

1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ФОРМОЗМІНЮВАННЯ ПРИ ПОЗДОВЖНОМУ ПРОКАТУВАННІ ШТАБИ

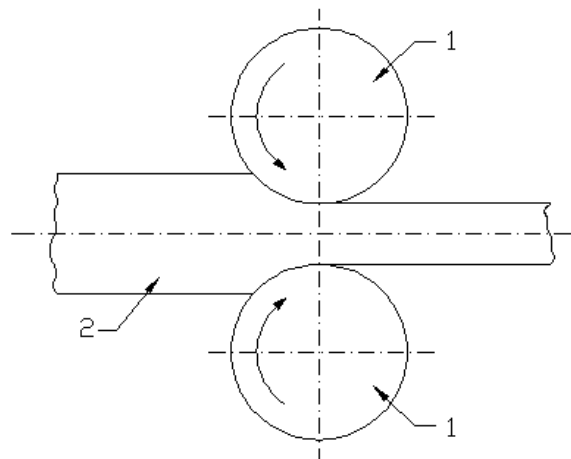
(Завдання № 1)

1.1 Теоретичний вступ

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

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

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



1 – валки; 2 – штаба

Рисунок 1.1 – Схема процесу поздовжньої прокатки

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

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

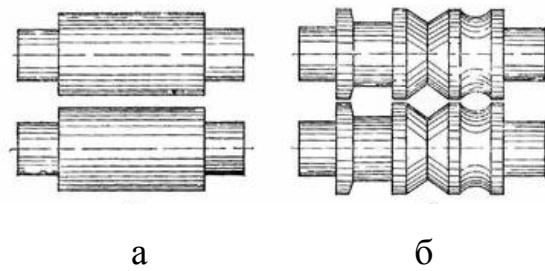
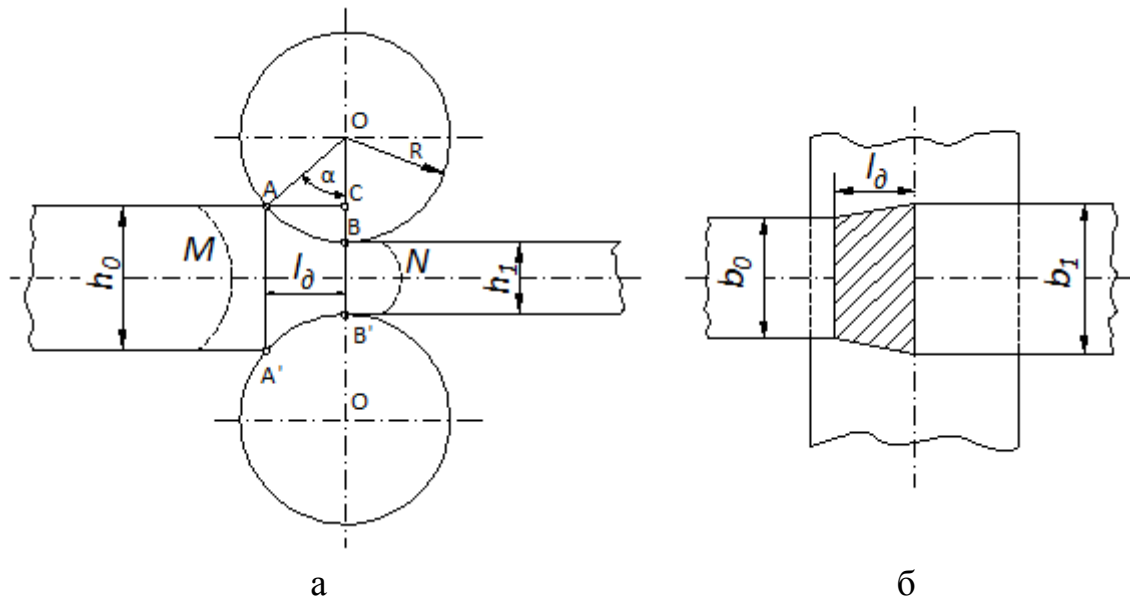


Рисунок 1.2 – Валки с гладкою бочкою (а) і калібровані валки (б)



а – поздовжній перетин; б – поперечний перетин

Рисунок 1.3 – Осередок деформування при прокатуванні

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

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

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

До основних понять, які характеризують осередок деформування, відносяться:

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

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

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

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

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

де Δh - 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 ε_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 δ_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 Δb - 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 ε_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 δ_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 β – 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 Δl - 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 ε_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 δ_l – істинне відносне подовження.

Величини Δl , ε_l і δ_l рідко застосовуються на практиці для характеристики поздовжньої деформації, проте дуже широко використовується показник, який називається коефіцієнтом витягання.

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

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

де λ – коефіцієнт витягання.

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

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

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

l_k – кінцева довжина штаби після прокатки, мм.

Загальний коефіцієнт витягання можна визначити і з іншої формули

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

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

n – число проходів.

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

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

З формули (1.16) отримуємо величину середнього коефіцієнта витягання

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

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

Довжина осередку деформування визначається по формулі

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

де l_d – довжина осередку деформування, мм;

R_B – радіус валків кліті, мм, який дорівнює

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

де D_B – діаметр валків, мм.

Кут контакту визначається по формулі

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

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

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

Тоді маємо

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

де V_0, V_1 - відповідно об'єм штаби до и після проходу в кліті.

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

звідки слідує

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

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

Виходячи з умови сталості об'єму металу можна отримати

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

де F_0, F_1 – відповідно площа поперечного перетину штаби до и після проходу в кліті, мм².

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, мм²;

l_i – поздовжнє переміщення штаби через цей перетин за час τ , мм;

ϑ_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 ϑ_0, ϑ_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.

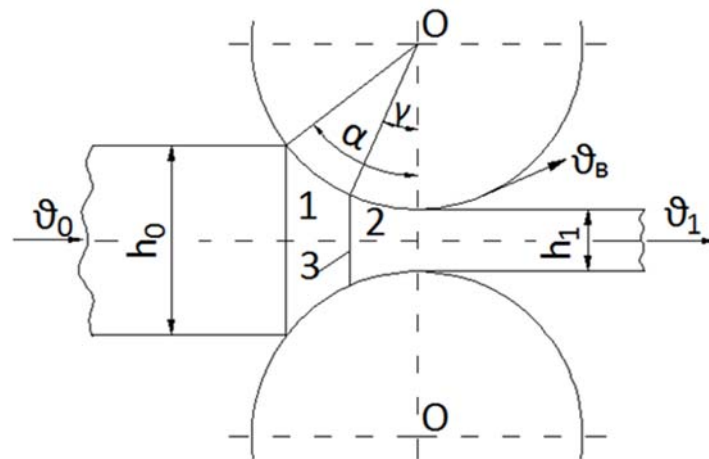
З формули (1.25) отримаємо

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

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 горизонтальної складової окружної швидкості валків. Це пов'язано з тим, що при обтисненні штаби по висоті деяка кількість металу видавлюється вперед по ходу прокатки: швидкість цих частинок, отримана в результаті деформації, складається з окружної швидкості валків. Інша частина зміщеного об'єму металу віджимается назад, проти ходу прокатки: швидкість цих частинок віднімається від окружної швидкості валків.

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



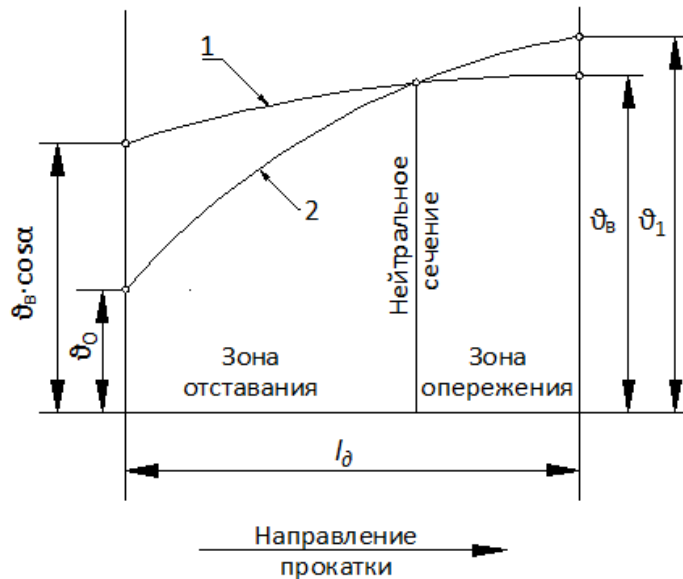
1 – зона відставання; 2 – зона випередження; 3 – нейтральний перетин

Рисунок 1.4 – Зони відставання і випередження в осередку деформування

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

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

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



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

Рисунок 1.5 – Співвідношення швидкості валків і металу в осередку деформування

Випередження

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

де S_{h1} – випередження;

ϑ_B – окружна швидкість обертання валків, м/с.

Випередження можна виразити у відсотках

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

Відставання

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

Випередження в розрахунках процесу прокатки визначається за формулою Екелунда

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

де γ - нейтральний кут (див. рис. 1.4), град.;

D_B – діаметр валків, мм.

Для знаходження нейтрального кута можна скористатися формулою Екелунда - Павлова

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

де β - кут тертя, град., який визначається з формули

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

де f – коефіцієнт тертя.

Коефіцієнт тертя розраховується за формулою Бахтінова – Штернова [3]

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

де k_1 - коефіцієнт, що враховує матеріал валків;

k_2 - коефіцієнт, що враховує вплив швидкості прокатки;

k_3 - коефіцієнт, характеризуючий марку сталі;

T_M - температура металу в даному проході, °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, характеризуючий марку сталі

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

де [...] - вміст даного 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 складало $\Delta b_1 \dots \Delta b_7$ 15, 14, 12, 12, 11, 9, 7 мм відповідно.

В результаті розрахунку повинні бути визначені:

- товщина штаби після кожного проходу;

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

1.3 Визначення параметрів формозмінення

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

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

Відносне обтиснення в першому проході

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

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

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

Загальний коефіцієнт витягання для 1-го проходу дорівнює:

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

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

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

Таблиця 1.1 - Результати розрахунку параметрів формозмінювання при поздовжньому прокатуванні штаби

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

Середній коефіцієнт витягання

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

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

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

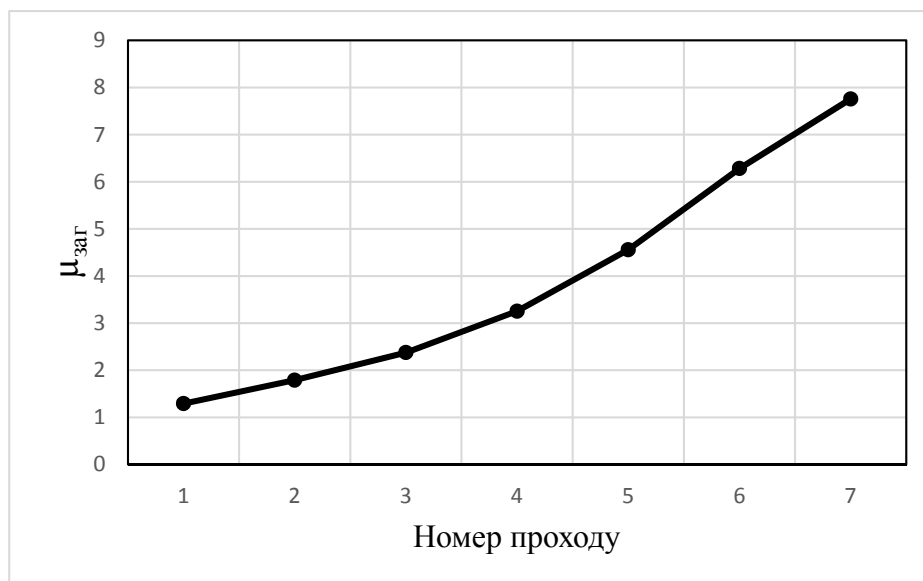


Рисунок 1.6 – Залежність загального коефіцієнту витягання $\mu_{\text{заг}}$ від номера проходу

1.4 Варіанти індивідуальних завдань

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

№ варіанту	h ₀ , мм	b ₀ , мм	l ₀ , мм	Δh ₁ , мм	Δh ₂ , мм	Δh ₃ , мм	Δh ₄ , мм	Δh ₅ , мм	Δh ₆ , мм	Δh ₇ , мм	Δb ₁ , мм	Δb ₂ , мм	Δb ₃ , мм	Δb ₄ , мм	Δb ₅ , мм	Δb ₆ , мм	Δb ₇ , мм	D _B , 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