження, с.

Для спрощення розрахунку можна користуватися формулою Г.П. Іванцова

$$T_{\text{випр}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot \tau}{h}\right) + \left(\frac{1000}{T_0}\right)^3}} \quad (2.5)$$

де  $h$  – товщина охолоджуваної штаби, мм.

Зміну температури за рахунок конвективних втрат тепла визначають вирішенням наступної системи рівнянь

$$dQ = \alpha_k \cdot (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot F \cdot d\tau \quad (2.6)$$

$$dQ = c \cdot \rho \cdot V \cdot dT \quad (2.7)$$

де  $\alpha_k$  – коефіцієнт конвективної теплопередачі, Дж/(м<sup>2</sup> К).

Тоді, вирішуючи систему рівнянь при допущеннях, розглянутих при описанні втрат тепла випромінюванням, отримаємо

$$dT = \frac{\alpha_k \cdot (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot F}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot d\tau \quad (2.8)$$

Втрати тепла металом при конвективному теплообміні можна розраховувати по формулі

$$\Delta T_{\text{конв}} = (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot e^{-\frac{\alpha_k \cdot F \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot V}} + T_{\text{серед}} \quad (2.9)$$

де  $\Delta T_{\text{конв}}$  – втрати тепла металом при конвективному теплообміні, К.

Також для спрощення розрахунку зміни температури штаби за рахунок конвективного теплообміну можна скористатися наступною формулою

$$\Delta T_{\text{конв}} = (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot e^{-\frac{0,445 \cdot \tau}{h}} + T_{\text{серед}} \quad (2.10)$$

Втрати тепла конвекцією різні на різних ділянках технологічного потоку, і збільшуються по мірі збільшення швидкості прокатки, зменшення температури і товщини штаби, тобто збільшуються від нагрівальних печей до ділянки змотування.

Тому втрати теплоти конвекцією в основному розраховують при розрахунку зміни температури металу в чистових клітках, в останніх міжкліткових проміжках, на відвідному рольгангу і нехтують цими втратами при розрахунку зміни температури штаби в чорнових клітках і на проміжному рольгангу. Не врахування конвективних втрат в цьому випадку дає неточність кінцевого результату розрахунку температури не більш, ніж на 0,2 ÷ 0,3 %.

Розрахунок втрат тепла штабою за рахунок контакту з робочими валками заснований на припущенні відсутності теплообміну з навколишнім середовищем. Зміна температури металу за рахунок втрат тепла при контакті з валками визначається по формулі Х. Венцеля

$$\Delta T_{\text{кв}} = \frac{4,87}{(h_0 + h_1)} (T_0 - T_{\text{в}}) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_0 \cdot l_{\text{д}}}{1000 \cdot (h_0 + h_1) \cdot \vartheta_{\text{сер}}}} \quad (2.11)$$

де  $\Delta T_{\text{кв}}$  – падіння температури металу в проході за рахунок втрат при контакті з валками, К;

$T_{\text{в}}$  - температура валків, К;

$\vartheta_{\text{сер}}$  – середня швидкість прокатки в даному проході, м/с.

Середня швидкість прокатки в проході

$$\vartheta_{\text{сер}} = (\vartheta_0 + \vartheta_1) / 2 \quad (2.12)$$

Швидкість входу заготовки в кліть можна визначити, використовуючи формулу (1.26), якщо відомі швидкість прокатки в даному проході і коефіцієнт витягання у цьому ж проході.

Підвищення температури прокатуваної штаби за рахунок енергії деформації визначається рівнянням

$$\Delta T_{\text{деф}} = \frac{A_{\text{деф}}}{c \cdot \rho \cdot V} \quad (2.13)$$

де  $\Delta T_{\text{деф}}$  – деформаційний розігрів, °С;

$A_{\text{деф}}$  – робота, що витрачається на пластичну деформацію, Дж.

Робота деформації

$$A_{\text{деф}} = -p_{\text{сер}} \cdot \frac{V}{h} \cdot dh \quad (2.14)$$

де  $p_{\text{сер}}$  – середнє нормальне контактне напруження, МПа.

Виконуючи інтегрування формули (2.14) отримаємо формулу для визначення повної роботи деформації

$$A_{\text{деф}} = p_{\text{сер}} \cdot V \cdot \ln(h_0/h_1) \quad (2.15)$$

Оскільки при прокатуванні 80÷90 % роботи йде на підвищення температури металу, то відповідно деформаційний розігрів, згідно формулам (2.13) і (2.15) можна розрахувати по формулі

$$\Delta T_{\text{деф}} = 0,85 \cdot \frac{P_{\text{сер}}}{c \cdot \rho} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (2.16)$$

Середнє нормальне контактне напруження розраховується по формулі

$$p_{\text{сер}} = \beta \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_s \quad (2.17)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт Лоде, який враховує вплив головної нормальної напруги, що діє у напрямку осі бочки валків;

$n_{\sigma}$  - коефіцієнт напруженого стана;

$\sigma_s$  – опір металу пластичній деформації, МПа.

Коефіцієнт Лоде при плоскій (двовірній) деформації дорівнює  $\beta = 1,15$ .

Коефіцієнт напруженого стана визначається по формулі

$$n_{\sigma} = n'_{\sigma} \cdot n''_{\sigma} \cdot n'''_{\sigma} \cdot n_b \quad (2.18)$$

де  $n'_{\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує вплив зовнішнього тертя на напружений стан в осередку деформування;

$n''_{\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує вплив зовнішніх зон на напружений стан в осередку деформування;

$n'''_{\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує вплив натягнення штаби на напружений стан в осередку деформування;

$n_b$  – коефіцієнт, що враховує вплив ширини штаби на напружений стан в осередку деформування.

При розрахунку коефіцієнта  $n'_{\sigma}$  враховується геометрія осередку деформування, а саме відношення довжини осередку деформування до середньої товщини штаби в проході  $l_{\text{д}}/h_{\text{сер}}$

$$\text{при } \frac{l_{\text{д}}}{h_{\text{сер}}} > (4 \div 5) \quad n'_{\sigma} = 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{l_{\text{д}}}{h_{\text{сер}}} \quad (2.19)$$

де  $h_{\text{сер}}$  - середня розрахована товщина штаби в проході, мм

$$h_{\text{сер}} = (h_0 + h_1)/2 \quad (2.20)$$

$$\text{при } 2 < \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} < 4 \quad n'_\sigma = \frac{2 \cdot h_H}{\Delta h \cdot (\delta - 1)} \cdot \left[ \left( \frac{h_H}{h_1} \right)^\delta - 1 \right] \quad (2.21)$$

де  $h_H$  - висота нейтрального перетину, мм;

$\delta$  – коефіцієнт, який визначається за формулою Целікова А.И. [4]

$$\delta = 2 \cdot f \cdot (l_d / \Delta h) \quad (2.22)$$

$$\frac{h_H}{h_1} = \left( \frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right)^{\frac{1}{\delta}} \quad (2.23)$$

$$\text{при } \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} < 2 \quad n'_\sigma = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} \quad (2.24)$$

Коефіцієнт  $n''_\sigma$  при  $l_d/h_{\text{сер}} < 1$  визначається по формулі

$$n''_\sigma = (l_d/h_{\text{сер}})^{-0,4} \quad (2.25)$$

Якщо  $l_d/h_{\text{сер}} > 1$ , то  $n''_\sigma = 1$ .

Коефіцієнт  $n'''_\sigma$ , якщо немає напруження, дорівнює 1.

У випадку, коли напруження має місце, то коефіцієнт  $n'''_\sigma$  розраховується по формулі

$$n'''_\sigma = 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2 \cdot p'_{\text{сер}}} \quad (2.26)$$

де  $\sigma_0$  і  $\sigma_1$  – відповідно величини заднього і переднього натягань, МПа;

$p'_{\text{сер}}$  - середній нормальний контактний тиск без урахування натягання штаби, МПа.

Коефіцієнт  $n'''_\sigma$  можна розраховувати і по формулі Корольова (для холодної прокатки)

$$n'''_\sigma = \left( \varphi - \frac{\sigma_1}{1,15 \cdot \sigma_{s0}} \right) \cdot \frac{1}{m_1} \cdot (e^{m_1 \cdot \psi_n} - 1) + \left( 1 - \frac{\sigma_0}{1,15 \cdot \sigma_{s0}} \right) \cdot (e^{m_0 \cdot (1 - \psi_n)} - 1) \quad (2.27)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт зміцнення в даному проході;

$\sigma_{s0}$  – опір металу деформації перед проходом, МПа;

$m_0, m_1$  - коефіцієнти;

$\Psi_n$  - коефіцієнт, який характеризує положення нейтрального перетину в осередку деформування.

Коефіцієнт зміцнення знаходиться з формули

$$\varphi = \sigma_{s1} / \sigma_{s0} \quad (2.28)$$

де  $\sigma_{s1}$  - опір металу деформації після проходження, МПа.

Коефіцієнти  $m_0$  і  $m_1$  в кожному проході

$$m_0 = 2 \cdot f \cdot (l_d / h_0) \quad (2.29)$$

$$m_1 = 2 \cdot f \cdot (l_d / h_1) \quad (2.30)$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя.

Коефіцієнт тертя розраховується за формулою [4, 6]

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_M) \quad (2.31)$$

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

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

$k_3$  - коефіцієнт, що характеризує марку сталі;

$T_M$  - температура металу в даному проході, °С.

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 знаходиться по формулі

$$k_2 = 1,67 \cdot v_1^{-0,25} - 0,4 \quad (2.32)$$

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

Коефіцієнт, що характеризує марку сталі, визначається за формулою

$$k_3 = 0,97926 + [C] \cdot (0,0031 \cdot [Ni] + 0,00175 \cdot [W]) + 0,02457 \cdot [Mn] + 0,02144 \cdot [Cr] + 0,001 \cdot [Mo] \quad (2.33)$$

де [...] - содержание данного элемента а стали в процентах.

Для вуглецевих сталей коефіцієнт  $k_3$  дорівнює 1.

Коефіцієнт  $\Psi_n$  визначається по формулі

$$\Psi_n = \frac{m_0}{m_0 + m_1} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{m_0} \cdot \ln \left( \frac{\varphi - \frac{\sigma_1}{\sigma_{s0}}}{1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{s0}}} \right) \right] \quad (2.34)$$

Коефіцієнт  $n_b$  залежить від відношення середньої ширини штаби до довжини осередку деформування, тобто  $b_{сер} / l_d$ , де  $b_{сер}$  - середня ширина штаби, мм:

$$b_{\text{сер}} = (b_0 + b_1)/2 \quad (2.35)$$

При  $b_{\text{сер}}/l_{\text{д}} > 5$   $n_b = 1$ .

При відношенні середньої ширини штаби до довжини осередку деформування менше п'яти, коефіцієнт  $n_b$  розраховується по формулі

$$n_b = \frac{1 + \left( \frac{3 \cdot b_{\text{сер}} - l'_{\text{д}}}{6 \cdot b_{\text{сер}}} \right) \cdot f \cdot \frac{l'_{\text{д}}}{h_{\text{сер}}}}{1 + \frac{f}{2} \cdot \frac{l'_{\text{д}}}{h_{\text{сер}}}} \quad (2.36)$$

де  $l'_{\text{д}}$  - приведена довжина осередку деформування [4], мм.

$$l'_{\text{д}} = l_{\text{д}} \cdot \left[ 1 - \frac{\text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{f} \right] \quad (2.37)$$

Опір металу деформації визначається по формулі [5]

$$\sigma_s = k \cdot \sigma_0 \cdot \xi^a \cdot (10 \cdot \varepsilon)^b \cdot (T/1000)^c \quad (2.38)$$

де  $k, a, b, c$  - коефіцієнти для конкретної марки сталі;

$\sigma_0$  - базовий опір металу деформації, який отримано методом розтягнення при стандартних умовах:  $\varepsilon = 10\%$ ;  $\xi = 1\text{с}^{-1}$ ;  $T = 1000^\circ\text{C}$ ;

$T$  - температура металу при входе в кліть (см. формулу 2.5);

$\xi$  - швидкість деформації,  $\text{с}^{-1}$ , яка визначається по формулі

$$\xi = \vartheta_1 \cdot \varepsilon_h / l_{\text{д}} \quad (2.39)$$

Коефіцієнти  $k, a, b, c$  визначаються по таблиці 2.2.

## 2.2 Завдання для розрахунку змінювання температури металу по проходам при реверсивному прокатуванні

У завданні необхідно визначити температуру металу після кожного проходу при прокатуванні заготовки в реверсивній кліті. Вихідні дані беруться відповідно до варіанту домашнього завдання № 1 по таблиці 1.2 і додатковими даними, представленими в таблиці 2.3 (див. в кінці завдання № 2).

Нижче приведений розрахунок змінювання температури металу при реверсивному прокатуванні заготовки із сталі мазкі 3сп товщиною  $h_0=180$  мм, шириною  $b_0=500$  мм і довжиною  $l_0=5000$  мм за 7 проходів з обтисненнями в кожному проході відповідно  $\Delta h_1 \dots \Delta h_7 = 45, 40, 25, 20, 15, 10, 5$  мм. Прокатка здійснюється на сталевих валках діаметром  $D_B=930$  мм зі швидкостями  $\vartheta_1 \dots \vartheta_7 = 2,3; 2,4; 2,5; 2,7; 2,9; 3,0; 3,2$  м/с відповідно по проходах. Температура нагріву заготовки в методичній печі складає  $T_0=1280^\circ\text{C}$ ; відстань від печі до кліті  $L=20$  м; швидкість транспортування заготовки до кліті  $\vartheta_{\text{тр}} = 1,7$  м/с.



## 2.3 Приклад визначення змінювання температури металу по проходам

Розрахунок будемо вести для центральної по довжині точки розкату. Відповідно до умов завдання заготовка нагрівається в методичній печі до температури 1280°C. Після видачі з печі вона транспортується по рольгангу до робочої кліті, внаслідок чого відбувається зниження температури металу із-за втрат теплоти випромінюванням в навколишнє середовище. Для визначення температури металу після втрат тепла випромінюванням можна скористатися формулою (2.5).

Для нашого випадку час охолодження заготовки при транспортуванні її від печі до кліті визначатиметься часом її транспортування

$$\tau_{\text{охл1}} = \frac{L}{\vartheta_{\text{тр}}} + \frac{l_0/2}{\vartheta_0}$$

де  $\tau_{\text{охл1}}$  - час охолодження металу при транспортуванні його від печі до кліті, с;

$L$  - відстань від печі до кліті, м;

$\vartheta_{\text{тр}}$  - швидкість транспортування заготовки від печі до кліті, м/с.

Швидкість входу заготовки в кліть визначаємо, використовуючи формулу (1.26)

$$\vartheta_0 = \vartheta_1/\lambda_1 = 2,3/1,294 = 1,78 \text{ м/с.}$$

Отже, час охолодження заготовки при її транспортуванні від печі до кліті складе

$$\tau_{\text{охл1}} = \frac{20}{1,7} + \frac{5/2}{1,78} = 13,2 \text{ с.}$$

Тепер можна визначити температуру металу перед першим проходом після втрат теплоти випромінюванням (формула 2.5). Температуру металу визначатимемо не в Кельвінах, а відразу в градусах за Цельсієм, і позначимо її  $T_{\text{вх}}$ , тобто температура металу при вході в прокатну кліть

$$\begin{aligned} T_{\text{вх1}} &= \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot \tau_{\text{охл1}}}{h_0}\right) + \left(\frac{1000}{T_0 + 273}\right)^3}} - 273 = \\ &= \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot 13,2}{180}\right) + \left(\frac{1000}{1280 + 273}\right)^3}} - 273 = 1272^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

Таким чином, в кліть заготовка входить з температурою 1272°C.

Далі визначаємо втрати тепла за рахунок контакту з ватками. При цьому приймаємо температуру валків  $T_{\text{в}} = 80^\circ\text{C}$ .

Середня швидкість прокатки в першому проході (формула 2.12)

$$v_{\text{сер1}} = (v_0 + v_1)/2 = (1,78 + 2,3)/2 = 2,04 \text{ м/с.}$$

Радіус валків кліті (формула 1.19)

$$R_B = 930/2 = 465 \text{ мм.}$$

Тоді довжина осередку деформування в першому проході (формула 1.18)

$$l_{\text{д1}} = \sqrt{R_B \cdot \Delta h_1} = \sqrt{465 \cdot 45} = 144,7 \text{ мм.}$$

Таким чином, падіння температури при контакті з валками в першому проході (формула 2.11) дорівнює

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{кв1}} &= \frac{4,87}{(h_0 + h_1)} (T_{\text{вх1}} - T_B) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_0 \cdot l_{\text{д1}}}{1000 \cdot (h_0 + h_1) \cdot v_{\text{сер1}}}} = \\ &= \frac{4,87}{(180 + 135)} (1272 - 80) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 180 \cdot 144,7}{1000 \cdot (180 + 135) \cdot 2,04}} = 5^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

Для визначення деформаційного розігрівання приймаємо коефіцієнт теплоємності для сталі  $c = 683,2 \text{ Дж/(кг·град)}$ , щільність металу  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ .

Оскільки для виведення диференціального рівняння контактного тиску використовується умова пластичності при двовимірній деформації, то в цьому випадку нехтуємо розрахованим раніше розширенням і для розрахунку середнього контактного тиску приймаємо коефіцієнт Лодє рівним 1,15.

Для нашого випадку в першому проході (формула 2.20)

$$h_{\text{сер1}} = (h_0 + h_1)/2 = (180 + 135)/2 = 157,5 \text{ мм.}$$

Тому відношення  $l_{\text{д1}}/h_{\text{сер1}} = 144,7/157,5 = 0,918 < 2$  (формула 2.24), звідки отримуємо

$$n'_{\sigma 1} = 1 + 0,918/6 = 1,153.$$

Для першого проходу (оскільки  $l_{\text{д1}}/h_{\text{сер1}} = 144,7/157,5 = 0,918 < 1$ , формула 2.25), то

$$n''_{\sigma 1} = (0,918)^{-0,4} = 1,035.$$

Оскільки в нашому прикладі розрахунку натягнення відсутнє, то коефіцієнт  $n'''_{\sigma} = 1$ .

Середня ширина штаби в першому проході (формула 2.35)

$$b_{\text{сер1}} = (b_0 + b_1)/2 = (500 + 515)/2 = 507,5 \text{ мм.}$$

Відношення  $b_{\text{сер1}}/l_{\text{д1}} = 507,5/144,7 = 3,507 < 5$ , тому розраховуємо коефіцієнт  $n_{b1}$  по формуле (2.36).

Спочатку визначаємо кут захвату (формула 1.20)

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_1}{D_B}\right) = \arccos\left(1 - \frac{45}{930}\right) = 17,9^\circ.$$

Далі визначаємо коефіцієнт тертя. Оскільки в нашому випадку прокатка відбувається на сталевих валках, то коефіцієнт  $k_1 = 1$ .

Для першого проходу коефіцієнт  $k_2$  дорівнює (формула 2.32)

$$k_2 = 1,67 \cdot \vartheta_1^{-0,25} - 0,4 = 1,67 \cdot 2,3^{-0,25} - 0,4 = 0,956.$$

Для сталі марки 3сп приймаємо  $k_3 = 1$ . Таким чином, коефіцієнт тертя в першому проході (формула 2.31) дорівнює

$$\begin{aligned} f_1 &= k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_{\text{вх1}}) = \\ &= 1 \cdot 0,956 \cdot 1 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot 1272) = 0,40. \end{aligned}$$

Тоді по формулі 2.37

$$l'_{\text{д1}} = l_{\text{д1}} \cdot \left[ 1 - \frac{tg\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}{f_1} \right] = 144,7 \cdot \left[ 1 - \frac{tg\left(\frac{17,9}{2}\right)}{0,40} \right] = 87,1 \text{ мм.}$$

По формулі (2.36) знаходимо

$$n_{b1} = \frac{1 + \left( \frac{3 \cdot b_{\text{сер1}} - l'_{\text{д1}}}{6 \cdot b_{\text{сер1}}} \right) \cdot f_1 \cdot \frac{l'_{\text{д1}}}{h_{\text{сер1}}}}{1 + \frac{f_1}{2} \cdot \frac{l'_{\text{д1}}}{h_{\text{сер1}}}} = \frac{1 + \left( \frac{3 \cdot 507,5 - 87,1}{6 \cdot 507,5} \right) \cdot 0,40 \cdot \frac{87,1}{157,5}}{1 + \frac{0,40}{2} \cdot \frac{87,1}{157,5}} = 0,994.$$

Таким чином, коефіцієнт напруженого стану в першому проході нашого прикладу дорівнює (формула 2.18)

$$n_{\sigma1} = n'_{\sigma1} \cdot n''_{\sigma1} \cdot n'''_{\sigma1} \cdot n_{b1} = 1,153 \cdot 1,034 \cdot 1 \cdot 0,994 = 1,186.$$

Швидкість деформації в першому проході (формула 2.39)

$$\xi_1 = \vartheta_1 \cdot \varepsilon_{h1} / l_{\text{д1}} = 2,3 \cdot 0,25 / 144,7 \cdot 10^{-3} = 3,97 \text{ с}^{-1}.$$

Для сталі 3сп коефіцієнти дорівнюють [5]:

$$k = 0,96, \sigma_0 = 90,7 \text{ МПа}, a = 0,124, b = 0,167, c = -2,54.$$

Тому опір металу деформації в першому проході складе (формула 2.38)

$$\begin{aligned} \sigma_{s1} &= k \cdot \sigma_0 \cdot \xi_1^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_{h1})^b \cdot (T_{\text{вх1}}/1000)^c = \\ &= 0,96 \cdot 90,7 \cdot 3,97^{0,124} \cdot (10 \cdot 0,25)^{0,167} \cdot (1272/1000)^{-2,54} = 65,3 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Отже, тепер можна знайти середнє нормальне контактне напруження (формула 2.17)

$$p_{\text{сер1}} = \beta \cdot n_{\sigma1} \cdot \sigma_{s1} = 1,15 \cdot 1,185 \cdot 65,3 = 89,1 \text{ МПа.}$$

Тоді деформаційним розігрівши в першому проході буде (формула 2.16):

$$\Delta T_{\text{деф1}} = 0,85 \cdot \frac{p_{\text{сер1}}}{c \cdot \rho} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} = 0,85 \cdot \frac{89,1 \cdot 10^6}{683,2 \cdot 7850} \cdot \ln \frac{180}{135} = 4^\circ\text{C.}$$

Знаючи втрати температури при контакті з валками і деформаційний розігрів, можна знайти температуру металу при виході його з кліті після першого проходу:

$$T_{\text{вих1}} = T_{\text{вх1}} - \Delta T_{\text{кв1}} + \Delta T_{\text{деф1}} = 1272 - 5 + 4 = 1271^\circ\text{C}.$$

Після виходу з кліті після першого проходу розкат починає охолоджуватися за рахунок випромінювання, тому так само, як і для першого проходу визначаємо температуру металу перед входом в кліть в другому проході (формула 2.5):

$$T_{\text{вх2}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot \tau_{\text{охл2}}}{h_1}\right) + \left(\frac{1000}{T_{\text{м1}} + 273}\right)^3}} - 273$$

де  $\tau_{\text{охл2}}$  - час охолодження металу перед другим проходом, с.

Час охолодження розкату буде дорівнювати

$$\tau_{\text{охл2}} = \tau_{\text{вих1}} + \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{вх2}}$$

де  $\tau_{\text{вих1}}$  - час виходу штаби з кліті в першому проході, с;

$\tau_{\text{п}}$  - час паузи, с;

$\tau_{\text{вх2}}$  - час входу штаби в кліть при другому проході, с.

$$\tau_{\text{охл2}} = \frac{l_1/2}{v_1} + \tau_{\text{п}} + \frac{l_2/2}{v_2}$$

Час паузи приймаємо  $\tau_{\text{п}} = 3$  с.

Тоді

$$\tau_{\text{охл2}} = \frac{6,472/2}{2,3} + 3 + \frac{8,954/2}{2,4} = 6,3 \text{ с.}$$

Температура металу перед другим проходом

$$T_{\text{вх2}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot 6,3}{135}\right) + \left(\frac{1000}{1271 + 273}\right)^3}} - 273 = 1267^\circ\text{C}.$$

Далі аналогічно визначаємо втрату температури при контакті з валками, деформаційний розігрів і, відповідно, температуру металу при виході з кліті після другого проходу. Для решти всіх проходів розрахунок проводиться аналогічним чином.

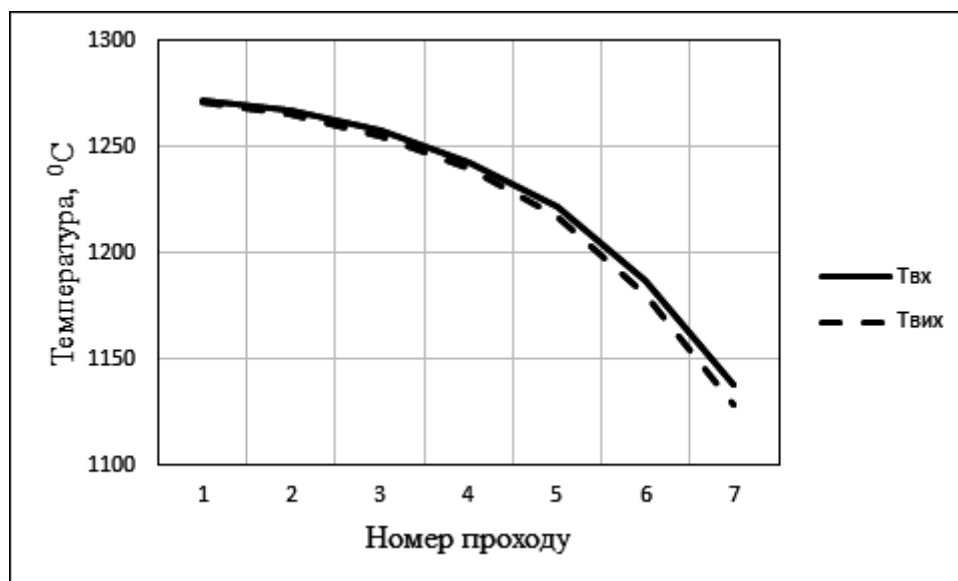
Всі результати розрахунку зведені в таблицю 2.1.

**Таблиця 2.1** – Результати розрахунку температури металу по проходам при реверсивному прокатуванні

Номер проходу	Температура металу перед входом в кліть, $T_{вх}$ , °С	Падіння температури при контакті с валками, $\Delta T_{кв}$ , °С	Деформаційний розігрів, $\Delta T_{деф}$ , °С	Температура металу на виході з кліті, $T_{вих}$ , °С
1	1272	5	4	1271
2	1267	7	5	1265
3	1258	8	5	1255
4	1243	10	6	1240
5	1222	12	7	1217
6	1187	15	8	1180
7	1138	15	5	1128

Таким чином, температура кінця прокатки складає 1128 °С.

Побудувати графіки залежності температур  $T_{вх}$  і  $T_{вих}$  від номера проходу (рис. 2.1).



**Рисунок 2.1** - Залежність температури металу перед входом в кліть ( $T_{вх}$ ) і на виході з кліті ( $T_{вих}$ ) від номера проходу

Варіанти вихідних даних для виконання завдання № 2 наведені в таблицях 1.2, 2.2 і 2.3.

## 2.4 Варіанти індивідуальних завдань № 2

Таблиця 2.2 – Розрахункові коефіцієнти до формули (2.38) [5]

Номер варіанту	Марка сталі	$k$	$\sigma_0$ , МПа	$a$	$b$	$c$
1	10	0,934	87,6	0,125	0,266	-2,46
2	40X	0,979	87,5	0,130	0,170	-3,62
3	15Г	0,842	103,0	0,126	0,188	-2,74
4	45	1,000	87,4	0,143	0,173	-3,05
5	20X13	0,900	136,0	0,132	0,210	-3,26
6	60С2	0,921	105,0	0,153	0,197	-3,46
7	40ХН	0,935	88,5	0,134	0,234	-3,47
8	35ГС	0,975	89,6	0,136	0,187	-2,79
9	5сп	0,917	89,5	0,144	0,208	-3,35
10	У10А	0,995	80,5	0,163	0,194	-3,57
11	ШХ15	1,010	79,6	0,137	0,220	-4,07
12	Х17Н2	0,866	126,0	0,130	0,063	-4,72
13	15Х13	0,950	145,0	0,102	0,125	-3,50
14	15Х25Т	1,028	58,5	0,124	0,052	-3,70
15	30ХГСА	0,996	92,4	0,134	0,250	-3,34
16	3сп	0,960	90,7	0,124	0,167	-2,54
17	15ХСНД	0,880	93,2	0,122	0,226	-2,90
18	20ХГ2С	1,011	95,8	0,125	0,213	-3,65
19	У7А	0,948	78,3	0,159	0,197	-2,87
20	38ХМЮА	1,016	100,0	0,114	0,273	-3,72

**Таблиця 2.3** – Варіанти завдань для розрахунку змінення температури металу при реверсивному прокатуванні

№ варіанту	Марка сталі	D <sub>в</sub> , мм	Матеріал валків	T <sub>о</sub> , °C	Відстань від печі до кліті, L, м	Швидкість транспортування, $\vartheta_{тр}$ , м/с	$\vartheta_1$ , м/с	$\vartheta_2$ , м/с	$\vartheta_3$ , м/с	$\vartheta_4$ , м/с	$\vartheta_5$ , м/с	$\vartheta_6$ , м/с	$\vartheta_7$ , м/с
1	10	950	сталь	1255	35	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,3
2	40X	850	чавун	1270	28	1,7	2,1	2,4	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3
3	15Г	1000	сталь	1260	33	1,7	2,0	2,2	2,5	2,8	2,9	3,1	3,2
4	45	800	чавун	1250	40	1,7	1,9	2,2	2,5	2,8	3,0	3,1	3,4
5	20X13	900	сталь	1240	25	1,7	2,0	2,4	2,4	2,7	2,8	3,0	3,2
6	60С2	930	сталь	1245	31	1,7	1,8	1,9	2,1	2,3	2,5	2,8	2,9
7	40ХН	1050	сталь	1250	27	1,7	1,9	2,1	2,5	2,6	2,8	3,1	3,3
8	35ГС	800	чавун	1230	37	1,7	2,1	2,1	2,4	2,5	2,8	2,9	3,0
9	5сп	950	сталь	1270	30	1,7	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	3,4	3,6
10	У10А	900	сталь	1190	25	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,4	2,7	2,9
11	ШХ15	1000	сталь	1170	29	1,7	1,9	2,2	2,3	2,5	2,8	3,1	3,4
12	X17Н2	1200	сталь	1180	26	1,7	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4
13	15X13	800	чавун	1240	40	1,7	2,0	2,2	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5
14	15X25Т	930	сталь	1200	36	1,7	1,9	2,1	2,5	2,9	3,0	3,2	3,5
15	30ХГСА	850	чавун	1250	34	1,7	2,1	2,4	2,7	2,8	3,0	3,3	3,6
16	3сп	800	чавун	1280	45	1,7	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,3	3,5
17	15ХСНД	800	чавун	1230	32	1,7	1,9	2,0	2,1	2,4	2,6	2,8	2,9
18	20ХГ2С	950	сталь	1260	43	1,7	2,1	2,2	2,5	2,8	2,9	3,0	3,2
19	У7А	850	чавун	1200	40	1,7	1,9	2,1	2,5	2,7	2,8	3,0	3,3
20	38ХМЮА	1000	сталь	1250	31	1,7	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3

### 3 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ ПРОКАТУВАННІ ШТАБИ

#### (Завдання № 3)

#### 3.1 Теоретичний вступ

Випередження в розрахунках процесу прокатки визначають по формулі Екелунда [1]

$$S_{h1} = \frac{\gamma^2}{2} \cdot \left( \frac{D_B}{h_1} - 1 \right) \quad (3.1)$$

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

$D_B$  - діаметр валків, мм.

Для знаходження нейтрального кута можна скористатися формулою Екелунда - Павлова [1]

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\alpha}{2 \cdot \mu} \right) \quad (3.2)$$

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

$$\mu = \arctan f \quad (3.3)$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя.

Коефіцієнт тертя розраховується за формулою Бахтинова-Штернова [4, 6]

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_{ВХ}) \quad (3.4)$$

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

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

$k_3$  - коефіцієнт, що характеризує марку сталі;

$T_{ВХ}$  - температура металу в даному проході, °С.

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 знаходиться по формулі

$$k_2 = 1,67 \cdot v_1^{-0,25} - 0,4 \quad (3.5)$$

При швидкостях прокатки менш ніж 2 м/с коефіцієнт  $k_2 = 1$ ; при швидкостях більш ніж 20 м/с коефіцієнт  $k_2 = 0,4$ .

Коефіцієнт, що характеризує марку сталі

$$k_3 = 0,97926 + [C] \cdot (0,0031 \cdot [Ni] + 0,00175 \cdot [W]) + 0,02457 \cdot [Mn] + 0,02144 \cdot [Cr] + 0,001 \cdot [Mo] \quad (3.6)$$

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

Для вуглецевих сталей коефіцієнт  $k_3$  дорівнює 1.



До енергосилових параметрів прокатки відносяться сила, момент, потужність і робота прокатки.

Правильне визначення сили прокатки необхідне для проведення розрахунків устаткування робочої лінії стана на міцність і вибору оптимального технологічного режиму гарячої або холодної прокатки. Силу прокатки можна визначити вимірюванням за допомогою приладів або по формулі

$$P = p_{\text{сер}} \cdot F_{\text{к}} \quad (3.7)$$

де  $P$  - сила прокатки в даному проході, МН;

$p_{\text{сер}}$  - середній тиск металу на валки в осередку деформування, МПа;

$F_{\text{к}}$  - горизонтальна проекція поверхні контакту металу з валками (контактна площа), м<sup>2</sup>.

При прокатуванні штаб прямокутного перетину в циліндрових валках визначення контактної площі не представляє утруднень. В цьому випадку форма поверхні контакту в плані може бути прийнята за трапецію з основами  $b_0$  і  $b_1$  і висотою  $l_{\text{д}}$ . Отже, площа контактної поверхні визначається по формулі

$$F_{\text{к}} = 0,5 \cdot (b_0 + b_1) \cdot l_{\text{д}} = b_{\text{сер}} \cdot l_{\text{д}} \quad (3.8)$$

де  $b_{\text{сер}}$  - середня ширина штаби в осередку деформування, мм.

При прокатуванні у валках метал створює внутрішній опір деформації. Напруження, яке виникає між металом і валком, повинно подолати цей внутрішній опір металу і змусити метал змінити свою форму. Сила в зоні контакту металу з валками, віднесена до одиниці площі поверхні цього контакту, називається середнім нормальним контактним напруженням, яке може бути визначене по формулі

$$p_{\text{сер}} = 1,15 \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_s \quad (3.9)$$

де  $n_{\sigma}$  – коефіцієнт, що враховує вплив напруженого стана в осередку деформування;

$\sigma_s$  – опір металу пластичній деформації, МПа.

Опір металу деформації можна знайти по формулі [5]

$$\sigma_s = k \cdot \sigma_0 \cdot \xi^a \cdot (10 \cdot \varepsilon)^b \cdot (T_{\text{вх}}/1000)^c \quad (3.10)$$

де  $k, a, b, c$  - коефіцієнти для конкретної марки сталі, які визначаються по таблиці 2.2 завдання № 2.

$\sigma_0$  - базовий опір металу деформації, який отримано методом розтягнення при стандартних умовах:  $\varepsilon = 10\%$ ;  $\xi = 1\text{с}^{-1}$ ;  $T = 1000^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\text{вх}}$  – температура металу при входе в клеть (см. формулу 2.5);

$\xi$  - швидкість деформації,  $\text{с}^{-1}$ , яка визначається по формулі

$$\xi = v_1 \cdot \varepsilon_h / l_{\text{д}} \quad (3.11)$$

Момент прокатки, тобто момент, що крутить, який необхідно прикласти до валків, щоб забезпечити їх обертання в процесі прокатки, зазвичай визначають, виходячи з сили прокатки по формулі

$$M_{\text{пр}} = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot l_{\text{д}} \quad (3.12)$$

де  $M_{\text{пр}}$  – момент прокатки, МН·м;

$\psi$  – коефіцієнт, що показує яку частину від довжини осередку деформування складає плече рівнодіючої сили, який визначається по формулі Бровмана

$$\psi = 0,5 - 0,1 \cdot \varepsilon_h \quad (3.13)$$

Якщо відома величина моментів, що крутять, то визначення потужності і роботи прокатки не представляє утруднень. Потужність прокатки розраховується по формулі [3]

$$N_{\text{пр}} = M_{\text{пр}} \cdot \vartheta_{\text{в}} / R_{\text{в}} \quad (3.14)$$

де  $N_{\text{пр}}$  – потужність прокатки, МВт.

Колова швидкість обертання валків знаходиться по формулі (1.27)

$$\vartheta_{\text{в}} = \vartheta_1 / (1 + S_{h1}) \quad (3.15)$$

Робота прокатки розраховується по формулі [3]

$$A_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{пр}} \cdot l_1}{(1 + S_{h1}) \cdot R_{\text{в}}} \quad (3.16)$$

де  $A_{\text{пр}}$  – робота прокатки, МДж.

### **3.2 Завдання на виконання розрахунку енергосилових параметрів прокатки**

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

Як приклад нижче приведений розрахунок енергосилових параметрів прокатки заготовки із сталі 3сп 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 відповідно  $\Delta h_1 \dots \Delta h_7 = 45, 40, 25, 20, 15, 10, 5$  мм. При цьому розширення в кожному проході складало  $\Delta b_1 \dots \Delta b_7 = 15, 14, 12, 12, 11, 9, 7$  мм відповідно. Прокатка здійснюється на сталевих валках діаметром  $D_{\text{в}} = 930$  мм зі швидкостями  $\vartheta_1 \dots \vartheta_7 = 2,3; 2,4; 2,5; 2,7; 2,9; 3,0; 3,2$  м/с відповідно по проходах. Температура металу по проходах складала  $T_{\text{вх1}} \dots T_{\text{вх7}} = 1272, 1266, 1256, 1242, 1220, 1185, 1136$  °С. Коефіцієнт, що враховує вплив напруженого стану в осередку деформування (у формулі 3.9) на середнє нормальне контактне напруження в кожному проході склав  $1,185; 1,189; 1,209; 1,268; 1,328; 1,379; 1,357$ .

В результаті розрахунку повинні бути визначені:

- сила прокатки в кожному проході;
- момент прокатки в кожному проході;
- потужність прокатки в кожному проході;
- робота прокатки в кожному проході.

### 3.3 Приклад визначення енергосилових параметрів прокатки

Проведемо розрахунок енергосилових параметрів прокатки для першого проходу. Для 2 - 6 проходів розрахунок виконується аналогічно.

Радіус валків кліті

$$R_B = 930/2 = 465 \text{ мм.}$$

Розраховуємо довжину осередку деформування в першому проході (формула 1.18)

$$l_{d1} = \sqrt{R_B \cdot \Delta h_1} = \sqrt{465 \cdot 45} = 144,7 \text{ мм.}$$

Контактна площа в першому проході по формулі (3.8)

$$F_{k1} = 0,5 \cdot (500 + 515) \cdot 144,66 = 73412 \text{ мм}^2.$$

Швидкість деформації в першому проході по формулі (3.11)

$$\xi_1 = \vartheta_1 \cdot \varepsilon_{h1} / l_{d1} = 2,3 \cdot 0,25 / 144,66 \cdot 10^{-3} = 3,97 \text{ с}^{-1}.$$

Для сталі 3сп коефіцієнти Андреюка – Тюленева дорівнюють:  $k = 0,96$ ;  $\sigma_0 = 90,7$  МПа;  $a = 0,124$ ;  $b = 0,167$ ;  $c = -2,54$ . Тому опір металу деформації в першому проході становить (формула 3.10)

$$\sigma_{s1} = K \cdot \sigma_0 \cdot \xi_1^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_{h1})^b \cdot (T_{вх1}/1000)^c,$$

$$\sigma_{s1} = 0,96 \cdot 90,7 \cdot 3,97^{0,124} \cdot (10 \cdot 0,25)^{0,167} \cdot (1272/1000)^{-2,54} = 65,3 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнти рівняння (3.10) для різних марок сталі приведені в таблиці 2.2 завдання № 2.

Отже, тепер можна знайти середнє нормальне контактне напруження (формула 3.9)

$$p_{сep1} = 1,15 \cdot n_{\sigma1} \cdot \sigma_{s1} = 1,15 \cdot 1,185 \cdot 65,3 = 89,06 \text{ МПа.}$$

Сила прокатки в першому проході (формула 3.7)

$$P_1 = p_{сep1} \cdot F_{k1} = 89,06 \cdot 73412 \cdot 10^{-6} = 6,538 \text{ МН.}$$

Для першого проходу коефіцієнт (формула 3.13)

$$\psi_1 = 0,5 - 0,1 \cdot \varepsilon_{h1} = 0,5 - 0,1 \cdot 0,25 = 0,475.$$

Тоді момент прокатки в першому проході складе (формула 3.12)

$$M_{пр1} = 2 \cdot P_1 \cdot \psi_1 \cdot l_{d1} = 2 \cdot 6,538 \cdot 0,475 \cdot 144,7 \cdot 10^{-3} = 0,90 \text{ МН} \cdot \text{м.}$$

Визначимо коефіцієнт тертя  $f$ . Оскільки в нашому випадку прокатка здійснюється на сталевих валках, то коефіцієнт  $k_1 = 1$ .

Коефіцієнт  $k_2$  для першого проходу дорівнює (формула 3.5)

$$k_2 = 1,67 \cdot \vartheta_1^{-0,25} - 0,4 = 1,67 \cdot 2,3^{-0,25} - 0,4 = 0,956.$$

Для вуглецевої сталі (марка 3сп) коефіцієнт  $k_3$  можна прийняти рівним 1. Таким чином, коефіцієнт тертя в першому проході складе (формула 3.4)

$$f_1 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_{\text{вх1}}),$$
$$f_1 = 1 \cdot 0,956 \cdot 1 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot 1272) = 0,40.$$

Кут тертя дорівнює (формула 3.3)

$$\mu_1 = \arctan f_1 = \arctan 0,40 = 21,6^\circ.$$

Кут захвату складе (формула 1.20)

$$\alpha_1 = \arccos \left( 1 - \frac{\Delta h_1}{D_B} \right) = \arccos \left( 1 - \frac{45}{930} \right) = 17,9^\circ.$$

Нейтральний кут складе (формула 3.2)

$$\gamma_1 = \frac{\alpha_1}{2} \cdot \left( 1 - \frac{\alpha_1}{2 \cdot \mu_1} \right) = \frac{17,9}{2} \cdot \left( 1 - \frac{17,9}{2 \cdot 21,6} \right) = 5,2^\circ.$$

Тоді випередження буде дорівнювати (формула 3.1, кут  $\gamma$  береться в радіанах):

$$S_{h1} = \frac{\gamma_1^2}{2} \cdot \left( \frac{D_B}{h_1} - 1 \right) = \frac{5,2^2 / 57,3^2}{2} \cdot \left( \frac{930}{135} - 1 \right) \cdot 100 = 2,5 \ %.$$

Окружна швидкість обертання валків (формула 3.15)

$$\vartheta_{\text{в1}} = \frac{\vartheta_1}{1 + S_{h1}} = \frac{2,3}{1 + 0,025} = 2,24 \text{ м/с.}$$

Потужність прокатки в першому проході (формула 3.14)

$$N_{\text{пр1}} = \frac{M_{\text{пр1}} \cdot \vartheta_{\text{в1}}}{R_B} = \frac{0,90 \cdot 2,24}{465 \cdot 10^{-3}} = 4,34 \text{ МВт.}$$

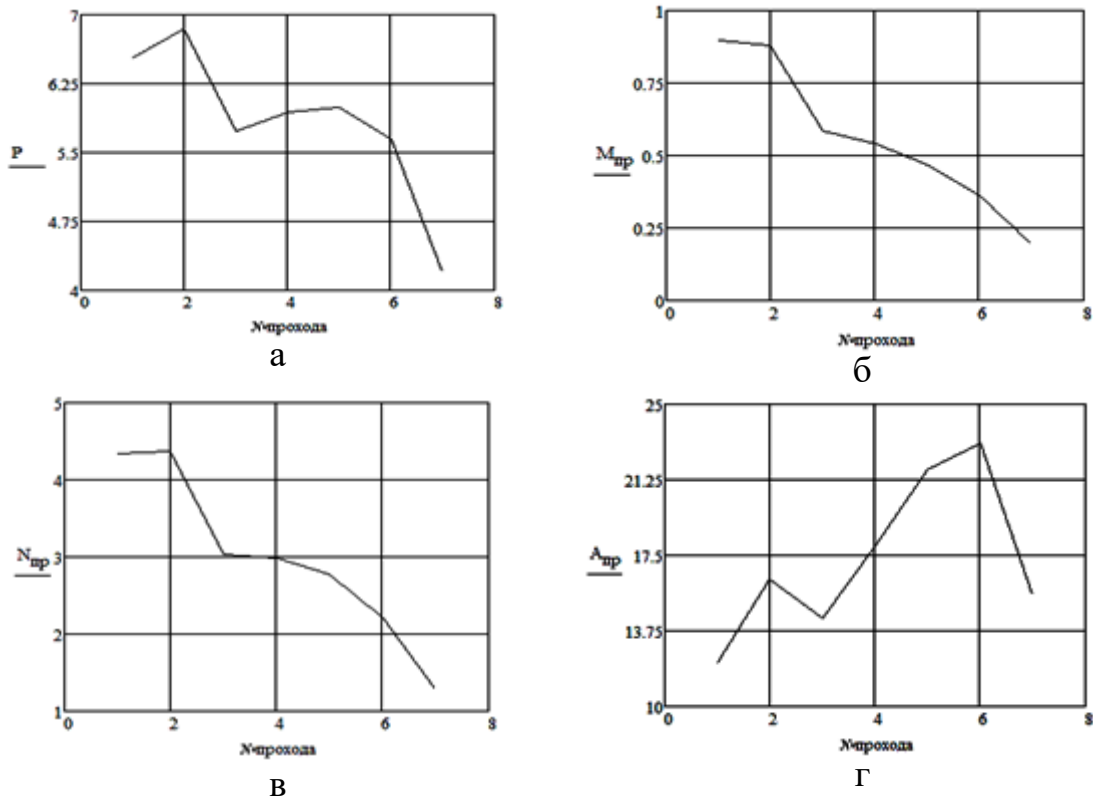
Роботу прокатки розраховуємо по формулі (3.16)

$$A_{\text{пр1}} = \frac{M_{\text{пр1}} \cdot l_1}{(1 + S_{h1}) \cdot R_B} = \frac{0,90 \cdot 6472 \cdot 10^{-3}}{(1 + 0,025) \cdot 465 \cdot 10^{-3}} = 12,21 \text{ МДж.}$$

Для решти проходів в кліті всі енергосилові параметри розраховуються аналогічно. Результати розрахунку зводяться до таблиці 3.1. і будуються графіки залежностей  $P$ ,  $M_{\text{пр}}$ ,  $N_{\text{пр}}$ ,  $A_{\text{пр}}$  від номера проходу (рис. 3.1).

**Таблиця 3.1** - Результати розрахунку енергосилових параметрів при реверсивному прокатуванні штаби по проходам

Номер проходу	Сила прокатки $P$ , МН	Момент прокатки $M_{пр}$ , МН·м	Потужність прокатки $N_{пр}$ , МВт	Робота прокатки $A_{пр}$ , МДж
1	6,538	0,899	4,338	12,206
2	6,844	0,878	4,379	16,338
3	5,735	0,586	3,031	14,405
4	5,938	0,540	2,989	18,015
5	5,992	0,470	2,770	21,774
6	5,645	0,363	2,202	23,059
7	4,213	0,195	1,283	15,556



**Рисунок 3.1** – Залежності сили прокатки  $P$  (а), моменту прокатки  $M_{пр}$  (б), потужності прокатки  $N_{пр}$  (в) і роботи прокатки  $A_{пр}$  (г) від номера проходу

Варіанти вихідних даних для виконання завдання № 3 наведені в таблицях 1.2, 2.2, 2.3 и 3.2.

### 3.4 Варіанти індивідуальних завдань № 3

Таблиця 3.2 – Варіанти завдань для розрахунку енергосилових параметрів при реверсивному прокатуванні штаби по проходам

№ варіанту	$T_{\text{вх1}}$	$T_{\text{вх2}}$	$T_{\text{вх3}}$	$T_{\text{вх4}}$	$T_{\text{вх5}}$	$T_{\text{вх6}}$	$T_{\text{вх7}}$	$n_{\sigma 1}$	$n_{\sigma 2}$	$n_{\sigma 3}$	$n_{\sigma 4}$	$n_{\sigma 5}$	$n_{\sigma 6}$	$n_{\sigma 7}$
1	1244	1239	1232	1223	1211	1195	1177	1,222	1,179	1,182	1,203	1,177	1,209	1,171
2	1260	1254	1247	1237	1225	1209	1190	1,293	1,220	1,175	1,181	1,197	1,198	1,176
3	1251	1246	1240	1232	1220	1204	1184	1,251	1,188	1,180	1,213	1,214	1,214	1,262
4	1234	1227	1218	1207	1192	1175	1152	1,230	1,189	1,175	1,191	1,192	1,234	1,301
5	1232	1228	1223	1216	1205	1189	1170	1,237	1,208	1,177	1,198	1,219	1,224	1,186
6	1236	1231	1224	1214	1201	1183	1162	1,221	1,193	1,172	1,205	1,206	1,207	1,253
7	1240	1232	1223	1211	1197	1180	1162	1,172	1,180	1,201	1,173	1,201	1,242	1,201
8	1221	1217	1212	1205	1194	1180	1161	1,272	1,218	1,182	1,169	1,213	1,192	1,234
9	1259	1253	1246	1238	1228	1216	1202	1,247	1,210	1,246	1,195	1,182	1,177	1,219
10	1183	1179	1172	1163	1151	1136	1119	1,229	1,186	1,162	1,186	1,203	1,203	1,167
11	1164	1161	1156	1148	1138	1124	1108	1,241	1,184	1,180	1,201	1,199	1,196	1,236
12	1171	1164	1156	1146	1133	1116	1095	1,168	1,187	1,216	1,253	1,258	1,323	1,281
13	1229	1226	1221	1215	1206	1195	1180	1,304	1,284	1,208	1,202	1,186	1,175	1,192
14	1189	1182	1174	1164	1153	1139	1125	1,216	1,207	1,178	1,201	1,175	1,223	1,193
15	1237	1231	1224	1215	1205	1193	1178	1,289	1,268	1,208	1,195	1,184	1,181	1,208
16	1266	1261	1255	1247	1238	1226	1213	1,257	1,247	1,249	1,242	1,186	1,198	1,176
17	1217	1209	1200	1187	1170	1149	1123	1,241	1,169	1,186	1,207	1,211	1,264	1,229
18	1249	1245	1239	1232	1224	1214	1202	1,279	1,246	1,236	1,219	1,212	1,171	1,171
19	1189	1184	1178	1171	1162	1151	1136	1,320	1,249	1,253	1,192	1,192	1,167	1,198
20	1242	1237	1232	1226	1217	1206	1194	1,279	1,266	1,197	1,196	1,187	1,186	1,181

## 4 ОСЕРЕДОК ДЕФОРМАЦІЇ

### (Завдання № 4)

#### 4.1 Алгоритм розрахунку характеристик осередку деформації

Алгоритм розрахунку розмірів осередку деформації представляє собою послідовність розрахунку вказаних нижче параметрів [6].

1. Абсолютний обтиск штаби

$$\Delta h = h_0 - h_1.$$

2. Відносний обтиск

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{\Delta h}{h_0}.$$

3. Кут захвату

$$\alpha = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta h}{D}}.$$

4. Довжина дуги захвату

$$l_d = \sqrt{\frac{\Delta h \cdot D}{2}} = \sqrt{\Delta h \cdot R}.$$

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

$$b_1 = b_0 + \Delta b; \Delta b = \frac{0,4 \cdot \Delta h \cdot l_d}{h_0} = 0,4 \cdot \varepsilon \cdot l_d.$$

6. Площа контактної поверхні

$$F_k = 0,5 \cdot l_d \cdot (b_0 + b_1).$$

7. Коефіцієнт витяжки (визначається із умови постійності об'єму)

$$\lambda = \frac{h_0 \cdot b_0}{h_1 \cdot b_1}.$$

8. Довжина штаби після проходу

$$L_1 = \lambda \cdot L_0.$$

9. Коефіцієнт розширення і обтиснення

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

В результаті виконання завдання № 4 повинні бути визначені довжина дуги захвату і кут захвату металу валками в залежності від діаметра валків і величини обтиснення.

## 4.2 Приклад виконання завдання № 4

Визначити вплив обтиснення на довжину осередку деформації і кут захвату при прокатуванні штаби в валках діаметром 300, 600, 900 і 1200 мм, якщо обтиснення приймають наступні значення: 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 і 8,0 мм. Побудувати графіки залежності довжини осередку деформації і кута захвату від обтиснення і діаметра валків.

### Рішення

1. Розраховуємо довжину дуги захвату металу валками за формулою (табл. 4.1)

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

**Таблиця 4.1** – Зміна довжини дуги захвату від обтиснення і діаметра валків

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

2. Розраховуємо кут захвату металу валками за формулою (табл. 4.2)

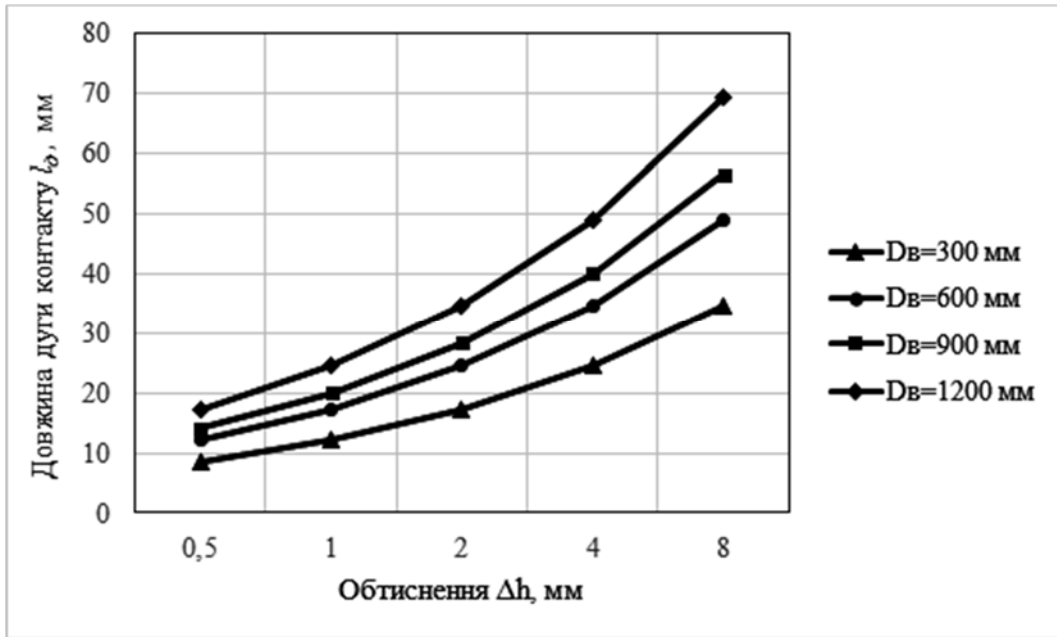
$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}.$$

**Таблиця 4.2** – Зміна кута захвату від обтиснення і діаметра валків

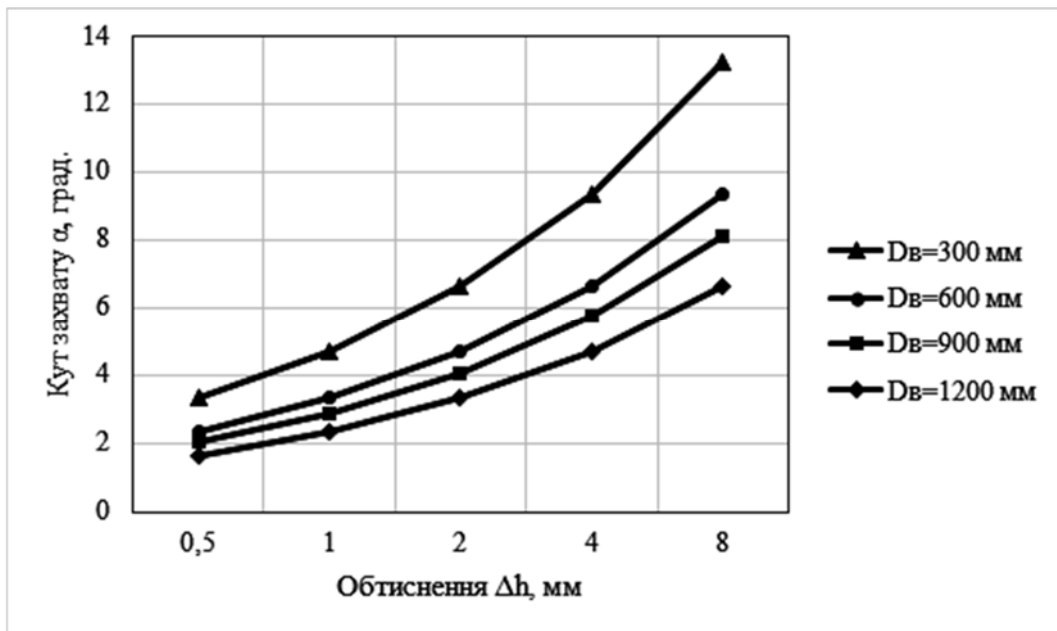
Обтиснення $\Delta h$ , мм	Кут захвату $\alpha$ , град. при діаметрі валків $D_B$			
	$D_B=300$ мм	$D_B=600$ мм	$D_B=900$ мм	$D_B=1200$ мм
0,5	3,31	2,34	2,03	1,65
1	4,68	3,31	2,87	2,34
2	6,62	4,68	4,05	3,31
4	9,36	6,62	5,73	4,68
8	13,23	9,36	8,1	6,62

3. Використовуючи дані таблиць 4.1 і 4.2, будуюмо графіки вказаних залежностей (рис. 4.1 - 4.3).

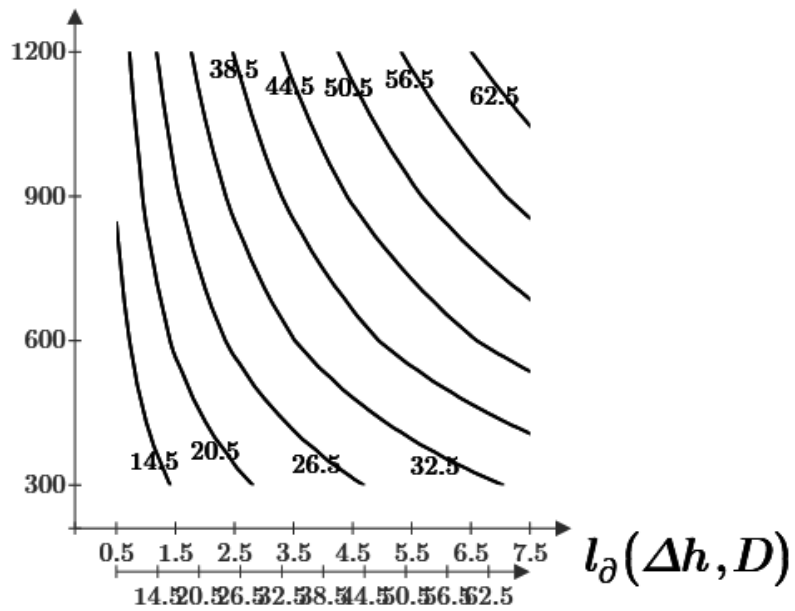




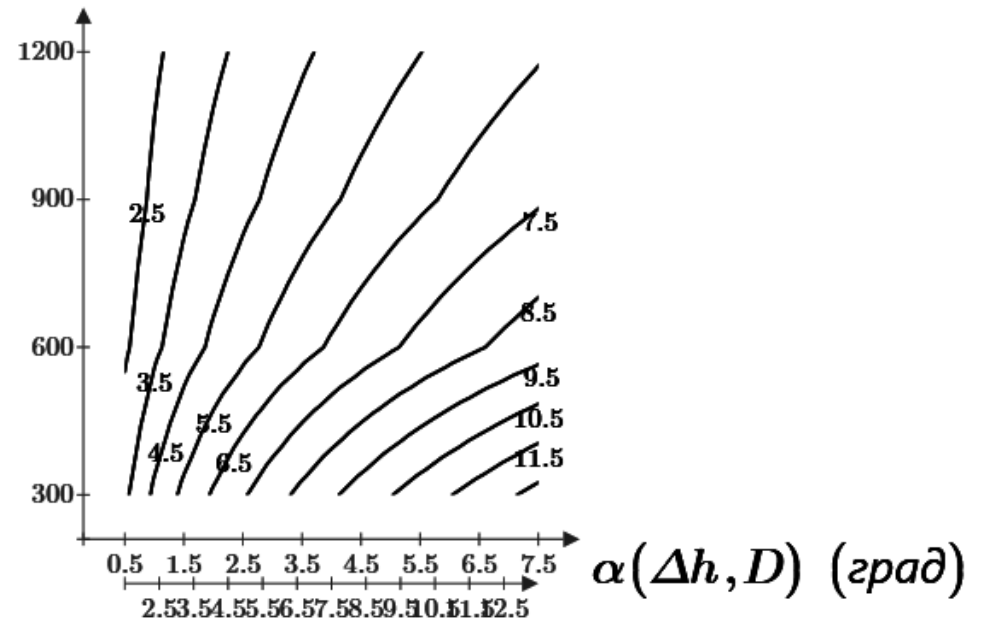
**Рисунок 4.1** - Залежність довжини дуги захвату від обтиснення і діаметра валків



**Рисунок 4.2** - Залежність кута захвату від обтиснення і діаметра валків



а



б

**Рисунок 4.3** - Графіки ліній рівня (контурні графіки) залежності довжини дуги захвату  $l_0$ , мм (а), і кута захвату  $\alpha$ , град. (б) від обтиснення  $\Delta h$ , мм, і діаметра валків  $D$ , мм (вертикальна вісь –  $D$ , горизонтальна вісь –  $\Delta h$ ). Графіки побудовано комп'ютерною програмою Mathcad.

### 4.3 Варіанти індивідуальних завдань № 4

Таблиця 4.3 – Вихідні дані для розрахунку довжини осередку деформації і кута захвату при прокатуванні

№ варіанту	Діаметр валків $D_v$ , мм				Обтиснення $\Delta h$ , мм				
	300	600	800	1200	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00
Приклад	300	600	800	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

## 5 РОЗРАХУНОК ШВИДКОСТЕЙ РУХУ ШТАБИ І ОКРУЖНОЇ ШВИДКОСТІ ВАЛКІВ ПРИ НЕПЕРЕРВНОМУ ПРОКАТУВАННІ

### (Завдання № 5)

#### 5.1 Алгоритм розрахунків при прокатуванні в двоклітьовій групі прокатного стана

1. Визначаємо, або вважаємо заданими, умови контактного тертя і межі текучості металу по клітям стана, тобто значення  $f$ ,  $2K$  заздалегідь відомі [6].
2. Вибираємо режим натягнення по клітям стана: заднє  $\sigma_{01}$ , переднє  $\sigma_{11}$  – натягнення в першій і  $\sigma_{02}$ ,  $\sigma_{12}$  – в другій (останній) клітях, значення яких не повинно перевищувати допустимих відсотків межі текучості штаби.
3. Приймаємо існуючий режим обтиснень: товщину на вході  $h_{01}$  і виході  $h_{11}$  в першій і на виході  $h_{12}$  другої кліті, а також швидкість обертання валків  $v_2$  другої (останньої) кліті стана.
4. Визначаємо випередження штаби в валках другої (останньої) кліті стана:

$$S_2 = S_{\text{штаби}}$$

5. Визначаємо швидкість штаби  $v_{\text{штаби}2}$  на виході з другої кліті стана, використовуючи величину випередження  $S_2$ .
6. Розраховуємо постійну (константу) неперервного стана, тобто величину  $C$ .
7. Визначаємо випередження штаби  $S_2$  в валках першої кліті.
8. Використовуючи рівняння постійності секундних об'ємів, визначаємо окружну швидкість обертання валків першої кліті  $v_{\text{валків}1}$ .
9. Розраховуємо швидкість штаби на виході з першої кліті  $v_{\text{штаби}1}$ .

В результаті виконання завдання № 5 визначається:

- швидкість прокатки штаби по клітям неперервного стана (завдання № 5а);
- вплив переднього натягнення штаби на випередження і швидкість виходу штаби з валків (завдання № 5 б).

#### 5.2 Приклад виконання завдання № 5а

З валків кліті № 7 чистової групи клітей широкоштабового стана 2000 гарячої прокатки зі швидкістю 23,1 м/с прокатали штабу товщиною 2,5 мм і шириною 1650 мм. Визначити швидкості прокатки штаби в інших клітях стана якщо відомий режим обтиснень по клітям, мм:  $h_0=25$ ;  $h_1=15,8$ ;  $h_2=10,4$ ;  $h_3=7,0$ ;  $h_4=4,8$ ;  $h_5=3,6$ ;  $h_6=2,9$ . Побудувати графік зміни швидкості прокатки по клітям.

#### *Рішення*

1. Визначаємо постійну неперервного стана:

$$C = v_7 \cdot b_7 \cdot h_7 = 23,1 \cdot 1650 \cdot 2,5 \cdot 10^3 = 95287500 \text{ м/мм}^3.$$

2. Розраховуємо швидкість прокатки в кожній кліті:

$$v_6 = \frac{C}{h_6 \cdot b \cdot 10^3} = \frac{95287500}{2,9 \cdot 1650 \cdot 10^3} = 19,91 \text{ м/с};$$

$$v_5 = \frac{C}{h_5 \cdot b \cdot 10^3} = \frac{95287500}{3,6 \cdot 1650 \cdot 10^3} = 16,04 \text{ м/с};$$

$$v_4 = \frac{C}{h_4 \cdot b \cdot 10^3} = \frac{95287500}{4,8 \cdot 1650 \cdot 10^3} = 12,03 \text{ м/с};$$

$$v_3 = \frac{C}{h_3 \cdot b \cdot 10^3} = \frac{95287500}{7,0 \cdot 1650 \cdot 10^3} = 8,25 \text{ м/с};$$

$$v_2 = \frac{C}{h_2 \cdot b \cdot 10^3} = \frac{95287500}{10,4 \cdot 1650 \cdot 10^3} = 5,55 \text{ м/с};$$

$$v_1 = \frac{C}{h_1 \cdot b \cdot 10^3} = \frac{95287500}{15,8 \cdot 1650 \cdot 10^3} = 3,66 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

3. Будуємо графік зміни швидкості прокатки по клітям (рис. 5.1):

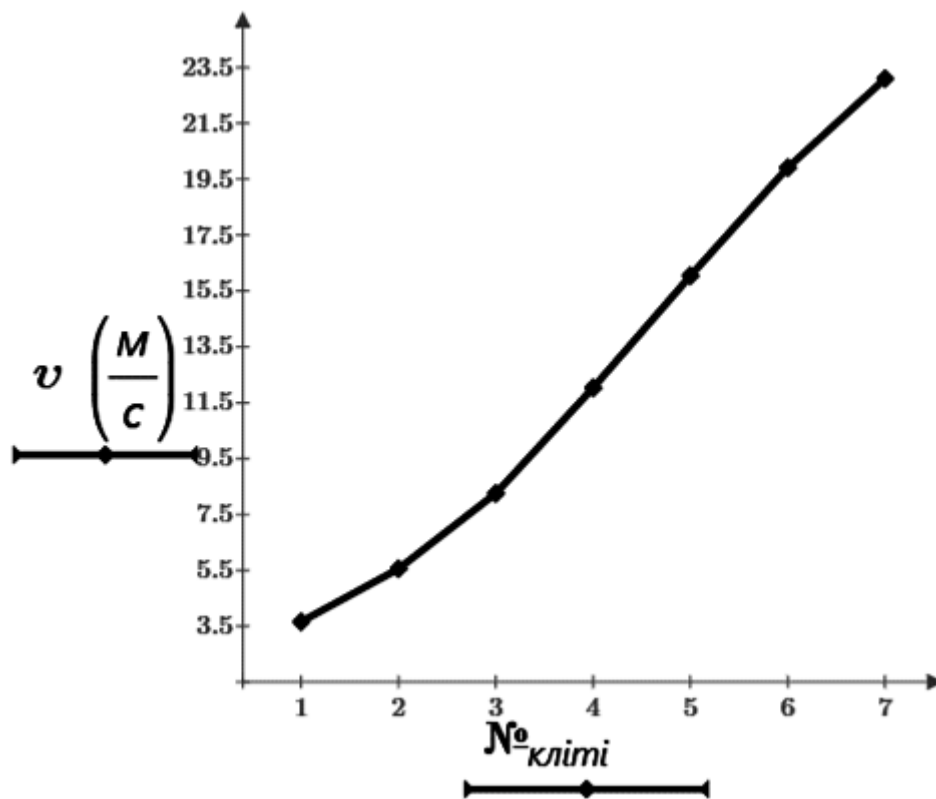


Рисунок 5.1 - Залежність швидкості прокатки по клітям прокатного стана

### 5.3 Варіанти індивідуальних завдань № 5а

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку швидкості прокатки по клітям прокатного стану

Варіант	$h_0$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$h_5$	$h_6$	$h_7$	$b$	$v_7$
Приклад	25,00	15,80	10,40	7,00	4,80	3,60	2,90	2,50	1650	23,1
1	24,95	15,75	10,35	6,95	4,75	3,55	2,85	2,45	1649	23,2
2	24,90	15,70	10,30	6,90	4,70	3,50	2,80	2,40	1648	23,3
3	24,85	15,65	10,25	6,85	4,65	3,45	2,75	2,35	1647	23,4
4	24,80	15,60	10,20	6,80	4,60	3,40	2,70	2,30	1646	23,5
5	24,75	15,55	10,15	6,75	4,55	3,35	2,65	2,25	1645	23,6
6	24,70	15,50	10,10	6,70	4,50	3,30	2,60	2,20	1644	23,7
7	24,65	15,45	10,05	6,65	4,45	3,25	2,55	2,15	1643	23,8
8	24,60	15,40	10,00	6,60	4,40	3,20	2,50	2,10	1642	23,9
9	24,55	15,35	9,95	6,55	4,35	3,15	2,45	2,05	1641	24,0
10	24,50	15,30	9,90	6,50	4,30	3,10	2,40	2,00	1640	24,1
11	24,45	15,25	9,85	6,45	4,25	3,05	2,35	1,95	1639	24,2
12	24,40	15,20	9,80	6,40	4,20	3,00	2,30	1,90	1638	24,3
13	24,35	15,15	9,75	6,35	4,15	2,95	2,25	1,85	1637	24,4
14	24,30	15,10	9,70	6,30	4,10	2,90	2,20	1,80	1636	24,5
15	24,25	15,05	9,65	6,25	4,05	2,85	2,15	1,75	1635	24,6
16	24,20	15,00	9,60	6,20	4,00	2,80	2,10	1,70	1634	24,7
17	24,15	14,95	9,55	6,15	3,95	2,75	2,05	1,65	1633	24,8
18	24,10	14,90	9,50	6,10	3,90	2,70	2,00	1,60	1632	24,9
19	24,05	14,85	9,45	6,05	3,85	2,65	1,95	1,55	1631	25,0
20	24,00	14,80	9,40	6,00	3,80	2,60	1,90	1,50	1630	25,1

## 5.4 Приклад виконання завдання № 5 б

Визначити і побудувати графіки впливу переднього і заднього натягнення на випередження і швидкість виходу переднього кінця штаби з листового стана, який має діаметр робочих валків 520 мм. Товщина штаби до прокатки 2,07 мм, після прокатки 1,8 мм, коефіцієнт контактного тертя  $f=0,05$ , межа текучості штаби після прокатки  $\sigma_{s1} = 375$  МПа, валки обертаються зі швидкістю  $v_B=24$  м/с. Переднє натягнення змінюється і може приймати наступні значення:  $\sigma_1 = 0,05$ ;  $0,1$ ;  $0,15$ ;  $0,20 \cdot \sigma_{s1}$ .

### Рішення

1. Розраховуємо абсолютне обтиснення штаби:

$$\Delta h = h_0 - h_1 = 2,07 - 1,8 = 0,27 \text{ мм.}$$

2. Знаходимо довжину дуги захвату металу валками:

$$l_d = \sqrt{\Delta h \cdot R} = \sqrt{0,27 \cdot 260} = 8,38 \text{ мм.}$$

3. Визначаємо переднє питома натягнення штаби:

$$\sigma_1 = 0,05 \cdot \sigma_{s1} = 0,05 \cdot 375 = 18,75 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_2 = 0,1 \cdot \sigma_{s1} = 0,1 \cdot 375 = 37,5 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_3 = 0,15 \cdot \sigma_{s1} = 0,15 \cdot 375 = 56,25 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_4 = 0,2 \cdot \sigma_{s1} = 0,2 \cdot 375 = 75,0 \text{ МПа.}$$

4. Знаходимо коефіцієнти натягнення заднього та переднього кінців штаби:

$$2 \cdot K_1 = 1,155 \cdot \sigma_{s1} = 1,155 \cdot 375 = 418,125 \text{ МПа;}$$

$$\delta = \frac{2 \cdot f \cdot l_d}{\Delta h} = \frac{2 \cdot 0,05 \cdot 8,38}{0,27} = 3,103;$$

$$\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{2K_0} = 1, \text{ оскільки } \sigma_0 = 0;$$

$$\xi_{11} = 1 - \frac{\sigma_1}{2K_1} = 1 - \frac{18,75}{418,125} = 0,955;$$

$$\xi_{12} = 1 - \frac{\sigma_2}{2K_1} = 1 - \frac{37,5}{418,125} = 0,913;$$

$$\xi_{13} = 1 - \frac{\sigma_3}{2K_1} = 1 - \frac{56,25}{418,125} = 0,865;$$

$$\xi_{14} = 1 - \frac{\sigma_4}{2K_1} = 1 - \frac{75,0}{418,125} = 0,821.$$

5. Розраховуємо випередження з урахуванням натягнення:

$$S_{11} = \sqrt[2\delta]{\frac{\xi_0}{\xi_{11}} \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{\delta-1}} - 1 = \sqrt[2 \cdot 3,103]{\frac{1}{0,955} \left(\frac{2,07}{1,8}\right)^{3,103-1}} - 1 = 0,056;$$

$$S_{12} = \sqrt[2\delta]{\frac{\xi_0}{\xi_{12}} \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{\delta-1}} - 1 = \sqrt[2 \cdot 3,103]{\frac{1}{0,913} \left(\frac{2,07}{1,8}\right)^{3,103-1}} - 1 = 0,064;$$

$$S_{13} = \sqrt[2\delta]{\frac{\xi_0}{\xi_{13}} \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{\delta-1}} - 1 = \sqrt[2 \cdot 3,103]{\frac{1}{0,865} \left(\frac{2,07}{1,8}\right)^{3,103-1}} - 1 = 0,073;$$

$$S_{14} = \sqrt[2\delta]{\frac{\xi_0}{\xi_{14}} \left(\frac{h_0}{h_1}\right)^{\delta-1}} - 1 = \sqrt[2 \cdot 3,103]{\frac{1}{0,821} \left(\frac{2,07}{1,8}\right)^{3,103-1}} - 1 = 0,082.$$

6. Визначаємо швидкість виходу штаби  $v_{ш}$  з валків для кожного випадку:

$$v_{ш1} = v_B \cdot (1 + S_{11}) = 24 \cdot (1 + 0,056) = 25,35 \text{ м/с};$$

$$v_{ш2} = v_B \cdot (1 + S_{12}) = 24 \cdot (1 + 0,064) = 25,55 \text{ м/с};$$

$$v_{ш3} = v_B \cdot (1 + S_{13}) = 24 \cdot (1 + 0,073) = 25,76 \text{ м/с};$$

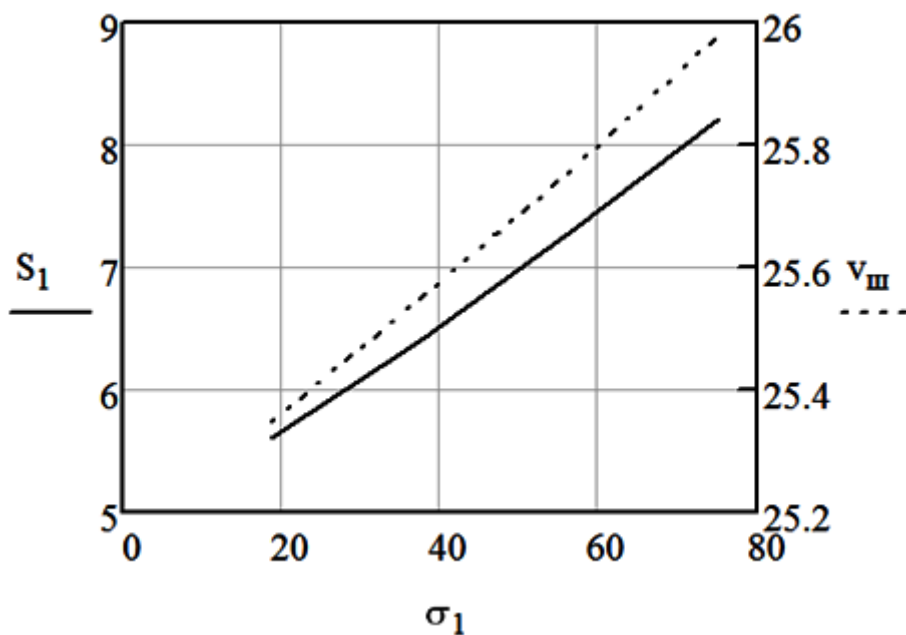
$$v_{ш4} = v_B \cdot (1 + S_{14}) = 24 \cdot (1 + 0,082) = 25,98 \text{ м/с}.$$

7. Будуємо графіки впливу переднього натягнення на випередження і швидкість виходу переднього кінця штаби з валків кліті (рис. 5.2) попередньо занісши необхідні дані до табл. 5.2.

**Таблиця 5.2** – Вплив переднього натягнення на випередження і швидкість виходу штаби з валків

Відношення натягнення до межі текучості	Параметри процесу прокатки		
	натягнення штаби $\sigma_1$ , МПа	випередження $S_1$ , %	швидкість прокатки, $v_{ш}$ , м/с
0,05	18,75	5,6	25,35
0,10	37,5	6,4	25,55
0,15	56,25	7,3	25,76
0,20	75,0	8,2	25,98





**Рисунок 5.2** - Залежність випередження ( $S_1$ ) і швидкості виходу штаби з валків ( $v_{III}$ ) від переднього натягнення  $\sigma_1$ .

### 5.5 Варіанти індивідуальних завдань № 5 б

**Таблиця 5.3** – Вихідні дані для розрахунку переднього і заднього натягнення на випередження і швидкість виходу переднього кінця штаби з листового стану

Варіант	D, мм	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	f	$\sigma_{S1}$ , МПа	v, м/с	Доля $\sigma$ по клетям от $\sigma_{S1}$			
							$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
Приклад	520	2,07	1,80	0,050	375,0	24,0	0,050	0,100	0,150	0,200
1	525	2,08	1,79	0,040	375,5	23,5	0,055	0,105	0,155	0,205
2	530	2,09	1,78	0,039	376,0	23,0	0,060	0,110	0,160	0,210
3	535	2,10	1,77	0,038	376,5	22,5	0,065	0,115	0,165	0,215
4	540	2,11	1,76	0,037	377,0	22,0	0,070	0,120	0,170	0,220
5	545	2,12	1,75	0,036	377,5	21,5	0,075	0,125	0,175	0,225
6	550	2,13	1,74	0,035	378,0	21,0	0,080	0,130	0,180	0,230
7	555	2,14	1,73	0,034	378,5	20,5	0,085	0,135	0,185	0,235
8	560	2,15	1,72	0,033	379,0	20,0	0,090	0,140	0,190	0,240
9	565	2,16	1,71	0,032	379,5	19,5	0,095	0,145	0,195	0,245
10	570	2,17	1,70	0,031	380,0	19,0	0,100	0,150	0,200	0,250
11	575	2,18	1,69	0,030	374,5	18,5	0,105	0,155	0,205	0,255
12	580	2,19	1,68	0,029	374,0	18,0	0,110	0,160	0,210	0,260
13	585	2,20	1,67	0,028	373,5	17,5	0,115	0,165	0,215	0,265
14	590	2,06	1,66	0,027	373,0	17,0	0,120	0,170	0,220	0,270
15	595	2,05	1,65	0,026	372,5	16,5	0,125	0,175	0,225	0,275
16	600	2,04	1,64	0,025	372,0	16,0	0,130	0,180	0,230	0,280
17	515	2,03	1,63	0,040	371,5	15,5	0,135	0,185	0,235	0,285
18	510	2,02	1,62	0,041	371,0	15,0	0,140	0,190	0,240	0,290
19	505	2,01	1,61	0,042	370,5	14,5	0,145	0,195	0,245	0,295
20	500	2,00	1,60	0,043	370,0	14,0	0,150	0,200	0,250	0,300

## 6 НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І РОЗШИРЕННЯ ШТАБИ

(Завдання № 6)

### 6.1 Особливості розрахунку розширення штаби при прокатуванні

Напружений стан штаби при прокатуванні характеризується об'ємною схемою з трьома стискуючими напругами. Схема деформованого стану штаби також є об'ємною і характеризується однією деформацією стискання і двома деформаціями подовження. Однак існують умови прокатки, при яких розширення штаби практично відсутнє. Це відбувається, наприклад, при прокатуванні широких штаб. В таких випадках деформаційний стан штаби є плоским, а схема деформованого стану представляє собою одну деформацію стискання і одну деформацію подовження.

Якщо знати схему напружено-деформованого стану металу при прокатуванні, можна визначити інтенсивність його течії в поздовжньому або в поперечному напрямку. Враховуючи, що інтенсивність поздовжньої течії металу залежить від параметру  $b_0/h_0$ , В.С. Смірновим була запропонована формула для визначення схеми напруженого стану металу при прокатуванні [6]:

- для об'ємної схеми деформації справедлива наступна нерівність:

$$0 < \frac{b}{h} < \frac{0,465}{f};$$

- для схеми плоскої деформації:

$$\frac{b}{h} > \frac{0,465}{f}.$$

В результаті виконання завдання № 6 розраховується:

- мінімально можлива ширина зливка, при якій розширення відсутнє при прокатуванні в чорновій кліті товстолистового стану (завдання № 6а);
- розширення штаби в залежності від обтиснення і діаметра валків (завдання № 6 б).

### 6.2 Приклад виконання завдання № 6а

В чорновій кліті товстолистового стану ТЛС 3600 прокатують листовий злиток із сталі 12ХНДП товщиною 780 мм, нагрітий до 1200°C. Валки сталеві, швидкість прокатки 2,16 м/с. Визначити мінімально можливу ширину зливка, при якій розширення буде практично відсутнє.

## *Рішення*

1. Розраховуємо коефіцієнт контактного тертя при прокатуванні зливка:

$$f = 1,05 - 0,0005 \cdot t - 0,056 \cdot v = 1,05 - 0,0005 \cdot 1200 - 0,056 \cdot 2,16 = 0,329.$$

2. Розширення практично відсутнє при умові плоскодеформованій схемі прокатки, коли виконується нерівність

$$\frac{b}{h} \geq \frac{0,465}{f}.$$

Тоді:

$$b_0 \geq \frac{0,465 \cdot h_0}{f} = \frac{0,465 \cdot 780}{0,329} = 1102 \text{ мм} \approx 1,1 \text{ м}.$$

### 6.3 Варіанти індивідуальних завдань № 6а

**Таблиця 6.1** – Вихідні дані для розрахунку мінімально можливої ширини зливка, при якій розширення буде практично відсутнє

Варіант	$h_0$ , мм	$t$ , °C	$v$ , м/с
Приклад	780	1200	2,16
1	775	1205	2,15
2	770	1210	2,14
3	765	1215	2,13
4	760	1220	2,12
5	755	1225	2,11
6	750	1230	2,10
7	745	1235	2,09
8	740	1240	2,08
9	735	1245	2,07
10	730	1250	2,06
11	725	1195	2,17
12	720	1190	2,18
13	715	1185	2,19
14	710	1180	2,20
15	705	1175	2,21
16	700	1170	2,22
17	695	1165	2,23
18	690	1160	2,24
19	685	1155	2,25
20	680	1150	2,26

## 6.4 Приклад виконання завдання № 6 б

Визначити вплив обтиснення і діаметру валків на розширення при прокатуванні штаби товщиною 100 мм в валках діаметром 300, 700 і 1100 мм, якщо обтиснення приймають наступні значення: 5, 10, 15, 20 і 25 мм. Побудувати графіки залежності розширення від обтиснення та діаметра валків і проаналізувати отриманні результати.

### *Рішення*

Розглянемо випадок, коли  $\Delta h = 5$  мм, а діаметр валків 300 мм.

1. Знаходимо відносне обтиснення штаби:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{5}{100} = 0,05.$$

2. Розраховуємо довжину захвату металу валками:

$$l_d = \sqrt{\frac{\Delta h \cdot D}{2}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 300}{2}} = 27,39 \text{ мм.}$$

3. Визначаємо величину розширення:

$$\Delta b = 0,4 \cdot \varepsilon \cdot l_d = 0,4 \cdot 0,05 \cdot 27,39 = 0,55 \text{ мм.}$$

Для інших випадків прокатки розрахунки виконуються аналогічно.

Результати розрахунку зведені в табл. 6.2 і відображені на рис. 6.1 і 6.2. Контурні графіки на рис. 6.2 побудовано за допомогою програми Mathcad.

**Таблиця 6.2** – Вплив обтиснення і діаметра валків на розширення

Обтиснення $\Delta h$ , мм	Розширення $\Delta b$ , мм, при діаметрі валків $D$ , мм		
	300	700	1100
5	0,55	0,84	1,05
10	1,55	2,37	2,97
15	2,85	4,35	5,45
20	4,38	6,69	8,39
25	6,12	9,35	11,73

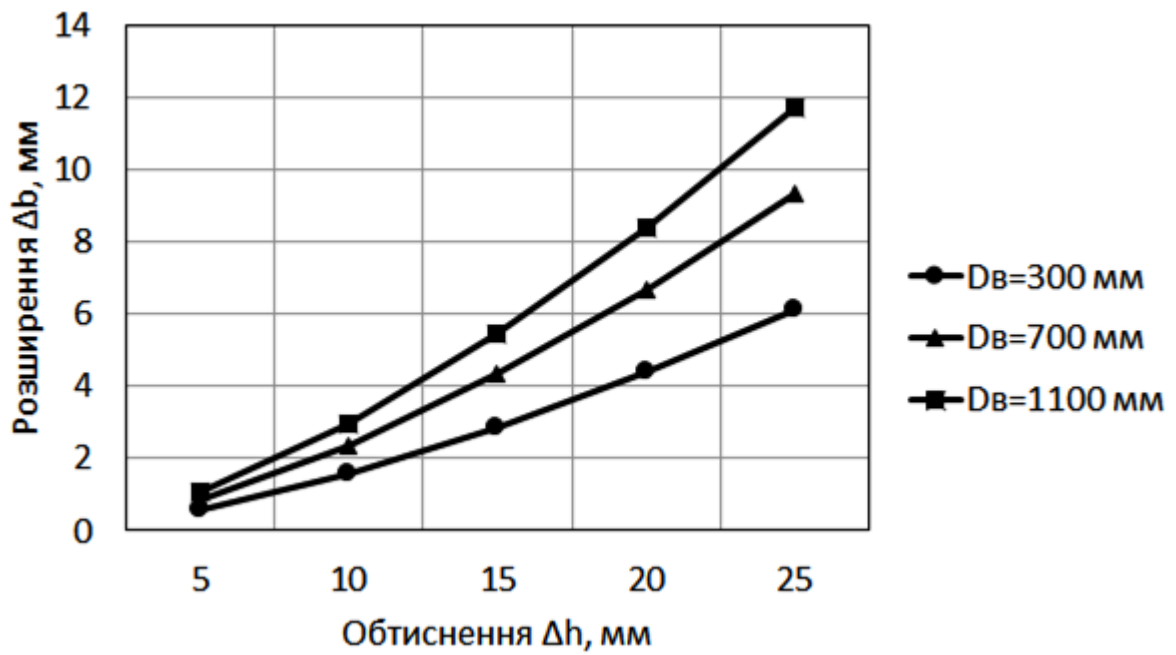


Рисунок 6.1 - Залежність розширення від обтиснення і діаметра валків

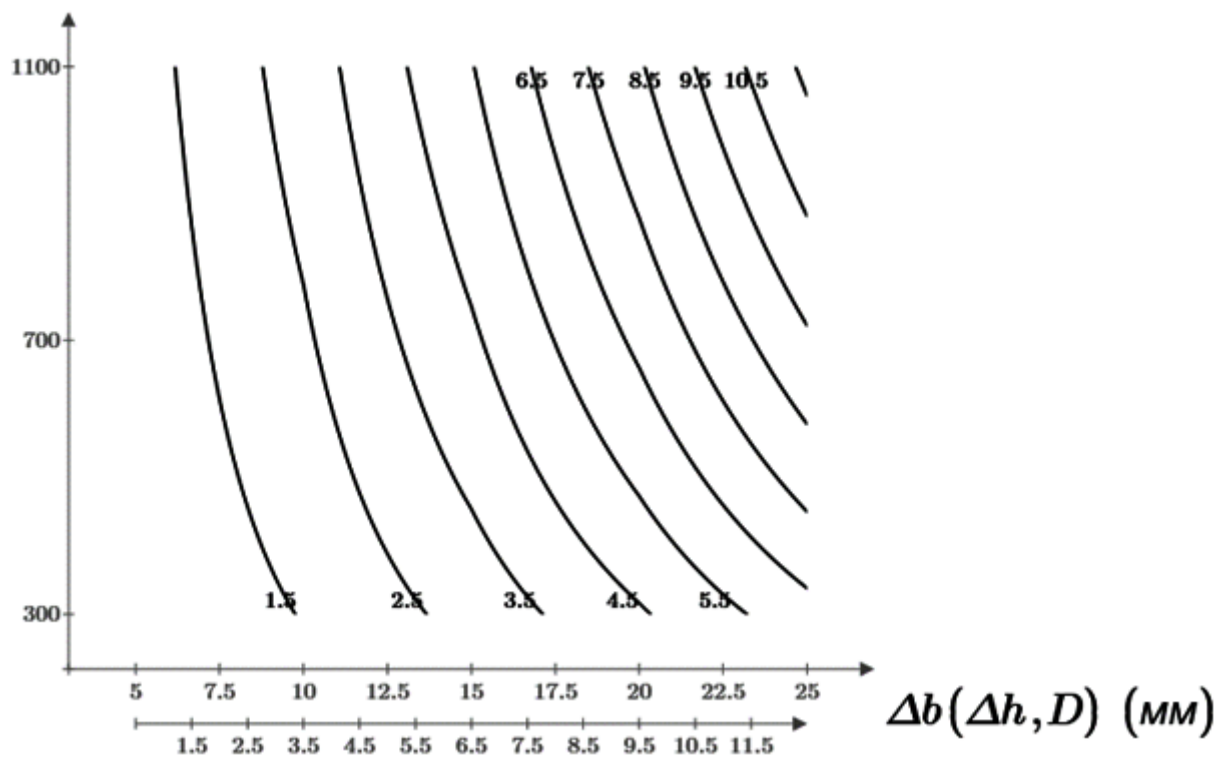


Рисунок 6.2 - Графік ліній рівня (контурний графік) залежності розширення від обтиснення  $\Delta h$ , мм, і діаметра валків  $D$ , мм (вертикальна вісь –  $D$ , горизонтальна вісь –  $\Delta h$ )

## 6.5 Варіанти індивідуальних завдань № 6 б

Таблиця 6.3 - Вихідні дані для розрахунку розширення штаби в залежності від обтиснення і діаметра валків

Варіант	$h_0$ , мм	$D_1$ , мм	$D_2$ , мм	$D_3$ , мм	$\Delta h_1$ , мм	$\Delta h_2$ , мм	$\Delta h_3$ , мм	$\Delta h_4$ , мм	$\Delta h_5$ , мм
Приклад	100	300	700	1100	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0
1	98	298	698	1098	4,9	9,9	14,9	19,9	24,9
2	96	296	696	1096	4,8	9,8	14,8	19,8	24,8
3	94	294	694	1094	4,7	9,7	14,7	19,7	24,7
4	92	292	692	1092	4,6	9,6	14,6	19,6	24,6
5	90	290	690	1090	4,5	9,5	14,5	19,5	24,5
6	88	288	688	1088	4,4	9,4	14,4	19,4	24,4
7	86	286	686	1086	4,3	9,3	14,3	19,3	24,3
8	84	284	684	1084	4,2	9,2	14,2	19,2	24,2
9	82	282	682	1082	4,1	9,1	14,1	19,1	24,1
10	80	280	680	1080	4,0	9,0	14,0	19,0	24,0
11	78	278	678	1078	3,9	8,9	13,9	18,9	23,9
12	76	276	676	1076	3,8	8,8	13,8	18,8	23,8
13	74	274	674	1074	3,7	8,7	13,7	18,7	23,7
14	72	272	672	1072	3,6	8,6	13,6	18,6	23,6
15	70	270	670	1070	3,5	8,5	13,5	18,5	23,5
16	68	268	668	1068	3,4	8,4	13,4	18,4	23,4
17	66	266	666	1066	3,3	8,3	13,3	18,3	23,3
18	64	264	664	1064	3,2	8,2	13,2	18,2	23,2
19	62	262	662	1062	3,1	8,1	13,1	18,1	23,1
20	60	260	660	1060	3,0	8,0	13,0	18,0	23,0

## 7 ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ ПРОКАТКИ

### (Завдання № 7)

#### 7.1 Методика розрахунку зусилля і моменту прокатки

В загальному випадку зусилля прокатки  $F$  визначається рівнянням [6, 7]:

$$F = p_{cp} \cdot A \quad (7.1)$$

де  $p_{cp}$  – середній контактний тиск;  $A$  – площа контакту металу з валками, значення яких розраховується по формулам:

$$p_{cp} = \sigma_s \cdot n_\xi \cdot n_\sigma; \quad A = b_{cp} \cdot l_d \quad (7.2)$$

Таким чином, для розрахунку зусилля прокатки необхідно визначити опір деформації штаби, площу контакту металу з валками і середній питомий тиск, а потім по формулі (7.1) розрахувати зусилля прокатки.

При гарячому прокатуванні штаб опір деформації залежить від трьох факторів: температури, відносного обтиснення і швидкості деформації. Тому формула для визначення опору деформації при гарячому прокатуванні має наступний вигляд:

$$\sigma_s = A \cdot \varepsilon^B \cdot U^C \cdot e^{-D \cdot t} \quad (7.3)$$

де  $A, B, C, D$  – коефіцієнти, які залежать від марки сталі (табл. 7.1);  $\varepsilon$  – відносне обтиснення;  $U$  – швидкість деформації;  $t$  – температура металу.

**Таблиця 7.1** - Коефіцієнти для визначення опору деформації  $\sigma_s$  металу при гарячому прокатуванні

Марка сталі	Коефіцієнт			
	A	B	C	D
08кп	1225	0,252	0,143	0,0025
Ст3	1274	0,252	0,143	0,0025
45	1303	0,28	0,143	0,0025
09Г2С	1909	0,28	0,143	0,0025
1Х17	2156	0,26	0,117	0,0030
40Х13	4214	0,28	0,087	0,0033
Х18Н9Т	2979	0,278	0,092	0,0031
12Х18Н10Т	3185	0,28	0,087	0,0028

Крім того, для визначення опору деформації для цілого ряду сталей і сплавів можна використовувати регресійні рівняння. В якості прикладу, в табл. 7.2 наведено рівняння, які відповідають умовам прокатки на товстолистових станах:  $\varepsilon = 0,02 - 0,2$ ;  $U = 1 - 25 \text{ с}^{-1}$ ;  $t = 850 - 1200^\circ\text{C}$ . Дані, отримані за допомогою цих рівнянь, дозволяють розрахувати істину межу текучості, яка залежить не тільки від кожного окремо з трьох основних параметрів прокатки, але і від їх спільного впливу.

**Таблиця 7.2** – Рівняння зв'язку опору деформації  $\sigma_s$  з термомеханічними параметрами при гарячому прокатуванні

Марка сталі або сплаву	Рівняння регресії
15X12BMФ	$1283+467\varepsilon+0,9U-1,85t-1338\varepsilon^2+0,00066t^2+5,3\varepsilon U$
X21H14Г3Т	$758+1349\varepsilon+1,2U-1,12t-903\varepsilon^2+0,00043t^2-0,81\varepsilon t$
12ХН3МДА	$464+2151\varepsilon-3U-0,414t-2953\varepsilon^2-0,0734U^2-1,213\varepsilon t+0,00632Ut$
4X5B4Ф2М	$336+1097\varepsilon+3,9U-0,25t-0,74\varepsilon t-0,0029Ut$
10ГН2МФА	$1804+627\varepsilon+4,6U-2,9t-1343,8\varepsilon^2-0,1U^2-0,00118t^2$
48ТС-3-40	$3517-261\varepsilon-1,4U-6,5t+1630,6\varepsilon^2+0,076U^2-0,00304t^2$

При розрахунку середнього контактного тиску необхідно враховувати той факт, що у випадку плоскої деформації (прокатка на листових станах, коли розширення практично відсутнє)  $n_\xi \approx 1,15$ . У тому випадку, коли деформація у напрямку усіх трьох головних вісей (прокатка на блюмінгах і слябінгах),  $n_\xi \approx 1$ .

При прокатуванні блюмів, слябів, заготовок і товстих листів, а також тонких штаб при малих ступенях деформації (гаряча прокатка), коли фактор форми  $l_d/h_{cp} < 1$ , тобто при короткому осередку деформації, суттєвий вплив на величину середнього контактного тиску оказують позаконтактні, у тому числі глибинні зони осередку деформації, які не охоплені пластичною деформацією. Тому коефіцієнт напруженого стана визначається за наступними співвідношеннями:

$$\text{при } \frac{l_d}{h_{cp}} \leq 0,6 \quad n_\sigma = \left( \frac{l_d}{h_{cp}} \right)^{-0,4} ;$$

$$\text{при } 0,6 < \frac{l_d}{h_{cp}} \leq 1 \quad n_\sigma = \left( \frac{l_d}{h_{cp}} \right)^{-0,21} ;$$

$$\text{при } \frac{l_d}{h_{cp}} > 1 \quad n_\sigma = 0,75 + 0,252 \frac{l_d}{h_{cp}}.$$

Крутний момент прокатки визначається для правильного вибору двигуна і параметрів обладнання кліті. Існує декілька методів визначення моменту прокатки. Однак найбільше розповсюдження отримали формули, в яких крутний момент визначають по зусиллю прокатки [6, 7]:

$$M_{np} = F \cdot a_F,$$

де  $a_F$  – плече рівнодіючої сил на контактній поверхні, тобто сили  $F$  відносно лінії центрів валків.

Плече  $a_F$  прийнято визначати в долях довжини осередку деформації, тобто:

$$a_F = \psi \cdot l_d.$$



Величину  $\psi$  називають коефіцієнтом плеча моменту прокатки. Таким чином, для двох робочих валків маємо:

$$M_{\text{пр}} = 2F \cdot \psi \cdot l_d = 2F \cdot \psi \cdot \sqrt{\Delta h \cdot R}.$$

Якщо вважати, що зусилля прокатки  $F = p_{\text{ср}} \cdot l_d \cdot b$  (або контактний тиск  $p_{\text{ср}}$ ) задано, то основна проблема розрахунку крутного моменту зводиться до правильного визначення точки прикладення сили  $F$ , тобто до знаходження коефіцієнта плеча моменту прокатки  $\psi$ . При практичних розрахунках для визначення  $\psi$  використовують емпіричні залежності.

Найбільш відомими залежностями такого виду є рівняння, які отримали В.М. Луговський для умов прокатки товстої штаби:

$$\psi = 0,68 + 0,0018\varepsilon - 0,31 l_d/h_{\text{ср}} \quad \text{при } l_d/h_{\text{ср}} \leq 1,$$

і М.І. Бояршинов для умов прокатки тонких штаб:

$$\psi = 0,4566 - 0,021 l_d/h_{\text{ср}} \quad \text{при } l_d/h_{\text{ср}} > 1.$$

де  $\varepsilon$  – відносне обтиснення, %.

В результаті виконання завдання 7 буде визначено:

- опір деформації для різних обтиснень, температур і швидкостей деформації при прокатуванні штаби (завдання 7а);
- максимальне обтиснення за прохід в кліті при заданому максимально допустимому обтисненні при прокатуванні листа і максимально допустимому моменті прокатки (завдання 7 б).

## 7.2 Приклад виконання завдання № 7а

Побудувати криві деформаційного зміцнення сталі Х21Н14Г3Т, отримані при швидкостях деформації 5, 10, 15 і 20 с<sup>-1</sup>. Температура 850, 950, 1050 і 1150°С, обтиснення 2, 5, 10, 15 і 20 %.

### Рішення

Визначимо опір деформації  $\sigma_s$  для кожного обтиснення, температури і швидкості деформації, використовуючи рівняння регресії для сталі Х21Н14Г3Т

$$\sigma_s = 758 + 1349\varepsilon + 1,2U - 1,12t - 903\varepsilon^2 + 0,00043t^2 - 0,81\varepsilon t.$$

Візьмемо  $t = 850^\circ\text{C}$ ,  $U = 5 \text{ с}^{-1}$  і послідовно розрахуємо  $\sigma_s$  для  $\varepsilon = 0,02, 0,05, 0,1, 0,15$  і  $0,2$ :

$$\sigma_s = 758 + 1349 \cdot 0,02 + 1,2 \cdot 5^{-1,12} \cdot 850 - 903 \cdot 0,02^2 + 0,00043 \cdot 850^2 - 0,81 \cdot 0,02 \cdot 850 = 135,52 \text{ МПа};$$

$$\sigma_s = 758 + 1349 \cdot 0,05 + 1,2 \cdot 5^{-1,12} \cdot 850 - 903 \cdot 0,05^2 + 0,00043 \cdot 850^2 - 0,81 \cdot 0,05 \cdot 850 = 153,44 \text{ МПа};$$

$$\sigma_s = 758 + 1349 \cdot 0,10 + 1,2 \cdot 5^{-1,12} \cdot 850 - 903 \cdot 0,10^2 + 0,00043 \cdot 850^2 - 0,81 \cdot 0,10 \cdot 850 = 179,70 \text{ МПа};$$

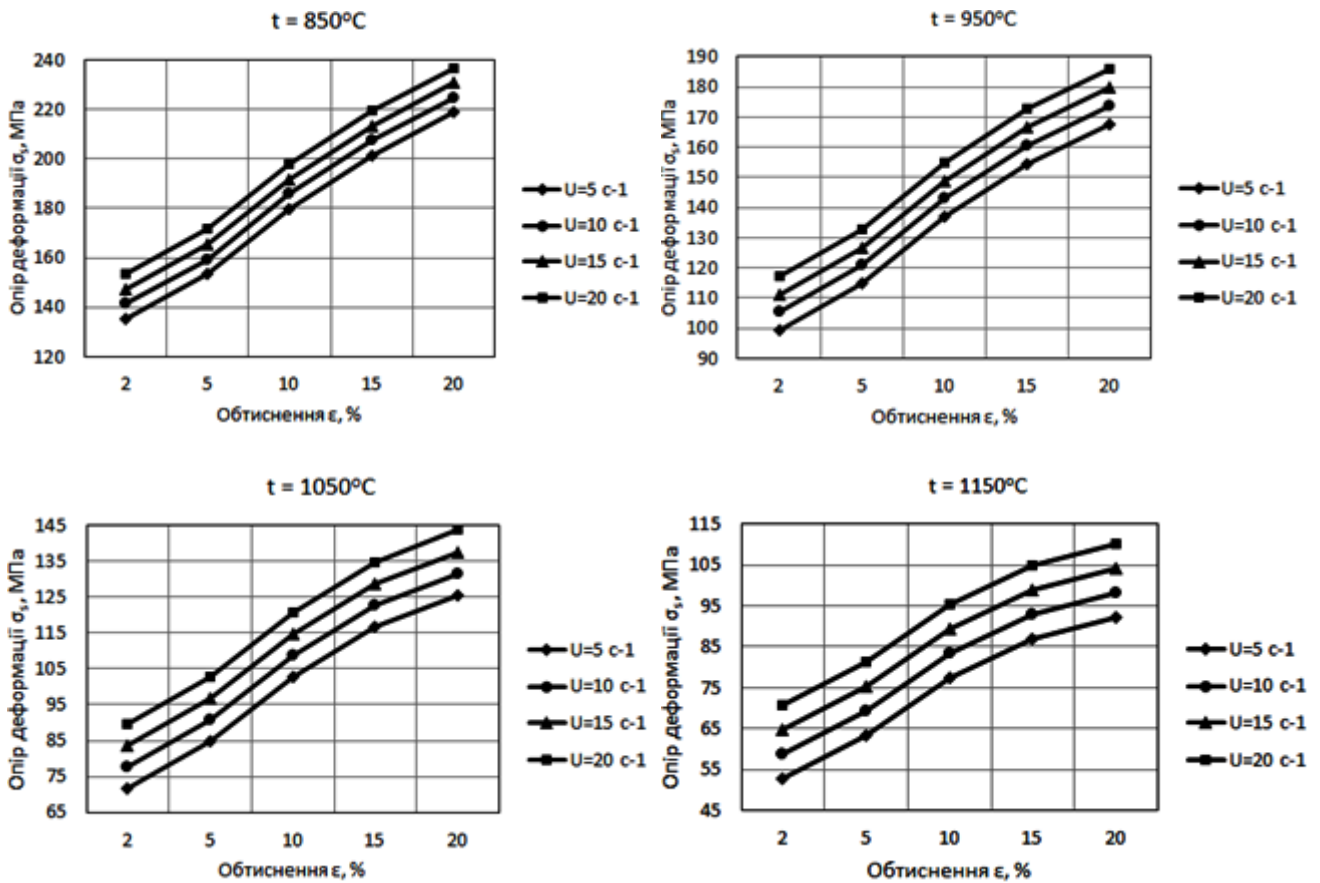
$$\sigma_s = 758 + 1349 \cdot 0,15 + 1,2 \cdot 5^{-1,12} \cdot 850 - 903 \cdot 0,15^2 + 0,00043 \cdot 850^2 - 0,81 \cdot 0,15 \cdot 850 = 201,43 \text{ МПа};$$

$$\sigma_s = 758 + 1349 \cdot 0,20 + 1,2 \cdot 5^{-1,12} \cdot 850 - 903 \cdot 0,20^2 + 0,00043 \cdot 850^2 - 0,81 \cdot 0,20 \cdot 850 = 218,66 \text{ МПа}.$$

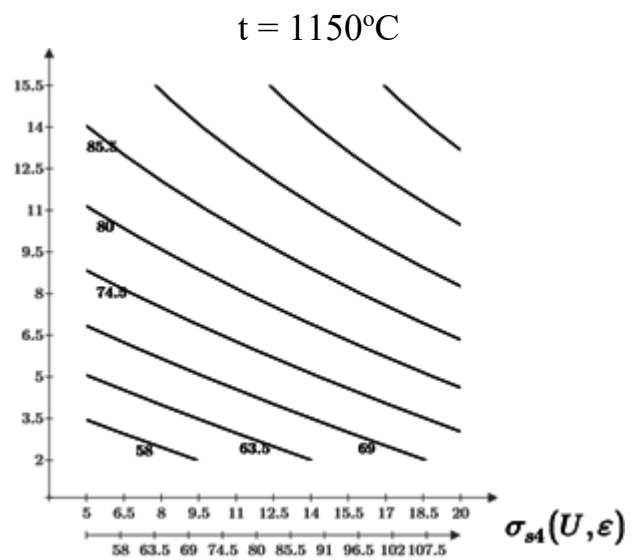
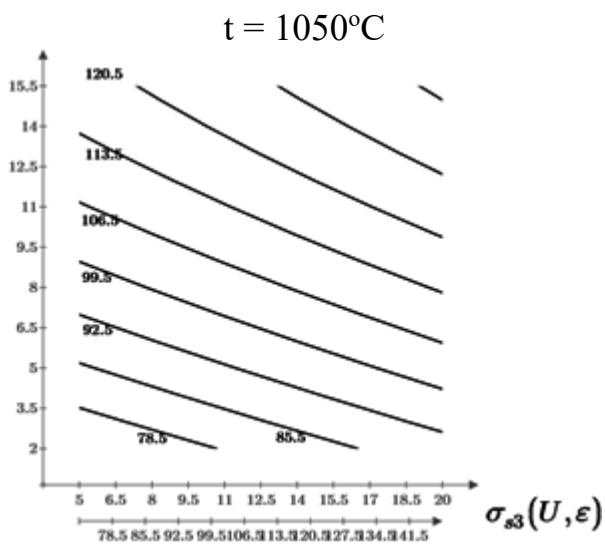
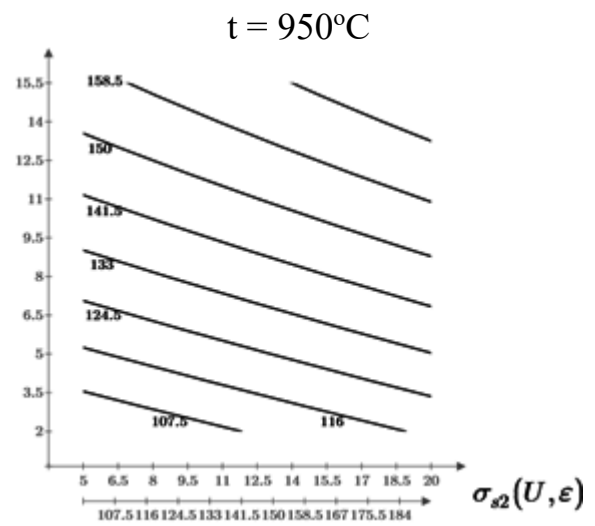
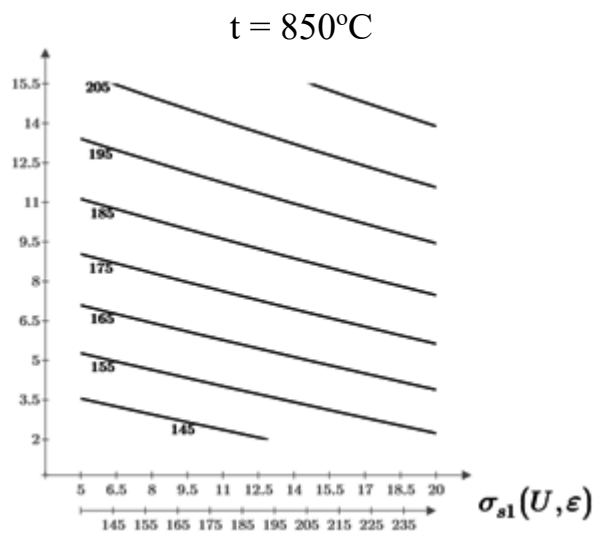
Розрахунок  $\sigma_s$  для решти значень обтиснення, швидкості деформації і температури аналогічний. Отримані результати наведено у табл. 7.3 і на рис. 7.1 і 7.2. Контурні графіки на рис. 7.2 побудовано програмою Mathcad.

**Таблиця 7.3** – Залежність опору деформації  $\sigma_s$  сталі X21H14Г3Т від швидкості деформації, обтиснення і температури

Швидкість деформації $U, \text{c}^{-1}$	Обтиснення $\epsilon, \%$	Опір деформації $\sigma_s$ , МПа при температурі $t, \text{°C}$			
		850	950	1050	1150
5	2	135,52	99,30	71,68	52,66
	5	153,44	114,79	84,74	63,29
	10	179,70	137,00	102,90	77,40
	15	201,43	154,68	116,53	86,98
	20	218,66	167,86	125,66	92,06
10	2	141,52	105,30	77,68	58,66
	5	159,44	120,79	90,74	69,29
	10	185,70	143,00	108,90	83,40
	15	207,43	160,68	122,53	92,98
	20	224,66	173,86	131,66	98,06
15	2	147,52	111,30	83,68	64,66
	5	165,44	126,79	96,74	75,29
	10	191,70	149,00	114,90	89,40
	15	213,43	166,68	128,53	98,98
	20	230,66	179,86	137,66	104,06
20	2	153,52	117,30	89,68	70,66
	5	171,44	132,79	102,74	81,29
	10	197,70	155,00	120,90	95,40
	15	219,43	172,68	134,53	104,98
	20	236,66	185,86	143,66	110,06



**Рисунок 7.1** – Залежність істинної межі текучості  $\sigma_s$  сталі X21N14G3T від обтиснення при різних температурах і швидкостях деформації



**Рисунок 7.2** - Графіки ліній рівня (контурні графіки) залежності істинної межі текучості  $\sigma_s$  сталі X21H14Г3Т від обтиснення і швидкостей деформації при різних температурах (вертикальна вісь – обтиснення  $\epsilon$ , %, горизонтальна вісь – швидкість деформації  $U$ ,  $\text{c}^{-1}$ )

### 7.3 Варіанти індивідуальних завдань № 7а

Таблиця 7.4 - Вихідні дані для розрахунку опору деформації сталі Х21Н14Г3Т в залежності від швидкості деформації, обтиснення і температури

Варіант	Швидкість деформації $U$ , $c^{-1}$				Температура металу $t$ , $^{\circ}C$				Відносне обтиснення $\epsilon$ , %				
	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	$\epsilon_4$	$\epsilon_5$
Приклад	5,0	10,0	15,0	20,0	850	950	1050	1150	2,0	5,0	10,0	15,0	20,0
1	5,1	10,1	15,1	20,1	855	955	1055	1155	2,1	5,2	10,2	15,2	20,2
2	5,2	10,2	15,2	20,2	860	960	1060	1160	2,2	5,4	10,4	15,4	20,4
3	5,3	10,3	15,3	20,3	865	965	1065	1165	2,3	5,6	10,6	15,6	20,6
4	5,4	10,4	15,4	20,4	870	970	1070	1170	2,4	5,8	10,8	15,8	20,8
5	5,5	10,5	15,5	20,5	875	975	1075	1175	2,5	6,0	11,0	16,0	21,0
6	5,6	10,6	15,6	20,6	880	980	1080	1180	2,6	6,2	11,2	16,2	21,2
7	5,7	10,7	15,7	20,7	885	985	1085	1185	2,7	6,4	11,4	16,4	21,4
8	5,8	10,8	15,8	20,8	890	990	1090	1190	2,8	6,6	11,6	16,6	21,6
9	5,9	10,9	15,9	20,9	895	995	1095	1195	2,9	6,8	11,8	16,8	21,8
10	6,0	11,0	16,0	21,0	900	1000	1100	1200	3,0	7,0	12,0	17,0	22,0
11	6,1	11,1	16,1	21,1	905	1005	1105	1205	3,1	7,2	12,2	17,2	22,2
12	6,2	11,2	16,2	21,2	910	1010	1110	1210	3,2	7,4	12,4	17,4	22,4
13	6,3	11,3	16,3	21,3	915	1015	1115	1215	3,3	7,6	12,6	17,6	22,6
14	6,4	11,4	16,4	21,4	920	1020	1120	1220	3,4	7,8	12,8	17,8	22,8
15	6,5	11,5	16,5	21,5	925	1025	1125	1225	3,5	8,0	13,0	18,0	23,0
16	6,6	11,6	16,6	21,6	930	1030	1130	1230	3,6	8,2	13,2	18,2	23,2
17	6,7	11,7	16,7	21,7	935	1035	1135	1235	3,7	8,4	13,4	18,4	23,4
18	6,8	11,8	16,8	21,8	940	1040	1140	1240	3,8	8,6	13,6	18,6	23,6
19	6,9	11,9	16,9	21,9	945	1045	1145	1245	3,9	8,8	13,8	18,8	23,8
20	7,0	12,0	17,0	22,0	949	1049	1149	1250	4,0	9,0	14,0	19,0	24,0

## 7.4 Приклад виконання завдання № 7 б

Визначити максимальне обтиснення за прохід в кліті при прокатуванні листа із сталі 45, якщо допустиме обтиснення прокатки 45 МН, а максимальний момент 4,2 МН·м. Товщина листа на вході в кліть 140 мм, ширина 3200 мм, швидкість прокатки 4,4 м/с. Валки з відбіленого чавуну діаметром 1100 мм. Температура металу 1000°C.

### *Рішення*

Розрахунок максимального обтиснення виконується за схемою, представленою на рис. 7.3.

1. Знаходимо коефіцієнт тертя:

$$f = 0,94 - 0,0005 \cdot t - 0,056 \cdot v = 0,94 - 0,0005 \cdot 1000 - 0,056 \cdot 4,4 = 0,1936.$$

Для захвату металу валками необхідно, щоб кут захвату  $\alpha$  дорівнював, або був менший кута тертя  $\beta$ , тобто  $\alpha \leq \beta$ . Оскільки  $\beta = f$ , то кут захвату при максимальному обтиснення  $\alpha \leq 0,1936$  рад.

2. Визначаємо максимальне обтиснення за прохід:

$$\Delta h_{max} = \frac{D \cdot \alpha^2}{2} = \frac{1100 \cdot 0,1936^2}{2} = 20,615 \text{ мм.}$$

Приймаємо  $\Delta h_{max} = 20$  мм.

3. Визначаємо кут захвату:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta h}{D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20}{1100}} = 0,1907 \text{ рад } (\alpha < \beta).$$

4. Визначаємо товщину листа після проходу:

$$h_1 = h_0 - \Delta h = 140 - 20 = 120 \text{ мм.}$$

5. Визначаємо відносне обтиснення:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{20}{140} = 0,143 = 14,3 \text{ \%}.$$

6. Розраховуємо довжину дуги захвату:

$$l_d = \sqrt{\frac{D \cdot \Delta h}{2}} = \sqrt{\frac{1100 \cdot 20}{2}} = 104,88 \text{ мм.}$$

7. Визначаємо показник форми осередку деформації:

$$\frac{l_d}{h_{cp}} = \frac{2 \cdot l_d}{h_0 + h_1} = \frac{2 \cdot 104,88}{140 + 120} = 0,81.$$

8. Розраховуємо середню швидкість деформації штаби:

$$U = \frac{v \cdot \varepsilon}{l_d} = \frac{4400 \cdot 0,143}{104,88} = 5,99 \text{ с}^{-1}.$$

9. Розраховуємо істину межу текучості листа (формула 7.3, табл. 7.1):

$$\sigma_s = \frac{A \cdot \varepsilon^B \cdot U^C}{e^{D \cdot t_0}} = \frac{1303 \cdot 0,143^{0,28} \cdot 5,99^{0,143}}{2,72^{0,0025 \cdot 1000}} = 80,13 \text{ МПа.}$$

10. Розраховуємо коефіцієнт напруженого стану:

$$n_\sigma = \left( \frac{l_d}{h_{cp}} \right)^{-0,21} = 0,81^{-0,21} = 1,046.$$

11. Розраховуємо середній контактний тиск металу на валки:

$$p_{cp} = 1,15 \cdot \sigma_s \cdot n_\sigma = 1,15 \cdot 80,13 \cdot 1,046 = 96,4 \text{ МПа.}$$

12. Визначаємо зусилля прокатки:

$$F = p_{cp} \cdot b \cdot l_d = 96,4 \cdot 3200 \cdot 104,88 \cdot 10^{-6} = 32,35 \text{ МН } (F < F_{доп}).$$

13. Розраховуємо момент прокатки:

$$\psi = 0,68 + 0,0018\varepsilon - 0,31 l_d/h_{cp} = 0,68 + 0,0018 \cdot 0,143 - 0,31 \cdot 0,81 = 0,43;$$

$$M_{пр} = 2F \cdot \psi \cdot l_d = 2 \cdot 32,35 \cdot 0,43 \cdot 104,88 = 2,919 \text{ МН} \cdot \text{м } (M_{пр} < M_{доп}).$$

Додаткові розрахунки показують, що  $\Delta h=21$  мм не проходить по куту захвату.

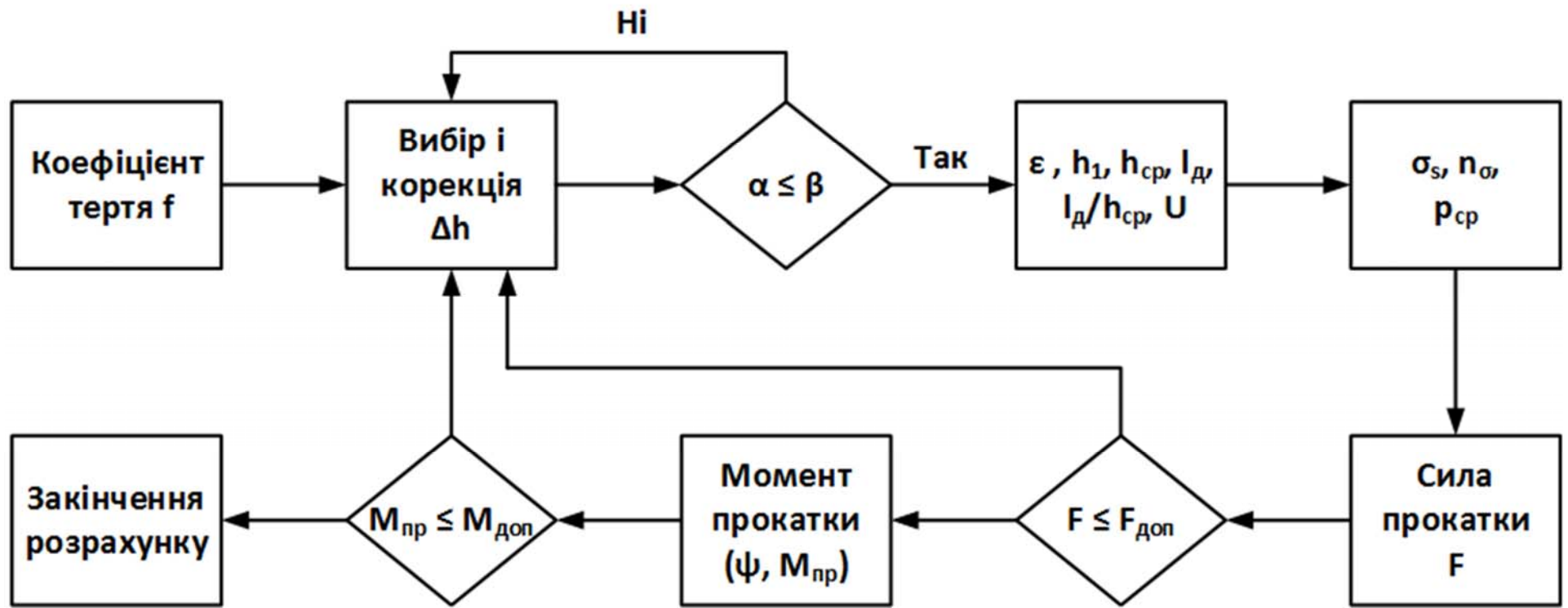


Рисунок 7.3 – Блок – схема розрахунку максимального обтиснення при гарячому прокатуванні



## 7.5 Варіанти індивідуальних завдань № 7 б

Таблиця 7.5 - Вихідні дані для розрахунку максимального обтиснення при гарячому прокатуванні

Варіант	$F_{\text{доп}}$ , МН	$M_{\text{доп}}$ , МН·м	$h_0$ , мм	$b$ , мм	$v$ , м/с	$D$ , мм	$t$ , °С
Приклад	45	4,2	140	3200	4,4	1100	1000
1	44	4,1	145	3150	4,5	1095	1055
2	43	4,0	150	3100	4,6	1090	1060
3	42	3,9	155	3050	4,7	1085	1065
4	41	3,8	160	3000	4,8	1080	1070
5	40	3,7	165	2950	4,9	1075	1075
6	39	3,6	170	2900	5,0	1070	1080
7	38	3,5	175	2850	5,1	1065	1085
8	37	3,4	180	2800	5,2	1060	1090
9	36	3,3	135	2750	5,3	1055	1095
10	35	3,2	130	2700	5,4	1000	1100
11	46	4,3	125	2650	5,5	1005	1105
12	47	4,4	120	2600	5,5	1010	1110
13	48	4,5	115	2550	5,4	1015	1115
14	49	4,6	110	2500	5,8	1020	970
15	50	4,7	105	2450	5,9	1025	965
16	51	4,8	100	2400	6,0	1030	995
17	52	4,9	95	2350	6,1	1035	990
18	53	5,0	90	2300	6,2	1040	985
19	54	5,1	85	2250	6,3	1045	980
20	55	5,2	80	2200	6,4	1050	975

7.6 Програма для розрахунку максимального обтиснення при гарячому прокатуванні (завдання № 7 б) відповідно до блок-схеми на рис. 7.3, розроблена у програмі Mathcad

Варіант №  $j := 0$

---

$s := \text{READEXCEL}(\text{".\Исходные данные задачи 7.xlsx"}, \text{"Лист1!B2:H22"})$

$F_{\text{дон}} := (s^{(0)})_j = 45$        $M_{\text{дон}} := (s^{(1)})_j = 4.2$        $h_0 := (s^{(2)})_j = 140$        $b := (s^{(3)})_j = 3200$

$v := (s^{(4)})_j = 4.4$        $D := (s^{(5)})_j = 1100$        $t := (s^{(6)})_j = 1000$

$Z := \Delta h \leftarrow 0$ while $\Delta h < \Delta h_{max}$ <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr><td><math>\Delta h \leftarrow \Delta h + 0.00001</math></td></tr> <tr><td><math>\alpha \leftarrow \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta h}{D}}</math></td></tr> <tr><td><math>h_1 \leftarrow h_0 - \Delta h</math></td></tr> <tr><td><math>\varepsilon \leftarrow \frac{\Delta h}{h_0}</math></td></tr> <tr><td><math>l_\partial \leftarrow \sqrt{\frac{\Delta h \cdot D}{2}}</math></td></tr> <tr><td><math>U \leftarrow \frac{v \cdot 1000 \varepsilon}{l_\partial}</math></td></tr> <tr><td><math>\sigma_s \leftarrow \frac{1303 \cdot \varepsilon^{0.28} \cdot U^{0.143}}{e^{0.0025 \cdot t}}</math></td></tr> <tr><td><math>n_\sigma \leftarrow \left( \frac{2 \cdot l_\partial}{h_0 + h_1} \right)^{-0.21}</math></td></tr> <tr><td><math>p_{cp} \leftarrow 1.15 \cdot \sigma_s \cdot n_\sigma</math></td></tr> <tr><td><math>F \leftarrow p_{cp} \cdot b \cdot l_\partial \cdot 10^{-6}</math></td></tr> <tr><td><math>\psi \leftarrow 0.68 + 0.0018 \cdot \varepsilon - 0.31 \cdot \frac{2 \cdot l_\partial}{h_0 + h_1}</math></td></tr> <tr><td><math>M_{np} \leftarrow 2 \cdot F \cdot \psi \cdot l_\partial \cdot 10^{-3}</math></td></tr> <tr><td>if <math>F \geq F_{\partial on} \vee M_{np} \geq M_{\partial on}</math></td></tr> <tr><td>       break</td></tr> </table> <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr><td><math>\Delta h</math></td></tr> <tr><td><math>\alpha</math></td></tr> <tr><td><math>h_1</math></td></tr> <tr><td><math>\varepsilon</math></td></tr> <tr><td><math>l_\partial</math></td></tr> <tr><td><math>U</math></td></tr> <tr><td><math>\sigma_s</math></td></tr> <tr><td><math>n_\sigma</math></td></tr> <tr><td><math>p_{cp}</math></td></tr> <tr><td><math>F</math></td></tr> <tr><td><math>\psi</math></td></tr> <tr><td><math>M_{np}</math></td></tr> </table>	$\Delta h \leftarrow \Delta h + 0.00001$	$\alpha \leftarrow \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta h}{D}}$	$h_1 \leftarrow h_0 - \Delta h$	$\varepsilon \leftarrow \frac{\Delta h}{h_0}$	$l_\partial \leftarrow \sqrt{\frac{\Delta h \cdot D}{2}}$	$U \leftarrow \frac{v \cdot 1000 \varepsilon}{l_\partial}$	$\sigma_s \leftarrow \frac{1303 \cdot \varepsilon^{0.28} \cdot U^{0.143}}{e^{0.0025 \cdot t}}$	$n_\sigma \leftarrow \left( \frac{2 \cdot l_\partial}{h_0 + h_1} \right)^{-0.21}$	$p_{cp} \leftarrow 1.15 \cdot \sigma_s \cdot n_\sigma$	$F \leftarrow p_{cp} \cdot b \cdot l_\partial \cdot 10^{-6}$	$\psi \leftarrow 0.68 + 0.0018 \cdot \varepsilon - 0.31 \cdot \frac{2 \cdot l_\partial}{h_0 + h_1}$	$M_{np} \leftarrow 2 \cdot F \cdot \psi \cdot l_\partial \cdot 10^{-3}$	if $F \geq F_{\partial on} \vee M_{np} \geq M_{\partial on}$	break	$\Delta h$	$\alpha$	$h_1$	$\varepsilon$	$l_\partial$	$U$	$\sigma_s$	$n_\sigma$	$p_{cp}$	$F$	$\psi$	$M_{np}$	$Z =$ <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr><td>20</td></tr> <tr><td>0.1907</td></tr> <tr><td>120</td></tr> <tr><td>0.1429</td></tr> <tr><td>104.8809</td></tr> <tr><td>5.9932</td></tr> <tr><td>80.1283</td></tr> <tr><td>1.0461</td></tr> <tr><td>96.3975</td></tr> <tr><td>32.3528</td></tr> <tr><td>0.4302</td></tr> <tr><td>2.9192</td></tr> </table>	20	0.1907	120	0.1429	104.8809	5.9932	80.1283	1.0461	96.3975	32.3528	0.4302	2.9192
$\Delta h \leftarrow \Delta h + 0.00001$																																							
$\alpha \leftarrow \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta h}{D}}$																																							
$h_1 \leftarrow h_0 - \Delta h$																																							
$\varepsilon \leftarrow \frac{\Delta h}{h_0}$																																							
$l_\partial \leftarrow \sqrt{\frac{\Delta h \cdot D}{2}}$																																							
$U \leftarrow \frac{v \cdot 1000 \varepsilon}{l_\partial}$																																							
$\sigma_s \leftarrow \frac{1303 \cdot \varepsilon^{0.28} \cdot U^{0.143}}{e^{0.0025 \cdot t}}$																																							
$n_\sigma \leftarrow \left( \frac{2 \cdot l_\partial}{h_0 + h_1} \right)^{-0.21}$																																							
$p_{cp} \leftarrow 1.15 \cdot \sigma_s \cdot n_\sigma$																																							
$F \leftarrow p_{cp} \cdot b \cdot l_\partial \cdot 10^{-6}$																																							
$\psi \leftarrow 0.68 + 0.0018 \cdot \varepsilon - 0.31 \cdot \frac{2 \cdot l_\partial}{h_0 + h_1}$																																							
$M_{np} \leftarrow 2 \cdot F \cdot \psi \cdot l_\partial \cdot 10^{-3}$																																							
if $F \geq F_{\partial on} \vee M_{np} \geq M_{\partial on}$																																							
break																																							
$\Delta h$																																							
$\alpha$																																							
$h_1$																																							
$\varepsilon$																																							
$l_\partial$																																							
$U$																																							
$\sigma_s$																																							
$n_\sigma$																																							
$p_{cp}$																																							
$F$																																							
$\psi$																																							
$M_{np}$																																							
20																																							
0.1907																																							
120																																							
0.1429																																							
104.8809																																							
5.9932																																							
80.1283																																							
1.0461																																							
96.3975																																							
32.3528																																							
0.4302																																							
2.9192																																							

## 8 РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Николаев, В.А. Теория прокатки полос [Текст] / В.А. Николаев. – Запорожье, ЗГИА, 2014. – 259 с.
2. Бахтинов, В.Б. Технология прокатного производства [Текст] / В.Б. Бахтинов. – М.: Металлургия, 1983. – 488 с.
3. Грудев, А.П. Теория прокатки [Текст] / А.П. Грудев. - М.: Металлургия, 1988. – 240 с.
4. Целиков, А.И. Теория прокатки. Справочник [Текст] / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин и др. - М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
5. Василев, Я.Д. Теория продольной прокатки: Учебник для магистров ВУЗов [Текст] / Я.Д. Василев, А.А. Минаев. – Донецк: УНИТЕХ, 2010. – 456 с.
6. Зобнин, А.Д. Технологические основы проектирования прокатных комплексов: Расчет параметров листовой прокатки: Учеб. пособие [Текст] / А.Д. Зобнин, Н.А. Чиченев, Ю.А. Запарин. - М.: Изд. дом МИСиС, 2009. – 124 с.
7. Машиностроение. Энциклопедия [Текст] / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Машины и агрегаты металлургического производства. Т. IV-5 / Н.В. Пасечник, В.М. Сеницкий, В.Г. Дрозд и др.; Под общ. ред. В.М. Сеницкого, Н.В. Пасечника. 2000. 912 с.