

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

(Завдання 3)

3.1 Теоретичний вступ

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

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

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

після другого проходу

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

після сьомого проходу

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

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

Накопичений коефіцієнт витягання по проходах λ_{H1} визначається таким чином. Після першого проходу

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

після другого проходу

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

після сьомого проходу

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

Ступінь деформації по проходах дорівнює

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

де i – номер проходу.

Накопичена ступінь деформації в i -тому проході дорівнює

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

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

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

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

Середнє напруження течії після першого проходу дорівнює

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

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

Середнє напруження течії після i -того проходу дорівнює

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

Приведений напівкут волоки (α_{π} , град.) після i -того проходу визначається з формули

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

де α – напівкут волоки, град.;

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

l_{π} – довжина пояски волоки, мм.

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

Кут тертя дорівнює

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

де μ – коефіцієнт тертя.

Позначимо після кожного проходу через a_i наступне рівняння

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

Тоді середня напруга волочіння після кожного проходу дорівнює

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

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

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

де P_i - повне зусилля волочіння, кН.

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

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

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

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

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

де γ_i - коефіцієнт запасу по напруженню течії в i - тому проході:

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

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

3.2 Приклад розрахунку

Вихідні дані:

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

Після 4-го проходу необхідно провести відпал.

1-й прохід.

Коефіцієнт витягання по формулі (3.1) дорівнює:

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

Накопичений коефіцієнт витягання по формулі (3.4) дорівнює:

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

Ступінь деформації по формулі (3.7) дорівнює:

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

Накопичена ступінь деформації дорівнює

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

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

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

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

По формулі (3.13) знаходимо

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

По формулі (3.12) знаходимо

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

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

Кут тертя по формулі (3.15) дорівнює

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

По формулі (7.16) знаходимо:

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

Середнє напруження волочіння після першого проходу по формулі 3.17 дорівнює:

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

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

Повна сила волочіння по формулі (3.18) дорівнює:

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

Коефіцієнт запасу по межі текучості дорівнює (формула 3.23):

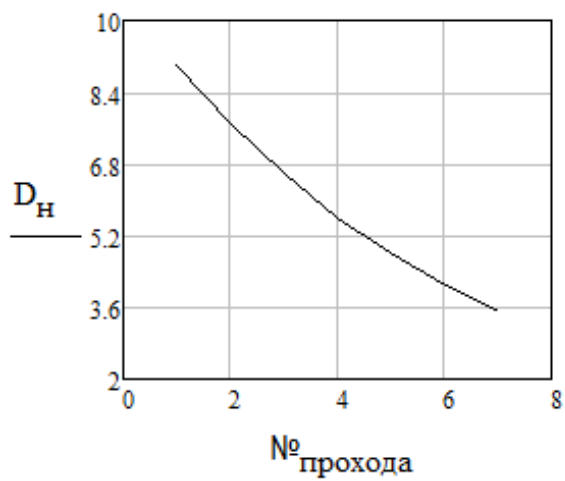
$$\gamma_1 = \frac{\sigma_{T1}}{K_{B1}} = \frac{289,019}{74,0} = 3,91 > 1.$$

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

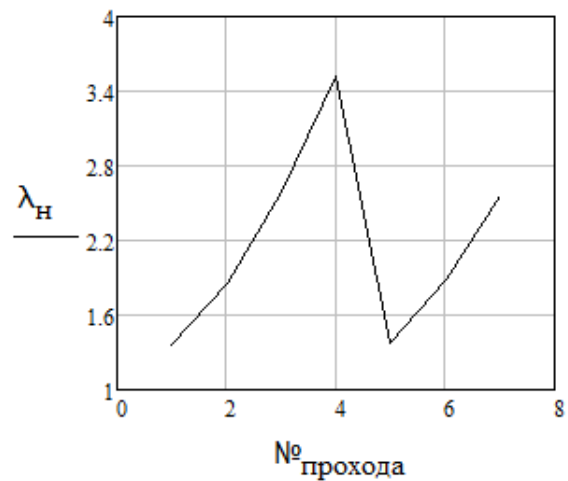
Таблиця 3.1 – Результати розрахунку енергосилових параметрів волочіння прутка

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

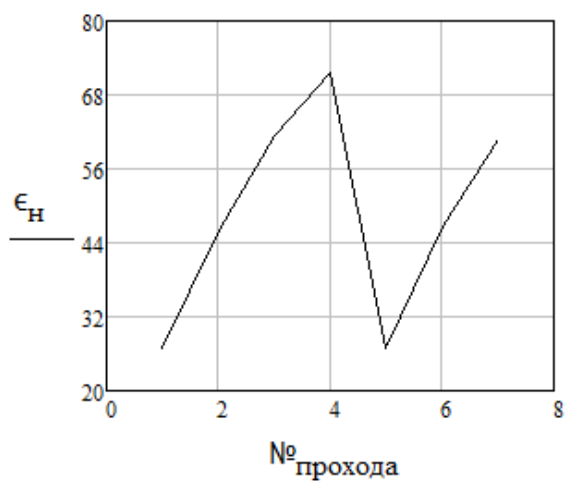
Побудувати графіки залежностей: $D = f(\text{№ проходу})$; $\lambda_H = f(\text{№ проходу})$; $\epsilon_H = f(\text{№ проходу})$; $K_B = f(\epsilon_H)$. Приклад графіків наведено на рис. 3.1.



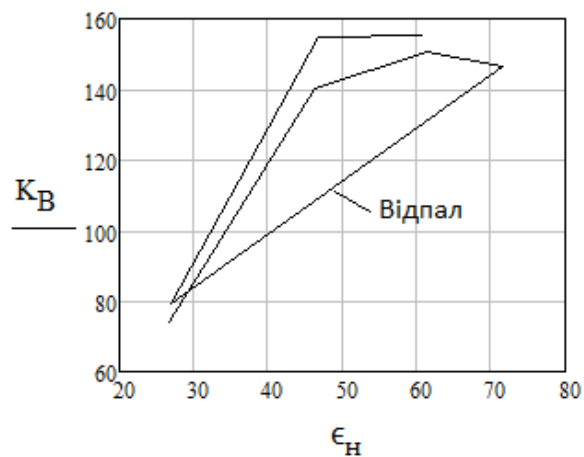
а



б



в



г

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

У табл. 3.2 наведено варіанти для виконання індивідуальних завдань.

3.3 Варіанти індивідуальних завдань розрахунку енергосилових параметрів волочіння прутка

Таблиця 3.2 - Варіанти індивідуальних завдань розрахунку енергосилових параметрів волочіння прутка

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