

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); ε – відносне обтиснення; U – швидкість деформації; t – температура металу.

Таблиця 7.1 - Коефіцієнти для визначення опору деформації σ_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 σ_s з термомеханічними параметрами при гарячому прокатуванні

Марка сталі або сплаву	Рівняння регресії
15Х12ВМФ	$1283+467\varepsilon+0,9U-1,85t-1338\varepsilon^2+0,00066t^2+5,3\varepsilon U$
Х21Н14Г3Т	$758+1349\varepsilon+1,2U-1,12t-903\varepsilon^2+0,00043t^2-0,81\varepsilon t$
12ХН3МДА	$464+2151\varepsilon-3U-0,414t-2953\varepsilon^2-0,0734U^2-1,213\varepsilon t+0,00632Ut$
4Х5В4Ф2М	$336+1097\varepsilon+3,9U-0,25t-0,74\varepsilon t-0,0029Ut$
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 стану 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 ψ 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 ψ . При практичних розрахунках для визначення ψ використовують емпіричні залежності.

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

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

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

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

де ε – 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⁻¹. Температура 850, 950, 1050 і 1150°C, обтиснення 2, 5, 10, 15 і 20 %.

Рішення

Визначимо опір деформації σ_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 σ_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 σ_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 σ_s сталі X21H14Г3Т від швидкості деформації, обтиснення і температури

Швидкість деформації $U, \text{с}^{-1}$	Обтиснення $\epsilon, \%$	Опір деформації σ_s , МПа при температурі $t, ^\circ\text{C}$			
		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

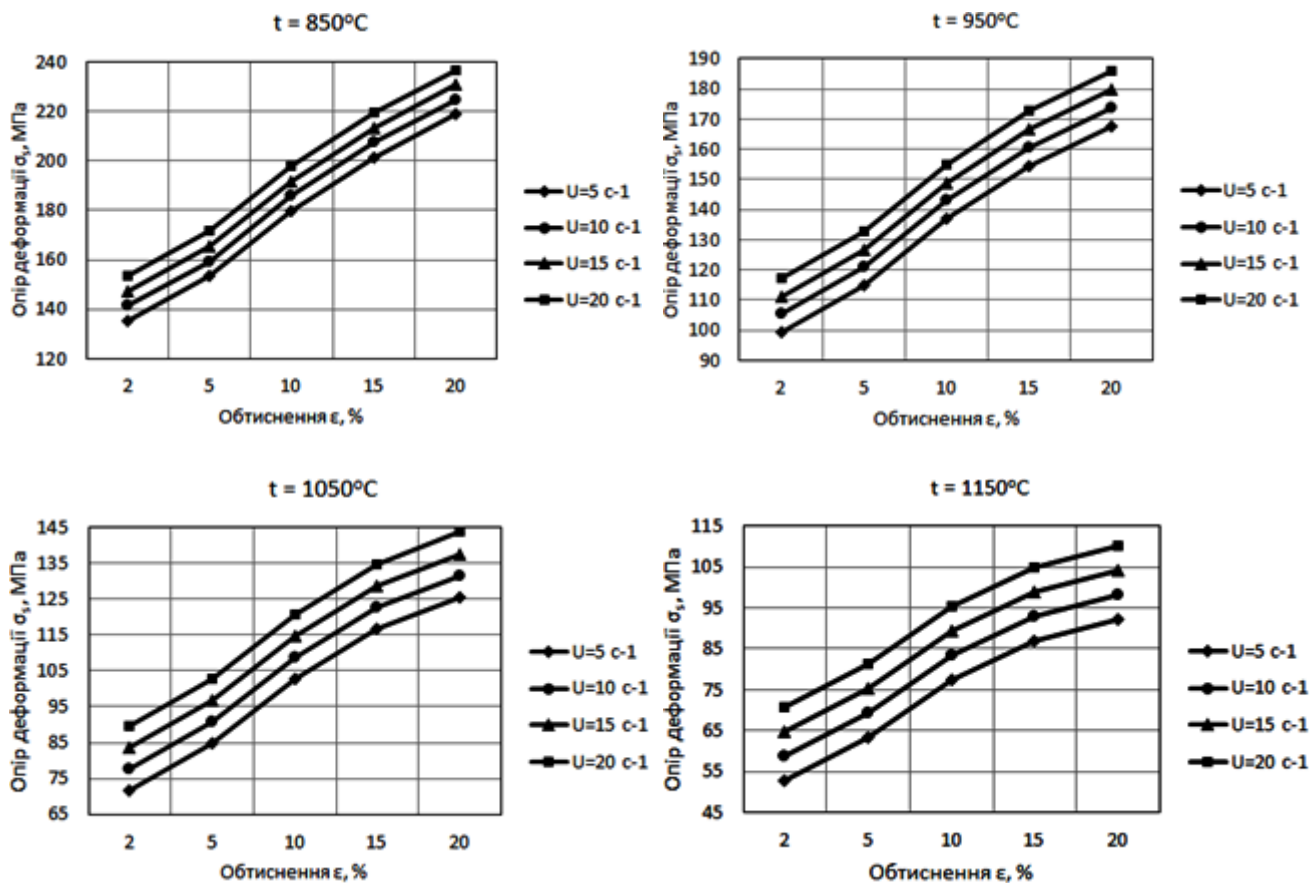


Рисунок 7.1 – Залежність істинної межі текучості σ_s сталі X21N14ГЗТ від обтиснення при різних температурах і швидкостях деформації

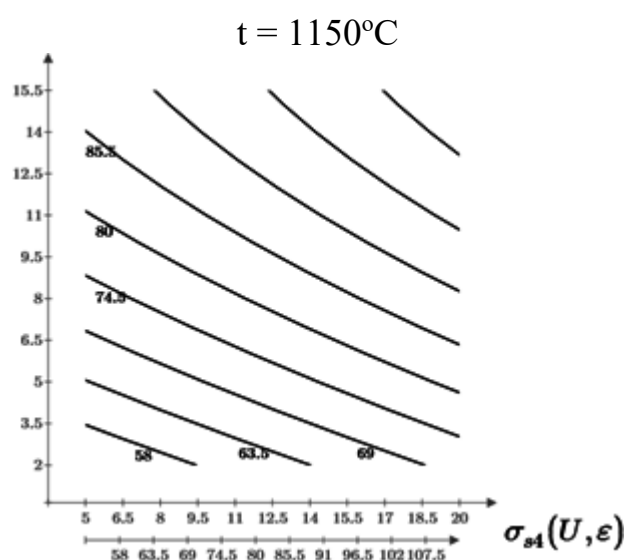
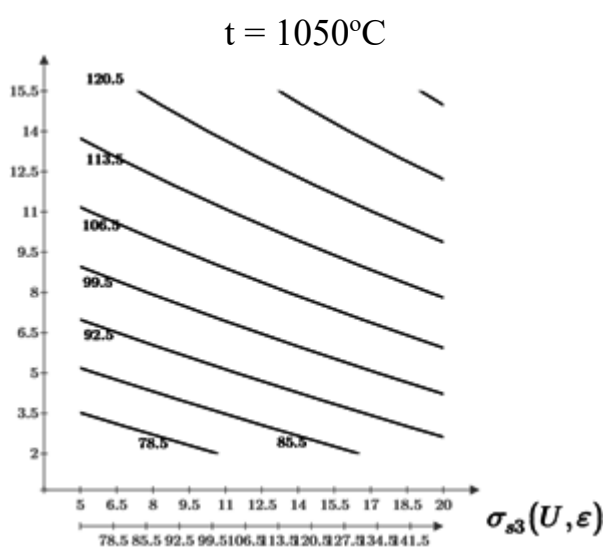
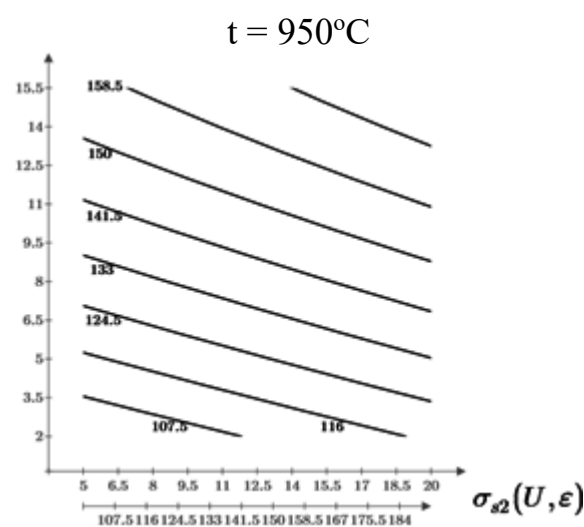
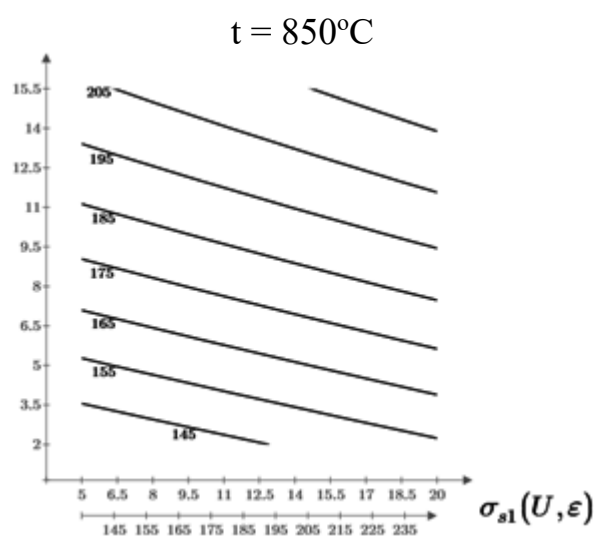


Рисунок 7.2 - Графіки ліній рівня (контурні графіки) залежності істинної межі текучості σ_s сталі X21H14Г3Т від обтиснення і швидкостях деформації при різних температурах (вертикальна вісь – обтиснення ϵ , %, горизонтальна вісь – швидкість деформації U , c^{-1})

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 ϵ , %				
	U_1	U_2	U_3	U_4	t_1	t_2	t_3	t_4	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_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 α дорівнював, або був менший кута тертя β , 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:

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

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

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

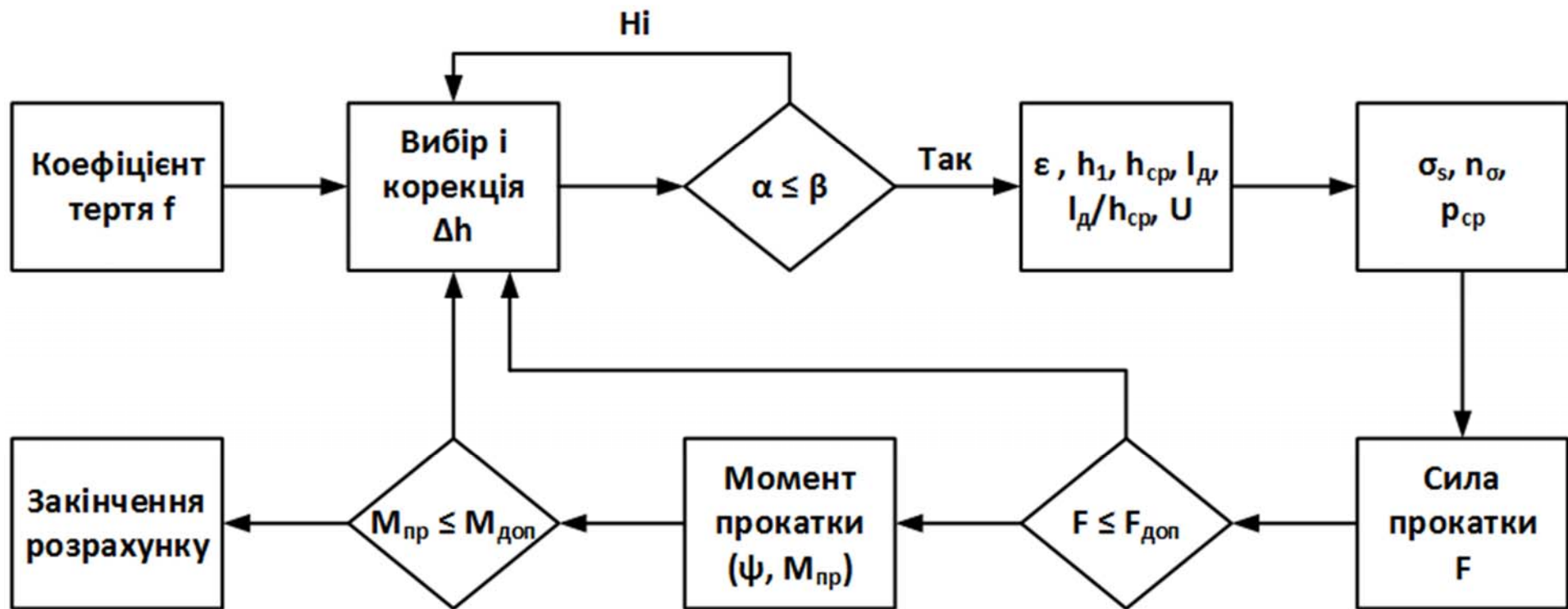


Рисунок 7.3 – Блок – схема розрахунку максимального обтиснення при гарячому прокатуванні

7.5 Варіанти індивідуальних завдань № 7 б

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

Варіант	$F_{\text{доп, МН}}$	$M_{\text{доп, МН} \cdot \text{М}}$	$h_0, \text{ мм}$	$b, \text{ мм}$	$v, \text{ м/с}$	$D, \text{ мм}$	$t, ^\circ\text{C}$
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 № $j := 0$

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

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

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

$$\begin{array}{l}
Z := \left[\begin{array}{l}
\Delta h \leftarrow 0 \\
\text{while } \Delta h < \Delta h_{max} \\
\quad \left[\begin{array}{l}
\Delta h \leftarrow \Delta h + 0.00001 \\
\alpha \leftarrow \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta h}{D}} \\
h_1 \leftarrow h_0 - \Delta h \\
\varepsilon \leftarrow \frac{\Delta h}{h_0} \\
l_\partial \leftarrow \sqrt{\frac{\Delta h \cdot D}{2}} \\
U \leftarrow \frac{v \cdot 1000 \cdot \varepsilon}{l_\partial} \\
\sigma_s \leftarrow \frac{1303 \cdot \varepsilon^{0.28} \cdot U^{0.143}}{e^{0.0025 \cdot t}} \\
n_\sigma \leftarrow \left(\frac{2 \cdot l_\partial}{h_0 + h_1} \right)^{-0.21} \\
p_{cp} \leftarrow 1.15 \cdot \sigma_s \cdot n_\sigma \\
F \leftarrow p_{cp} \cdot b \cdot l_\partial \cdot 10^{-6} \\
\psi \leftarrow 0.68 + 0.0018 \cdot \varepsilon - 0.31 \cdot \frac{2 \cdot l_\partial}{h_0 + h_1} \\
M_{np} \leftarrow 2 \cdot F \cdot \psi \cdot l_\partial \cdot 10^{-3} \\
\text{if } F \geq F_{don} \vee M_{np} \geq M_{don} \\
\quad \left[\text{break} \right]
\end{array} \right. \\
\left[\begin{array}{l}
\Delta h \\
\alpha \\
h_1 \\
\varepsilon \\
l_\partial \\
U \\
\sigma_s \\
n_\sigma \\
p_{cp} \\
F \\
\psi \\
M_{np}
\end{array} \right]
\end{array} \right.
\end{array}
\quad
Z = \left[\begin{array}{c}
20 \\
0.1907 \\
120 \\
0.1429 \\
104.8809 \\
5.9932 \\
80.1283 \\
1.0461 \\
96.3975 \\
32.3528 \\
0.4302 \\
2.9192
\end{array} \right]$$