

### 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]

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

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

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

$k_3$  - коефіцієнт, що характеризує марку сталі;

$T_{BX}$  - 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)

$$F_{к1} = 0,5 \cdot (500 + 515) \cdot 144,66 = 73412 \text{ мм}^2.$$

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

$$P_1 = p_{сep1} \cdot F_{к1} = 89,06 \cdot 73412 \cdot 10^{-6} = 6,538 \text{ МН.}$$

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)

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

Потужність прокатки в першому проході (формула 3.14)

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

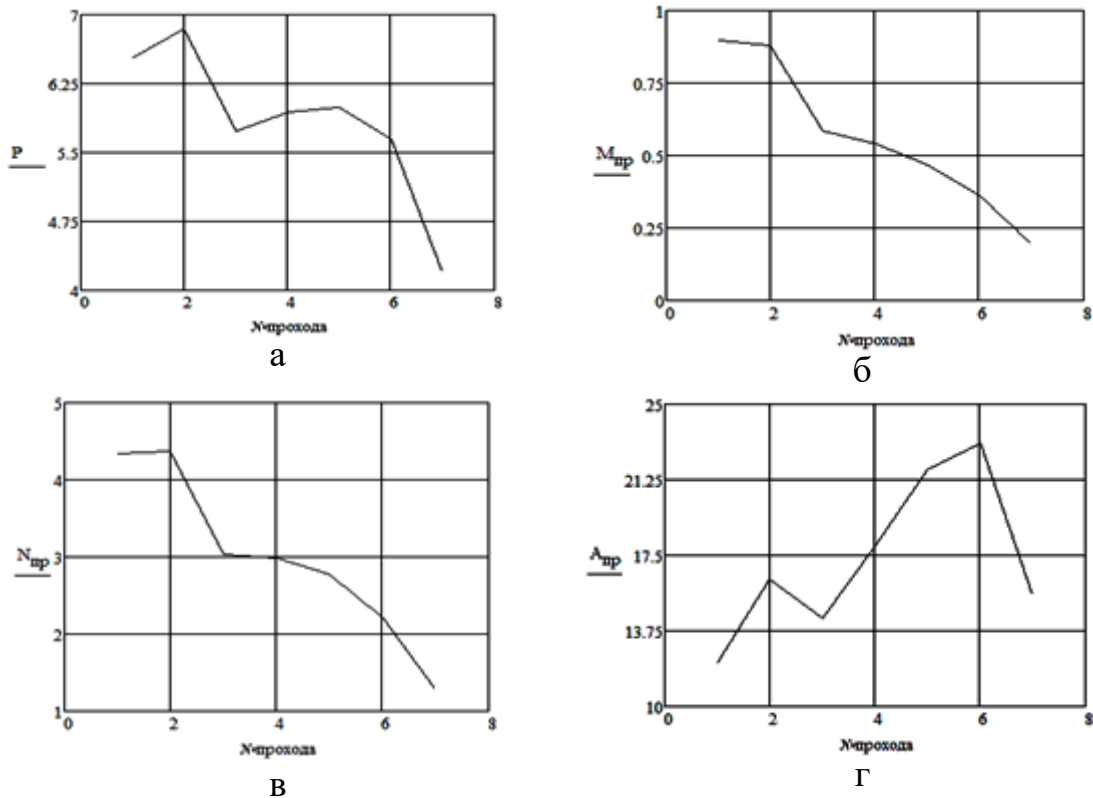
Роботу прокатки розраховуємо по формулі (3.16)

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

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 проходах

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