

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

М.Г. Прищип

**ТЕОРІЯ ЗМАЩУВАННЯ ТА
ТЕХНОЛОГІЧНІ МАСТИЛА В ПРОЦЕСАХ ОМТ**

**Методичні вказівки до практичних занять
і контрольних робіт**

*для студентів ЗДІА
спеціальності “ОМТ”
всіх форм навчання*

Запоріжжя
2006

Теорія змащування та технологічні мастила в процесах ОМТ. Методичні вказівки до практичних занять і контрольних робіт для студентів ЗДІА спеціальності “ОМТ” всіх форм навчання /Укладач М.Г.Прищип. – Запоріжжя, 2006. - 37с.

Укладач: *М.Г. Прищип, к.т.н., доцент*

В методичних вказівках приведені алгоритми розрахунків, задачі і приклади рішення задач по визначенню показників коефіцієнтів тертя в процесах гарячої і холодної прокатки та волочіння метала з використанням технологічних мастил.

1.Визначення коефіцієнта тертя під час захоплення металу валками в процесі гарячої прокатки.

1.1.Загальні відомості.

Під час гарячої прокатки зливків на обтискних станах блюмінгах і слябінгах та в чорнових клітках сорто-, листо- і штабoproкатних станів однією з найважливіших умов сталості процесів прокатки є забезпечення надійного захоплення металу валками. Надійне захоплення металу валками можливе при виконанні двох умов:

$$\Delta h_{\max} = D (1 - \cos \alpha_{\max}) \quad (1)$$

де Δh_{\max} – максимально допустимий обтиск;

D - діаметр валків;

α - максимально можливий кут захоплення металу валками.

$$\operatorname{tg} \alpha_{\max} = f_3 \quad (2)$$

f_3 - коефіцієнт тертя під час захоплення металу валками.

Коефіцієнт тертя при захопленні металу знаходять дослідним шляхом методом визначення гранично можливого кута захоплення [1].

Таким чином були отримані формули Екелунда, Гелеї та Бахтінова і Штернова.

1.2.Задача №1 і варіанти завдань.

Визначення коефіцієнта тертя захоплення в умовах гарячої прокатки зливків із маловуглецевої сталі при охолодженні валків водою на обтискному стані по формулах:

Екелунда:

$$f_3 = k(1,05 - 0,0005t) \quad (3)$$

де t – температура метала під час прокатки, °С;
 $k = 0,8$ і $k = 1,0$ відповідно для чавунних валків з відбіленою (загартованою) поверхнею бочок і для сталевих валків.

Гелеї:

для чавунних загартованих валків:

$$f_3 = 0,82 - 0,0005t - 0,056v \quad (4)$$

для сталевих валків:

$$f_3 = 0,94 - 0,0005t - 0,056v \quad (5)$$

де v – колова швидкість валків, м/с.

Формули (3), (4) і (5) дійсні при $t > 700^\circ\text{C}$ і $v \leq 5$ м/с.

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунків по варіантам.

№№ варіан- тів	Температура метала, °С		Кількість проходів,	Оберти валків П, об/хв	Діаметр валків, мм
	На початку прокатки	В кінці прокатки			
1/16	1300/1280	1100/1050	11/13	25/27	1000/1020
2/17	1290/1270	1150/1060	9/11	27/30	1020/1040
3/18	1280/1260	1140/1070	7/9	33/35	1030/1050
4/19	1270/1240	1130/1045	15/17	35/37	1050/1070
5/20	1260/1250	1120/1055	17/19	40/43	1080/1100
6/21	1250/1230	1090/1065	19/13	43/45	1120/1140
7/22	1240/1220	1095/1075	13/15	47/50	1150/1160
8/23	1230/1210	1085/1065	9/7	45/40	1170/1180
9/24	1220/1200	1080/1055	13/11	40/38	1190/1200
10/25	1210/1190	1075/1065	11/9	38/42	1210/1220
11/26	1195/1185	1085/1085	9/13	42/44	1230/1290
12/27	1185/1180	1030/1000	15/11	46/48	1195/1235
13/28	1270/1320	1090/1100	11/13	32/36	1225/1115
14/29	1340/1330	1110/1100	15/17	30/28	1215/1055
15/30	1310/1295	1080/1070	17/19	25/22	1205/1135

1.3. Алгоритм і приклад розрахунку задачі 1.

Визначаємо швидкість прокатки під час захоплення металу валками v , м/с:

$$v = \frac{\pi D n}{60} \quad (6)$$

Наприклад, для варіанту 30:

Оберти валків $n = 22$ об/хв, діаметр валків $D = 1135$ мм;

Тоді

$$v = \frac{3,14 \cdot 1,135 \cdot 22}{60} = 1,3 \text{ м/с}$$

Розраховуємо температуру метала по проходам:

Зниження, внаслідок охолодження, температури метала поміж проходами Δt_i , °C:

$$\Delta t_i = \frac{t_{nn} - t_{kn}}{i - 1} \quad (7)$$

де t_{nn} – температура початку прокатки;

t_{kn} – температура кінця прокатки;

i – кількість проходів.

Наприклад, для варіанту 30:

$$\Delta t_i = \frac{1295 - 1070}{19 - 1} = 11,8^\circ \text{C} \approx 12,5^\circ \text{C}$$

Тоді температура метала по проходах:

$$t_1 = t_{nn}; \quad t_2 = t_1 - \Delta t_i; \quad t_3 = t_2 - \Delta t_i \quad \text{і т.д., тобто}$$

для варіанту 30:

$$t_1 = 1295^\circ \text{C};$$

$$t_2 = 1295 - 12,5 = 1282,5^\circ \text{C};$$

$$t_3 = 1282,5 - 12,5 = 1270^\circ \text{C}$$

і т.д.

Розраховавши швидкість і температуру визначаємо коефіцієнти тертя по формулам Екелунда і Гелеї для прокатки на сталених валках, наприклад, для варіанта 30, проходів 1 і 2 і т.д.

$$f_{31} = k(1,05 - 0,0005t) = 1,0(1,05 - 0,0005 \cdot 1295) = 0,403$$

$$f_{32} = 1,0(1,05 - 0,0005 \cdot 1283) = 0,409$$

і т.д.

Результати розрахунків звести в таблицю, збудувати графіки $f_3 = F(t)$ та зробити висновки.

2.Визначення коефіцієнта тертя в усталеній стадії гарячої прокатки.

2.1.Загальні відомості.

Для характеристики та оцінки тертя використовують відомі закони Г.Амонтона:

$$T = fP \quad (8)$$

або

$$\tau = f_n p \quad (9)$$

і Е.Зібеля:

$$\tau = f_n \sigma_\phi \quad (10)$$

де T - сила тертя;

P - нормальна сила;

τ - питома сила тертя;

f - коефіцієнт тертя;

f_n - показник тертя;

σ_ϕ - опір метала деформації;

p - нормальний питомий тиск в осередку деформації.

Думка більшості вчених в царині теорії ОМТ однозначна – закон Е.Зібеля більш точно відповідає фізичній сутності тертя. Пояснюється це тим, що поява самих сил тертя пов'язується безпосередньо із пластичною деформацією поверхневих прошарків металу.

Розглянемо сукупно закони тертя Амонтона і Зібеля. Для цього, прирівнявши праві частини (9) і (10), (їх ліві частини однакові), отримаємо:

$$fp = f_n \sigma_\phi \quad (11)$$

Звідси маємо

$$f_n = f \frac{p}{\sigma_\phi} \quad (12)$$

Завдяки тому, що в процесах прокатки завжди $p > \sigma_\phi$, $f_n > f$.

Розрахунки коефіцієнтів тертя під час як гарячої так і холодної прокатки в усталеному процесі базується на використанні закону Е.Зібеля та взаємозв'язку коефіцієнта і показника тертя, яка відображається виразом (12).

2.2. Алгоритм розрахунку коефіцієнта тертя в процесі гарячої прокатки.

Коефіцієнт тертя f визначається на базі лабораторних і промислових досліджень по емпіричним формулам, яка для гарячої прокатки має вигляд [2]:

$$f = f_0 K_T K_V K_B K_M K_\varepsilon K_{MC} \quad (13)$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя, який визначається в залежності від температури металу під час прокатки t .

$$f_0 = 0,27 - 0,1(t/400 - 2)^2 \quad (14)$$

де t - температура металу під час прокатки.

$K_T K_V K_B K_M K_\varepsilon K_{MC}$ - поправні коефіцієнти, які враховують відповідно вплив твердості валків, швидкості валків або прокатки, стан поверхні бочок валків, матеріалу штаби, відносного обтиску і технологічного мастила.

$$K_T = 1 + 0,43(1 - HSD/65)^2 \quad (15)$$

де HSD - твердість валків по Шору.
за $v < 10$ м/с

$$K_v = 0,76 + 0,82(1,02 - 0,102v)^2 \quad (16)$$

за $v > 10$ м/с

$$K_v = 0,76$$

де v - швидкість прокатки, м/с.

Значення коефіцієнтів K_B , K_{MC} і K_M можна приймати по рекомендаціям [2] наступними:

<u>Характеристика поверхні бочок валків</u>	- K_B
Чавунні відбілені валки	- 0,75
Чавунні і сталеві валки після двох годин роботи	- 1,0

Стальні валки з насіченими дробом бочками	– 1,20-1,40
<u>Тип технологічного мастила</u>	<u>– K_{MC}</u>
Без мастила	– 1,15
Вода	– 1,0
Емульсія мінерального масла	– 0,9
Емульсія полімеризованого бавовняного масла	– 0,8
<u>Матеріал штаби (марка сталі)</u>	<u>– K_M</u>
Ст.08, 08КП, 08ПС, 08ПСН, 08Ю, Ст.3, ШХ15	– 1,0
Ст.10, Ст.20, Х18Н9	– 0,95
Ст.45, ЭИ-94	– 0,90
30ХГСА, 25ХГСА, А12	– 0,85
У10, У12, А20	– 0,80
1Х18Н9Т, 12Х18Н10Т, 45Г17Ю3, ЭИ-654	– 1,08
1Х17Н2, Х17, Х20	– 1,15
Х25Т	– 1,25

Коефіцієнт впливу відносного обтиску K_ϵ приймається наступним:

$$K_\epsilon = 0,90 - 1,0 \text{ за } \epsilon \leq 30\%; \quad K_\epsilon = 1,0 - 1,2 \text{ за } \epsilon > 30\%$$

Визначивши f по (13), показник тертя f_n визначається із співвідношення:

$$f_n = 1,6f - 0,033 \quad (17)$$

2.3. Вихідні дані (по варіантам) для розрахунку параметрів тертя під час гарячої прокатки.

Визначити базовий коефіцієнт тертя f_0 , коефіцієнт тертя f і показник тертя f_n під час прокатки в семиклітьовій чистовій групі неперервного стана гарячої прокатки 2000 для умов:

- валки чавунні після двох годин роботи;
- технологічне мастило (охолоджувач валків – вода);
- твердість бочок валків 70 одиниць HSD ;
- швидкість прокатки $v > 10$ м/с;
- відносний обтиск $> 30\%$.

Таблиця 2. Індивідуальні вихідні дані відповідно варіанта.

№№ варіанту	Температура металу, °С		Марка сталі
	На початку прокатки t_{nn}	В кінці прокатки $t_{кн}$	
1/16	1020/1000	900/880	ЭИ-94/Ст.10
2/17	1010/995	890/870	Ст.08/Х17
3/18	1050/1045	940/935	08ПС/У10
4/19	1040/1035	938/930	08ПСН/У12
5/20	1030/1020	930/890	08Ю/А12
6/21	1000/990	886/840	Ст.3/Ст.45
7/22	985/1015	820/860	30ХГСА/А20
8/23	1005/1012	870/830	У12/ЭИ-654
9/24	1035/1018	825/845	Х25Т/1Х18Н10Т
10/25	1025/1028	850/856	Ст.10/Х17
11/26	1038/1042	862/874	Ст.20/Х20
12/27	1055/1060	878/882	У10/25ХГСА
13/28	1063/1068	893/840	45Г17Ю3/Ст.3
14/29	1053/1070	820/840	12Х18Н10Т/Ст.08
15/30	1065/1080	850/860	ШХ15/25ХГСА

2.4. Приклад розрахунку до задачі №2.

Вихідні дані:

- кількість клітей неперервної чистової групи стана гарячої прокатки – 7;
- валки чавунні після двох годин роботи, тому $K_B=1$;
- мастило – охолоджувальна рідина – вода, для якої коефіцієнт (вода) мастила $K_{MC}=1,0$;
- твердість бочок валків 70 HSD, тому по (15)

$$K_T = 1 + 0,43(1 - HSD/65)^2 = 1,0 + 0,43(1 - 70/65)^2 = 1,0$$
;
- швидкість прокатки $v > 10$ м/с, тому коефіцієнт $K_v=0,76$;
- відносний обтиск $> 30\%$, тому $K_\varepsilon=1,2$;
- температура початку прокатки $T_{пп}=1150^\circ\text{C}$;
- температура кінця прокатки $T_{кп}=910^\circ\text{C}$;
- марка сталі 1Х17Н2, тому $K_M=1,15$.

Визначаємо зменшення температури поміж клітями Δt_i внаслідок охолодження металу за виразом (7):

$$\Delta t_i = \frac{t_{mn} - t_{kn}}{i - 1}$$

де i – кількість клітей

$$\Delta t_i = \frac{1150 - 910}{7 - 1} = 40^\circ\text{C}$$

Температура металу по клітям:

$$t_1 = t_{mn} = 1150^\circ\text{C}$$

$$t_2 = t_1 - \Delta t = 1150 - 40 = 1110^\circ\text{C}$$

$$t_3 = t_2 - \Delta t = 1110 - 40 = 1070^\circ\text{C}$$

$$t_4 = t_3 - \Delta t = 1070 - 40 = 1030^\circ\text{C}$$

$$t_5 = t_4 - \Delta t = 1030 - 40 = 990^\circ\text{C}$$

$$t_6 = t_5 - \Delta t = 990 - 40 = 950^\circ\text{C}$$

$$t_7 = t_{kn} = t_6 - \Delta t = 950 - 40 = 910^\circ\text{C}$$

Визначаємо базовий коефіцієнт тертя по формулі (14):

$$f_{01} = 0,27 - 0,1\left(\frac{t_1}{400} - 2\right)^2 = 0,27 - 0,1\left(\frac{1150}{400} - 2\right)^2 = 0,193$$

$$f_{02} = 0,27 - 0,1\left(\frac{1110}{400} - 2\right)^2 = 0,21$$

$$f_{03} = 0,27 - 0,1\left(\frac{1070}{400} - 2\right)^2 = 0,22$$

$$f_{04} = 0,27 - 0,1\left(\frac{1030}{400} - 2\right)^2 = 0,24$$

$$f_{05} = 0,27 - 0,1\left(\frac{990}{400} - 2\right)^2 = 0,25$$

$$f_{06} = 0,27 - 0,1\left(\frac{950}{400} - 2\right)^2 = 0,26$$

$$f_{07} = 0,27 - 0,1\left(\frac{910}{400} - 2\right)^2 = 0,27$$

По формулі (13) визначаємо коефіцієнт тертя:

$$f = f_0 K_T K_V K_B K_M K_\varepsilon K_{MC}$$

$$f_1 = 0,193 \cdot 1,0 \cdot 0,76 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \approx 0,24$$

$$f_2 = 0,21 \cdot 1,0 \cdot 0,76 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \approx 0,26$$

$$f_3 = 0,22 \cdot 1,0 \cdot 0,76 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \approx 0,28$$

$$f_4 = 0,24 \cdot 1,0 \cdot 0,76 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \approx 0,30$$

$$f_5 = 0,25 \cdot 1,0 \cdot 0,76 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \approx 0,32$$

$$f_6 = 0,26 \cdot 1,0 \cdot 0,76 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \approx 0,33$$

$$f_7 = 0,27 \cdot 1,0 \cdot 0,76 \cdot 1,2 \cdot 1,15 \cdot 1,2 \cdot 1,0 \approx 0,34$$

Показники тертя визначаємо за виразом (17):

$$f_n = 1,6 f - 0,033$$

$$f_{n1} = 1,6 \cdot 0,24 - 0,033 = 0,35$$

$$f_{n2} = 1,6 \cdot 0,26 - 0,033 = 0,38$$

$$f_{n3} = 1,6 \cdot 0,28 - 0,033 = 0,42$$

$$f_{n4} = 1,6 \cdot 0,30 - 0,033 = 0,45$$

$$f_{n5} = 1,6 \cdot 0,32 - 0,033 = 0,49$$

$$f_{n6} = 1,6 \cdot 0,33 - 0,033 = 0,52$$

$$f_{n7} = 1,6 \cdot 0,34 - 0,033 = 0,54$$

Результати розрахунків зводимо в табл.3.

Таблиця 3. Результати визначення параметрів тертя під час гарячої прокатки сталі 1X17H2.

№№ кліті	Температура металу t , °C	Параметри тертя		
		f_0	f	f_n
1	1150	0,19	0,24	0,35
2	1110	0,21	0,26	0,38
3	1070	0,22	0,28	0,42
4	1030	0,24	0,30	0,45
5	990	0,25	0,32	0,49
6	950	0,26	0,33	0,52
7	910	0,27	0,34	0,54

По результатам розрахунків будемо графіки $f_0, f_1, f_n = \text{функція}(t)$:

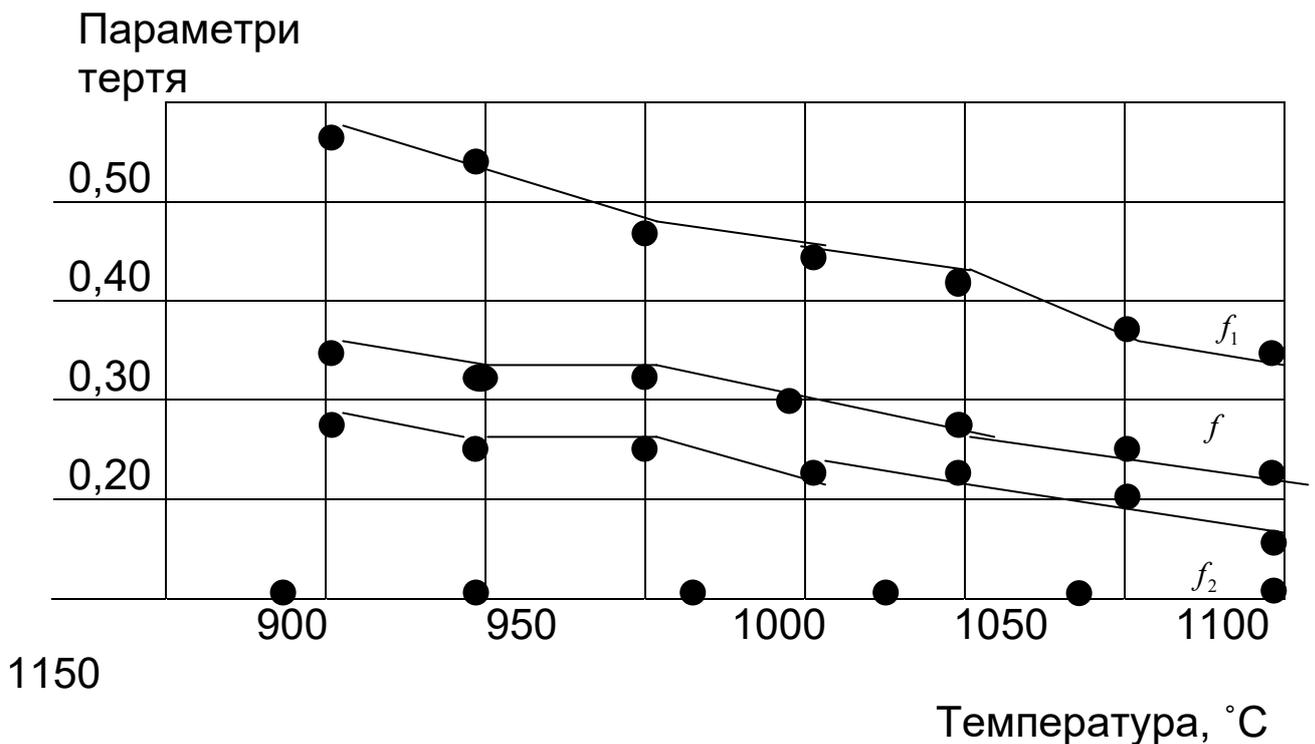


Рис.1. Залежність параметрів тертя від температури метала під час прокатки.

По результатам розрахунків зробити висновки і пояснити отримані результати.

3. Визначення параметрів тертя і змащування під час холодної прокатки.

3.1. Закономірності тертя при холодній прокатці.

Основною відмінною умов тертя під час холодної прокатки у порівнянні з гарячою – є обов'язкова подача технологічного мастила в осередок деформації. Однозначно, як показує практика, без технологічного мастила холодна деформація стає неможливою із-за сильного впливу умов тертя на тиск і силу прокатки, знос інструменту і т.д.

Холоднокатаний метал деформують або в шліфованих, або в шершавих (насічених дробом) валках. На станах холодної прокатки використовують ковані валки із легованих сталей із нагартованим поверхневим шаром, що забезпечує твердість бочок робочих валків в робочому інтервалі 90-100од. по Шору.

Величина коефіцієнта тертя під час холодної прокатки значно менша, ніж при гарячому деформуванні металу валками, завдяки використанню технологічного мастила. В той же час вплив величини коефіцієнта тертя на силу прокатки, момент і потужність холодної деформації на порядок більший, чим під час гарячої прокатки. Коефіцієнт тертя при гарячій прокатці складає 0,15-0,40, а при холодній 0,02-0,15.

При холодній прокатці на величину коефіцієнта тертя найбільш суттєво впливають такі параметри технологічного характеру: геометричні параметри деформації штаби, параметри шершавості поверхонь валків і штаби, колова швидкість валків і тип технологічного мастила. Так, із збільшенням відносного обтиску ε і зменшенням діаметру валків коефіцієнт тертя збільшується. Збільшення шершавості контактуючих поверхонь валків і штаби також значно підвищує коефіцієнт тертя.

Відчутне зниження коефіцієнта тертя відбувається при збільшенні колової швидкості валків.

Найбільш величина коефіцієнта тертя при холодній прокатці залежить від типу технологічного мастила та від його мастильних властивостей таких, як в'язкість, змащувальна здатність, схоплюванність з металом і т.д.

В Дметі експериментально визначені коефіцієнти тертя під час гарячої прокатки [3], які для різних масти складають:

<u>Мастило</u>	<u>Коефіцієнт тертя, f</u>
Вода	- 0,302
Масло індустріальне 20	- 0,192
Нігролове масло	- 0,187
Мазут	- 0,187
Касторове масло	- 0,160
Полімерізоване бавовняне масло (ПБМ)	- 0,157

Залежність коефіцієнта тертя від хімічного складу прокатуваної сталі ілюструється в табл.4 [2].

Таблиця 4. Коефіцієнт тертя під час гарячої прокатки з мастилом – вода, обтиск $\varepsilon = 15\%$, швидкість прокатки $v=0,3$ м/с.

Температура сталі, °С	Сталі							
	Ст.45	ЭИ654	45ХГН103	X17	1X18Н9Т	1X17Н2	ШХ15	X25Т
1050	0,342	0,344	0,404	0,354	0,415	0,425	0,430	0,461
1150	0,282	0,404	0,395	0,381	0,325	0,403	0,286	0,404

Із вищенаведених даних видно, що при прокатуванні на воді коефіцієнти тертя під час гарячої прокатки знаходяться в інтервалі 0,28-0,46, з мастилами 0,16-0,19. Ще більш значний вплив мастила самого по собі, та його типу на величину коефіцієнта тертя має місце під час холодної прокатки, що показано в табл.5.

Таблиця 5. Залежність коефіцієнта тертя під час холодної прокатки від типу мастила та його в'язкості [4] і [1].

Тип мастила	В'язкість, СТ (стантістокс)	Коефіцієнт тертя, f
Трансформаторне	30	0,104
Індустріальне 23	91	0,086
Циліндрове 11	868	0,068
Прокатне 28	3610	0,055
Бавовняне натуральна	28,2	0,067
Бавовняне полімерізов.	1300	0,034
Пальмове	~800	0,075
Оливкове	~900	0,058
Касторове	1100	0,045

Порівняння величин коефіцієнтів тертя, наведених в табл.4 і 5, дозволяє однозначно сказати, що під час холодної прокатки з оптимально вибраним мастилом тертя зменшується в 3-5 разів порівняно з гарячою деформацією.

Насамкінець зазначимо:

- при гарячому прокатуванні, чим ефективніше мастило, тим гірше захоплення метала валками і, крім того, натуральні мастила згорають і в осередок деформації попадають продукти згорання;
- під час холодної прокатки високов'язкі мастила майже неможливо подати на кліті стану через трубопроводну мастильну систему.

Виходячи з вищезначеного найбільш поширені в практиці прокатного виробництва в якості технологічних мастил це емульсії найчастіше мінеральних масел і масляно-водяні суміші (суспензії) рослинних масел.

3.2. Алгоритми розрахунку коефіцієнта тертя під час холодної прокатки.

Із попереднього підпункту 3.1. очевидно, що коефіцієнт тертя в процесі холодної прокатки залежить від багатьох факторів і параметрів технології, а тому його визначають на базі лабораторних і промислових експериментів по емпіричній формулі, яка має вигляд [4]:

$$f = f_0 \cdot K_d \cdot K_u \cdot K_{MC} \cdot K_t \quad (18)$$

де f_0 - базовий коефіцієнт тертя

K_d, K_u, K_{MC}, K_t - параметричні коефіцієнти, які враховують відповідно вплив обтиску, шершавість поверхні штаби, технологічного мастила і температури прокатуваного металу на величину коефіцієнта тертя.

Базовий коефіцієнт тертя f_0 дорівнює, за швидкості $v \leq 7,5$ м/с:

$$f_0 = 0,076 - 0,0019v + 0,03(Ra - 0,6) \cdot [(1,07 - 0,14v)^3 + 0,054v - 0,26] \quad (19)$$

за $v > 7,5$ м/с.

$$f_0 = K_v [0,062 - 0,005(Ra - 0,6)] \quad (19a)$$

де $K_v=1$ при $v < 8,0$ м/с за $v > 8$ м/с.

$$K_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025v)^2 \quad (20)$$

де v – швидкість прокатки, м/с.

Коефіцієнт K_d дорівнює:

За $Ra \leq 2$ мкм:

$$K_d = 0,47 + 1,75\varepsilon \quad (21)$$

За $Ra = 2,1 - 3,9$ мкм:

$$K_d = 0,74 + 0,87\varepsilon \quad (22)$$

За $Ra \geq 4,0$ мкм при $\varepsilon \geq 0,18$:

$$K_d = 0,85 + 2,45(1 - 2\varepsilon)^4 \quad (23)$$

де Ra – шершавість валків;

ε – відносний обтиск.

Коефіцієнт $K_{ш}$ визначається по формулі:

$$K_{ш} = 1,09 - 0,05Ra_{ш} \quad (24)$$

де $Ra_{ш}$ – шершавість поверхні штаби, мкм.

Коефіцієнт K_t визначається за формулою:

$$K_t = a + c(1,11 - 0,0044 t_n)^n \quad (25)$$

де t – температура метала перед осередком деформації, °С;

a, c, n – коефіцієнти, які дорівнюють:

для 3-5% мінеральної емульсії, мінерального масла ІС20 і гідрогенізованого соняшникового масла – мастило ПКС-1

$$a = 0,31 + 1,7\varepsilon$$

$$c = 1,2 - 2,8\varepsilon \quad (26)$$

$$n = 3,84 - 5,7\varepsilon$$

Коефіцієнт типу мастила $K_{МС}$ приймають слідуючим [5]:

<u>Мастило</u>	<u>$K_{МС}$</u>
Емульсія мінерального масла	- 1,0
Бавовняне натуральне масло	- 0,94
Соняшникове гідроганізоване масло	- 0,85
Пальмове масло	- 0,83
Бавовняне полімерізоване масло	- 0,56

Показник тертя f_n визначається за виразом:

$$f_n = 1,6 \cdot f - 0,018 \quad (27)$$

3.3. Варіанти вихідних даних для розрахунку коефіцієнта і показника тертя в процесі холодної прокатки. (Задача 3).

Визначити базовий коефіцієнт тертя f_0 , коефіцієнт тертя f і показник тертя f_n під час прокатки жерсті на шестиклітьовому повністю неперервному стані холодної прокатки 1400 для умов:

- робочі валки ковані із легованої сталі із загартованою поверхнею бочок, тонко відшліфовані після двох годин роботи, які мають мікрошершавість $Ra_B = 2,0$ мкм;
- марка прокатуваної сталі – 08КП;
- температура метала t_{Me} перед осередком деформації відповідної кліті:

<u>Кліть</u>	1	2	3	4	5	6
t_{Me}	20	40	50	60	70	80;

- шершавість поверхні штаби $Ra_{ш} = 1,5$ мкм для всіх шести клітей;
- відносний обтиск ϵ і швидкість прокатки v по клітям визначається розрахунком (див. приклад) по вихідним даним поваріантно;
- тип мастила прийняти відповідно варіантам та завдання такими:
 - 1) варіанти 1-10: соняшникове гідроганізоване масло (мастило ПКС 1), для якого $K_{mc} = 0,85$;
 - 2) варіанти 11-15: бавовняне полімерізоване масло, відповідно $K_{mc} = 0,56$;
 - 3) варіанти 16-30: пальмове масло, відповідно (див, п.п.3.2) $K_{mc} = 0,83$.

Таблиця 6. Індивідуальні (по варіантам) вихідні дані до задачі 3.

№№ варіанту	Тип мастила	Товщина жерсті h_6 , мм	Колова швидкість валків кл.6 v_6 , м/с	Відносний обтиск по клітям 1-6, ϵ_i , %					
				ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	ϵ_5	ϵ_6
1/16	1/3	0,15/0,21	30/26	40,5	36,0	33,3	31,0	25,6	18,7
2/17	1/3	0,16/0,25	31/27	39,5	37,0	34,0	31,5	25,8	18,9
3/18	1/3	0,17/0,27	32/25	39,0	36,5	39,5	30,8	26,0	19,0

Продовження таблиці 6

№№ варі- анту	Тип мас- тила	Товщина жерсті h_6 , мм	Колова швидкість валків кл.6 v_6 , м/с	Відносний обтиск по клітям 1-6, ε_i , %					
				ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6
4/19	1/3	0,18/0,29	33/28	38,0	35,5	33,8	30,5	26,2	19,2
5/20	1/3	0,19/0,30	34/30	38,5	36,8	34,2	30,2	25,5	19,3
6/21	1/3	0,20/0,34	30/28	37,5	39,4	34,5	30,0	25,2	20,7
7/22	1/3	0,21/0,31	30/29	37,0	34,8	31,8	29,8	24,8	20,2
8/23	1/3	0,22/0,33	37/30	36,5	34,5	32,1	31,2	27,3	20,4
9/24	1/3	0,23/0,28	38/32	36,0	35,0	32,8	30,5	27,1	20,5
10/25	1/3	0,24/0,26	30/33	35,8	34,4	32,5	32,0	26,8	20,7
11/26	2/3	0,20/0,24	32/34	41,5	34,2	31,6	31,5	26,6	18,6
12/27	2/3	0,22/0,15	28/36	41,0	35,6	32,8	30,1	26,5	18,4
13/28	2/3	0,16/0,17	29/38	42,0	33,8	31,5	29,8	24,8	18,2
14/29	2/3	0,15/0,18	27/40	41,5	34,6	33,1	29,6	25,1	18,0
15/30	2/3	0,18/0,22	27/31	39,8	35,8	32,8	31,2	25,3	19,8

3.4. Приклад розрахунку до задачі №3.

Загальні вихідні дані відповідно п.3.3, тобто:

- параметри шершавості поверхні:
 - 1) валків $Ra_B=2,0$ мкм;
 - 2) штаби $Ra_{ш}=1,5$ мкм;
- марка сталі – 08КП;
- температура метала по клітям: $t_1=20^\circ\text{C}$, $t_2=40^\circ\text{C}$, $t_3=50^\circ\text{C}$, $t_4=60^\circ\text{C}$, $t_5=70^\circ\text{C}$, $t_6=80^\circ\text{C}$;
- тип мастила – пальмове масло, для якого $K_{mc}=0,83$.

Індивідуальні дані:

Для всіх клітей прийняті, виходячи із умов зменшення пластичності металу по ходу прокатки і рівномірності завантаження електродвигунів клітей, слідуючи відносні обтиски по клітям стана:

$$\varepsilon_1=40\%, \varepsilon_2=35\%, \varepsilon_3=33\%, \varepsilon_4=30\%, \varepsilon_5=25\%, \varepsilon_6=20\%.$$

Товщина жерсті $h_6=0,20$ мм, колова швидкість валків кліті 6 $v_6=30,5$ м/с.

- 1) Розраховуємо товщину штаби і швидкості по клітям:
 $h_6=0,20$ мм

$$\begin{aligned}
h_5 &= h_6(1-\varepsilon_6) = 0,20(1-0,2) = 0,25 \text{ мм} \\
h_4 &= h_5(1-\varepsilon_5) = 0,25(1-0,25) = 0,333 \text{ мм} \\
h_3 &= h_4(1-\varepsilon_4) = 0,333(1-0,30) = 0,476 \text{ мм} \\
h_2 &= h_3(1-\varepsilon_3) = 0,476(1-0,33) = 0,710 \text{ мм} \\
h_1 &= h_2(1-\varepsilon_2) = 0,710(1-0,35) = 1,092 \text{ мм} \\
h_0 &= h_1(1-\varepsilon_1) = 1,092(1-0,4) = 1,82 \text{ мм}
\end{aligned}$$

Швидкості прокатки визначаємо за умовою постійності секундних об'ємів металу, яка при постійній ширині штаби, тобто для холодної прокатки на заданому стані записується у вигляді:

$$v_1 h_1 = v_2 h_2 = v_3 h_3 = v_4 h_4 = v_5 h_5 = v_6 h_6 = \text{const}$$

Звідки швидкості прокатки по клітям:

$$v_6 = 30,5 \text{ м/с}$$

$$v_5 = \frac{v_6 h_6}{h_5} = \frac{0,2 \cdot 30,5}{0,25} = 24,4 \text{ м/с}$$

$$v_4 = \frac{v_5 h_5}{h_4} = \frac{24,4 \cdot 0,25}{0,333} = 18,3 \text{ м/с}$$

$$v_3 = \frac{v_4 h_4}{h_3} = \frac{18,3 \cdot 0,333}{0,476} = 12,8 \text{ м/с}$$

$$v_2 = \frac{v_3 h_3}{h_2} = \frac{12,8 \cdot 0,476}{0,71} = 8,6 \text{ м/с}$$

$$v_1 = \frac{v_2 h_2}{h_1} = \frac{8,6 \cdot 0,71}{1,092} = 5,6 \text{ м/с}$$

2) Визначаємо базовий коефіцієнт тертя f_0 в кліті 1 за виразом (19), тому що $v_1 < 7,5 \text{ м/с}$, тобто:

$$\begin{aligned}
f_{01} &= 0,076 - 0,0019v_1 + 0,03(Ra_b - 0,6)[(1,07 - 0,14v_1)^3 + 0,054v - 0,26] \\
f_{01} &= 0,076 - 0,0019 \cdot 5,6 + 0,03(2 - 0,6)[(1,07 - 0,14 \cdot 5,6)^3 + \\
&+ 0,054 \cdot 5,6 - 0,26] = 0,068
\end{aligned}$$

для клітей 2,3,4,5 і 6 за виразом (19а) тому, що швидкість $v_1 > 7,5 \text{ м/с}$.

$$f_0 = K_v [0,062 - 0,005(Ra_b - 0,6)]$$

де K_v - визначаємо за виразом (20), тобто

$$K_v = 0,56 + 0,7(1 - 0,025v)^2$$

$$K_{v2} = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 8,6)^2 = 0,99$$

$$K_{v3} = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 12,8)^2 = 0,88$$

$$K_{v4} = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 18,3)^2 = 0,77$$

$$K_{v5} = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 24,4)^2 = 0,67$$

$$K_{v6} = 0,56 + 0,7(1 - 0,025 \cdot 30,5)^2 = 0,60$$

Таким чином:

$$f_{02} = 0,99[0,062 - 0,005(2,0 - 0,6)] = 0,054$$

$$f_{03} = 0,88[0,062 - 0,005(2,0 - 0,6)] = 0,048$$

$$f_{04} = 0,77[0,062 - 0,005(2,0 - 0,6)] = 0,042$$

$$f_{05} = 0,67[0,062 - 0,005(2,0 - 0,6)] = 0,037$$

$$f_{06} = 0,60[0,062 - 0,005(2,0 - 0,6)] = 0,033$$

3) Визначаємо параметричні коефіцієнти впливу окремих факторів технології на величину коефіцієнта тертя.

Коефіцієнт K_d , враховуючий Ra_b і відносного обтиску ε , визначаємо за виразом (21) тому, що $Ra_b = 2 \text{ мкм}$. Таким чином:

$$K_{di} = 0,47 + 1,75\varepsilon_i$$

де i – номер кліті.

Тобто :

$$K_{d1} = 0,47 + 1,75\varepsilon_1 = 0,47 + 1,75 \cdot 0,40 = 1,17$$

$$K_{d2} = 0,47 + 1,75\varepsilon_2 = 0,47 + 1,75 \cdot 0,35 = 1,08$$

$$K_{d3} = 0,47 + 1,75\varepsilon_3 = 0,47 + 1,75 \cdot 0,33 = 1,05$$

$$K_{d4} = 0,47 + 1,75\varepsilon_4 = 0,47 + 1,75 \cdot 0,40 = 1,00$$

$$K_{d5} = 0,47 + 1,75\varepsilon_5 = 0,47 + 1,75 \cdot 0,25 = 0,91$$

$$K_{d6} = 0,47 + 1,75\varepsilon_6 = 0,47 + 1,75 \cdot 0,20 = 0,82$$

Коефіцієнт, враховуючий вплив шершавості поверхні штаби для усіх шести клітей, визначаємо за виразом (24), тобто:

$$K_{uu} = 1,09 - 0,05Ra_{uu} = 1,09 - 0,05 \cdot 1,5 = 1,165$$

Коефіцієнт K_t , враховуючий вплив температури металу по клітям, визначаємо за виразом (25), тобто:

$$K_t = a + c(1,11 - 0,0044 t_m)^n$$

де $a_i = 0,31 + 1,7\varepsilon_i$;

ТАКИМ ЧИНОМ:

$$a_1 = 0,31 + 1,7\varepsilon_1 = 0,31 + 1,7 \cdot 0,4 = 0,99$$

$$a_2 = 0,31 + 1,7\varepsilon_2 = 0,31 + 1,7 \cdot 0,35 = 0,91$$

$$a_3 = 0,31 + 1,7\varepsilon_3 = 0,31 + 1,7 \cdot 0,33 = 0,87$$

$$a_4 = 0,31 + 1,7\varepsilon_4 = 0,31 + 1,7 \cdot 0,30 = 0,82$$

$$a_5 = 0,31 + 1,7\varepsilon_5 = 0,31 + 1,7 \cdot 0,25 = 0,74$$

$$a_6 = 0,31 + 1,7\varepsilon_6 = 0,31 + 1,7 \cdot 0,20 = 0,65$$

$$c_i = 1,2 - 2,8\varepsilon_i$$

ТАКИМ ЧИНОМ:

$$c_1 = 1,2 - 2,8 \cdot 0,4 = 0,08$$

$$c_2 = 1,2 - 2,8 \cdot 0,35 = 0,22$$

$$c_3 = 1,2 - 2,8 \cdot 0,33 = 0,28$$

$$c_4 = 1,2 - 2,8 \cdot 0,30 = 0,36$$

$$c_5 = 1,2 - 2,8 \cdot 0,25 = 0,50$$

$$c_6 = 1,2 - 2,8 \cdot 0,20 = 0,64$$

$$n_i = 3,84 - 5,7\varepsilon_i$$

ТАКИМ ЧИНОМ:

$$n_1 = 3,84 - 5,7\varepsilon_1 = 3,84 - 5,7 \cdot 0,4 = 1,56$$

$$n_2 = 3,84 - 5,7\varepsilon_2 = 3,84 - 5,7 \cdot 0,35 = 1,84$$

$$n_3 = 3,84 - 5,7\varepsilon_3 = 3,84 - 5,7 \cdot 0,33 = 1,96$$

$$n_4 = 3,84 - 5,7\varepsilon_4 = 3,84 - 5,7 \cdot 0,30 = 2,13$$

$$n_5 = 3,84 - 5,7\varepsilon_5 = 3,84 - 5,7 \cdot 0,25 = 2,41$$

$$n_6 = 3,84 - 5,7\varepsilon_6 = 3,84 - 5,7 \cdot 0,20 = 2,70$$

Тоді коефіцієнти K_t будуть дорівнювати:

$$K_{t1} = 0,99 + 0,08(1,11 - 0,0044 \cdot 20)^{1,56} = 1,073$$

$$K_{t2} = 0,91 + 0,22(1,11 - 0,0044 \cdot 40)^{1,84} = 1,104$$

$$K_{t3} = 0,87 + 0,28(1,11 - 0,0044 \cdot 50)^{1,96} = 1,093$$

$$K_{t4} = 0,82 + 0,36(1,11 - 0,0044 \cdot 60)^{2,13} = 1,072$$

$$K_{t5} = 0,74 + 0,50(1,11 - 0,0044 \cdot 70)^{2,41} = 1,034$$

$$K_{t6} = 0,65 + 0,64(1,11 - 0,0044 \cdot 80)^{2,70} = 0,953$$

Коефіцієнт тертя розраховуємо по формулі (18):

$$f_i = f_{0i} \cdot K_{di} \cdot K_{ui} \cdot K_{MCi} \cdot K_{ti}$$

Таким чином, підставляючи відповідні числові значення, матимемо:

$$\begin{aligned} f_1 &= f_{01} \cdot K_{d1} \cdot K_{u1} \cdot K_{MC1} \cdot K_{t1} = \\ &= 0,068 \cdot 1,17 \cdot 1,165 \cdot 0,83 \cdot 1,073 = 0,083 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_2 &= f_{02} \cdot K_{d2} \cdot K_{u2} \cdot K_{MC2} \cdot K_{t2} = \\ &= 0,054 \cdot 1,08 \cdot 1,165 \cdot 0,83 \cdot 1,104 = 0,062 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_3 &= f_{03} \cdot K_{d3} \cdot K_{u3} \cdot K_{MC3} \cdot K_{t3} = \\ &= 0,048 \cdot 1,05 \cdot 1,165 \cdot 0,83 \cdot 1,093 = 0,053 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_4 &= f_{04} \cdot K_{d4} \cdot K_{u4} \cdot K_{MC4} \cdot K_{t4} = \\ &= 0,042 \cdot 1,0 \cdot 1,165 \cdot 0,83 \cdot 1,072 = 0,044 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_5 &= f_{05} \cdot K_{d5} \cdot K_{u5} \cdot K_{MC5} \cdot K_{t5} = \\ &= 0,037 \cdot 0,91 \cdot 1,165 \cdot 0,83 \cdot 1,034 = 0,034 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_6 &= f_{06} \cdot K_{d6} \cdot K_{u6} \cdot K_{MC6} \cdot K_{t6} = \\ &= 0,033 \cdot 0,82 \cdot 1,165 \cdot 0,83 \cdot 0,953 = 0,025 \end{aligned}$$

Показники тертя визначаємо за виразом (27):

$$f_{ni} = 1,6 f_i - 0,018$$

тобто

$$f_{n1} = 1,6 f_1 - 0,018 = 1,6 \cdot 0,083 - 0,018 = 0,115$$

$$f_{n2} = 1,6 f_2 - 0,018 = 1,6 \cdot 0,062 - 0,018 = 0,081$$

$$f_{n3} = 1,6 f_3 - 0,018 = 1,6 \cdot 0,053 - 0,018 = 0,067$$

$$f_{n4} = 1,6 f_4 - 0,018 = 1,6 \cdot 0,044 - 0,018 = 0,052$$

$$f_{n5} = 1,6 f_5 - 0,018 = 1,6 \cdot 0,034 - 0,018 = 0,036$$

$$f_{n6} = 1,6 f_6 - 0,018 = 1,6 \cdot 0,025 - 0,018 = 0,022$$

Результати розрахунків зводимо до таблиці 7.

За даними таблиці 7 будуюмо графіки:

$f_0, f, f_n = \text{функція}(v)$ (див. рис. 2).

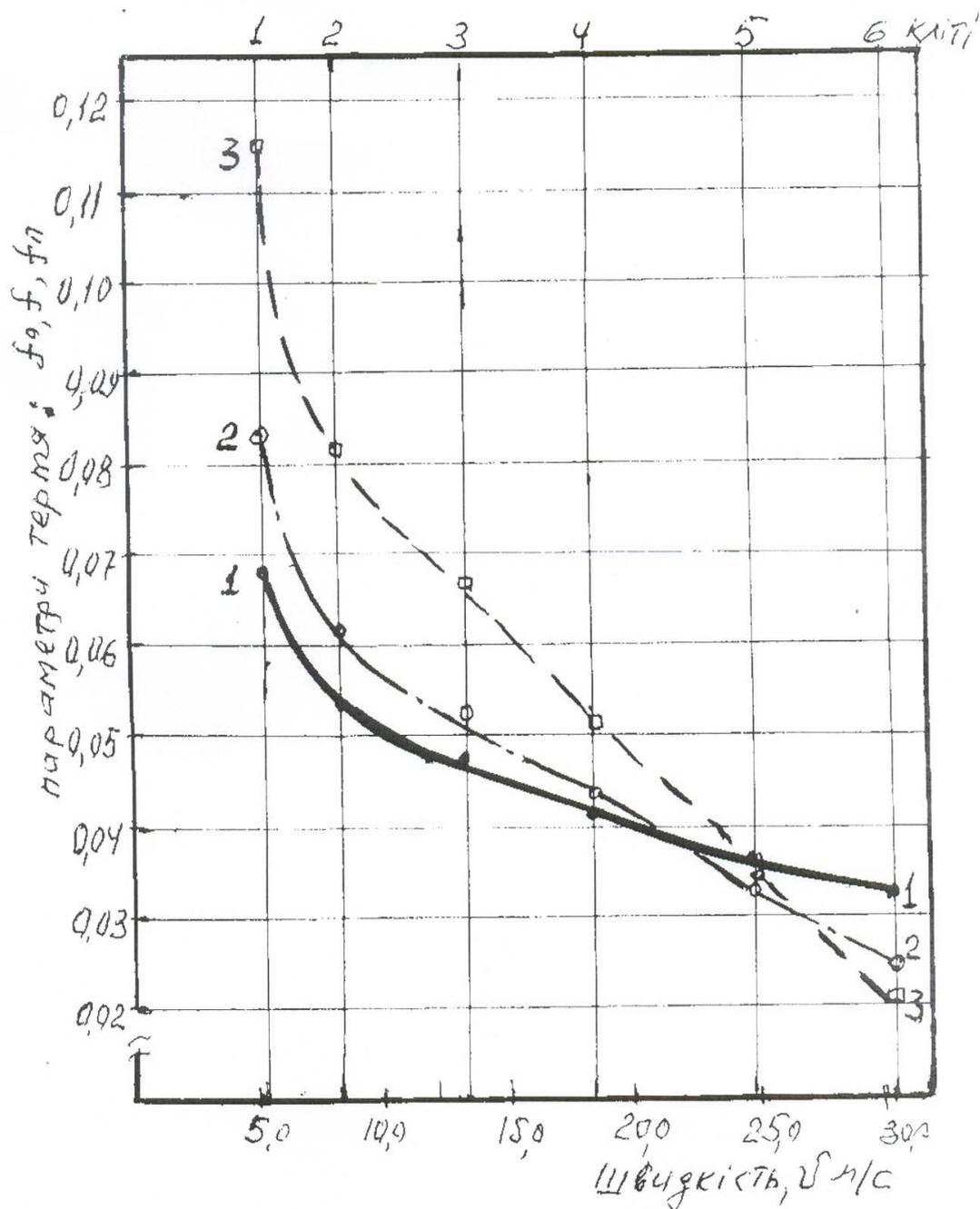


Рис.2. Залежність параметрів тертя від швидкості холодної прокатки жерсті товщиною 0,20 мм з мастилом – пальмове масло: 1 – коефіцієнт тертя f_0 , базовий; 2 – коефіцієнт тертя; 3 – показник тертя f_n .

Таблиця 7. Результати визначення параметрів тертя на шести клітьовому стані ХП жерсті.

№№ кліті	Товщина h_i , мм	Обтиск ε_i , %	Швидкість v_i , м/с	Температура метала, t_i	Параметри тертя		
					f_0	f	f_n
1	1,092	40	5,6	20	0,068	0,083	0,115
2	0,710	35	8,6	40	0,054	0,062	0,081
3	0,476	33	12,8	50	0,048	0,053	0,067
4	0,333	30	18,3	60	0,042	0,044	0,052
5	0,250	25	24,4	70	0,037	0,034	0,036
6	0,230	20	30,5	80	0,033	0,025	0,022

По табл.7 і рис.2 зробити висновки.

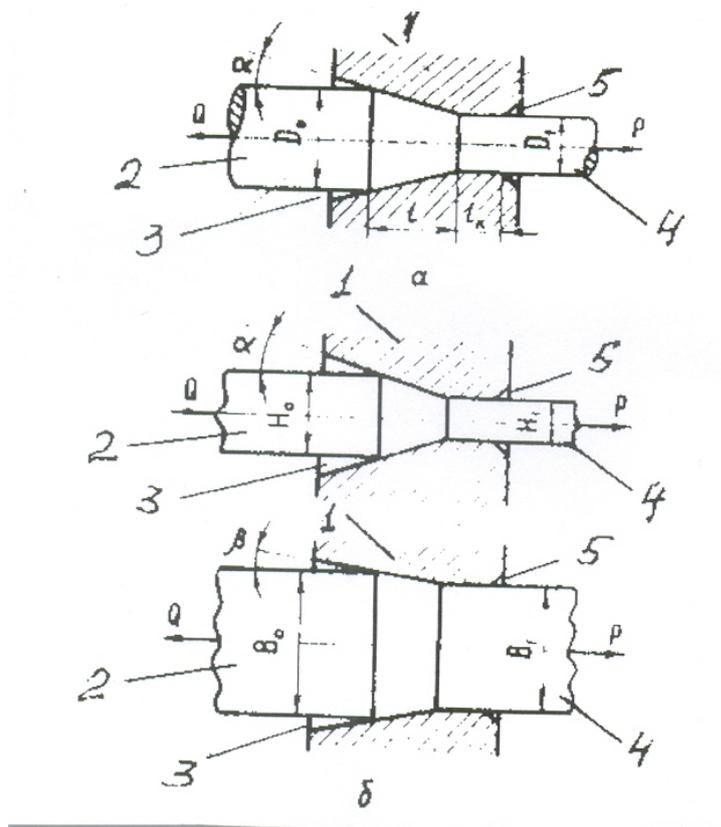
4. Визначення параметрів тертя та змащування при волочінні метала.

4.1. Умови тертя під час волочіння метала з мастилом.

Під час волочіння круглого або прямокутного профілю попередньо загострений передній кінець штаби проштовхується через робочий канал волоки, а потім протягується через волоку силою волочіння P (рис.3). В процесі волочіння діаметр круглого профілю зменшується з початкової величини D_0 до кінцевої – D_1 (а на рис.3). При волочінні прямокутних профілів (б на рис.3) товщина H_0 і ширина заготовки B_0 зменшуються відповідно до H_1 і B_1 . При цьому, завдяки зменшенню площі поперечного перерізу, збільшується довжина протягнутого профілю і швидкість металу на виході із робочого каналу волоки.

Під час протягування через волоку метал, деформується в холодному стані, зміцнюється внаслідок нагартування. Для зменшення сил тертя, виникаючих на контактні поверхні профілю і каналу волоки, тобто в осередку деформації, застосовують технологічне мастило, Мастило подають у волоку зі сторони входу метала в канал. Затягування мастила в осередок деформації полегшується завдяки вхідній розпушці

канала волоки. За рахунок зниження сил контактного тертя, тобто завдяки технологічному мастилу, зменшують силу волочіння P , отримують на протягнутих профілях гладеньку блискучу поверхню та зменшують зношування робочого каналу волоки. Окрім того, технологічне мастило дозволяє вести процес волочіння на підвищених швидкостях і з великими обтисками метала.



P – сила волочіння;
 Q – сила протитягу;
 l – довжина робочого конуса волоки;
 l_k – довжина калібруючого пояса.

Рис.3. Схема волочіння круглого (а) і прямокутного (б) профілю: 1 – волока; 2 – заготовка; 3 – вхідна розпушка; 4 – протягнутий профіль; 5 – вихідна розпушка.

Тип технологічного мастила, в основному, залежить від діаметра і матеріала деформуємого дрота, вибирається дослідним шляхом. При дослідіах ефективність мастила визначають шляхом виміру зусиль та розрахунку напруг волочіння і коефіцієнтів тертя. Чим менші напруги волочіння і коефіцієнти тертя, тим більш ефективним є мастило. Однією із умов застосування того чи іншого типу мастила є схоплення мастила із поверхнею дрота. Для полегшення адсорбції

мастила на поверхні дротів спочатку метал спеціально покривають підмастильним шаром шляхом оміднювання, фосфатування, а потім замочування у мильній емульсії.

Мастила для волочіння поділяють на типи [7]:

- тверді: вапнякові, фосфатні, висушена оліфа у вигляді масляної плівки та металеві покриття із свинцю або міді;
- порошкоподібні: порошки натрієвого мила і графіту;
- густі желеподібні: солі жирних кислот, тверді жири, мінеральні масла вапор і мазут; гідрогенізовані або полімерізовані рослинні масла і бджолиний віск для волочіння срібла, золота і платини;
- рідкі: легкі мінеральні масла (машинне, трансформаторне, індустріальне та ін.); емульсії на основі порошку натрієвого мила, мінерального масла або синтетичних жирних кислот.

Наведемо деякі приклади застосування мастила у найбільш поширених процесах волочіння.

При волочінні алюмінієвого дроту і труб, поверхня яких не утворює адсорбційного шару, застосовують високов'язкі мастила, такі як вапор Т, мазут і мастила, які складаються із 70-95% мінерального масла індустріальне та загусника полізобутілена.

Бунтове волочіння сталевих дротів діаметрами 1-14 мм виконують з технічним мастилом – порошок натрієвого мила. Дроти діаметром менше 1 мм (волочіння із ковзанням) протягують з рідкими технологічними мастилами.

Таблиця 8. Розрахункові значення коефіцієнта тертя, отримані зворотнім перерахунком по силі волочіння P при протягуванні дроту з мастилом – порошок натрієвого мила.

Матеріал дроту	Коефіцієнт тертя, f	
	по формулі Перліна	по формулі Зібеля
Сталь маловуглецева	0,05-0,06	0,07-0,09
Сталь нержавіюча	0,07-0,08	0,095-0,115

Коефіцієнт тертя визначають методом зворотнього перерахунку напруги волочіння по теоретичним формулам. Для орієнтації при вирішенні задачі №4 в табл.8 наведені коефіцієнти тертя, визначені вищевказаним методом.

4.2. Алгоритм розрахунку коефіцієнта тертя при протягуванні дроту на багатократному волочильному стані.

Схема процесу багатократного волочіння наведена на рис.4.

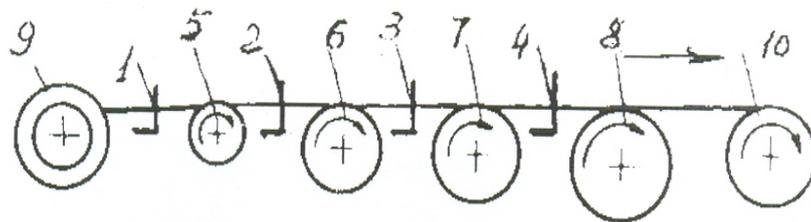


Рис.4. Схема волочіння на чотирикратному стані: 1,2,3 і 4 – порядкові номери волок; 5,6,7 і 8 – порядкові номери тягнучих барабанів; 9 і 10 – відповідно розмотувальна вхідна та змотувальна вихідна катушка; стрілка – напрямок волочіння.

Позначимо діаметри дроту:

на вході відповідно у волоки 1,2,3 і 4:

$$d_0, d_1, d_2, d_3;$$

на виході із волок відповідно 1,2,3 і 4:

$$d_1, d_2, d_3, d_4.$$

Тоді коефіцієнти витяжки металу μ відповідно у волоках 1,2,3 і 4 будуть дорівнювати:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= F_0 / F_1 \\ \mu_2 &= F_1 / F_2 \\ \mu_3 &= F_2 / F_3 \\ \mu_4 &= F_3 / F_4 \end{aligned} \quad (28)$$

де F_i – площа поперечного перерізу дроту на вході в i -ту волоку;

F_i – те ж саме на виході із відповідної волоки;

i – порядковий номер волоки.
Виразимо площі через діаметри:

$$\begin{aligned} F_0 &= \pi d_0^2 / 4; \\ F_1 &= \pi d_1^2 / 4; \\ F_2 &= \pi d_2^2 / 4; \\ F_3 &= \pi d_3^2 / 4; \\ F_4 &= \pi d_4^2 / 4. \end{aligned} \quad (29)$$

Скориставшись (29) із (28) отримаємо:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= d_0^2 / d_1^2; \\ \mu_2 &= d_1^2 / d_2^2; \\ \mu_3 &= d_2^2 / d_3^2; \\ \mu_4 &= d_3^2 / d_4^2. \end{aligned} \quad (30)$$

або в загальному вигляді для стана i -кратного волочіння:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= d_0^2 / d_1^2; \\ \mu_2 &= d_1^2 / d_2^2; \\ &\dots\dots\dots \\ \mu_i &= d_{i-1}^2 / d_i^2. \end{aligned} \quad (31)$$

Для синхронізації роботи тягнучих барабанів волочильних барабанів, коефіцієнти витяжки і швидкості волочіння вибирають із умови постійності секундних об'ємів металу в кожен даний момент протягування дроту, тобто для стана, наведеного на мал.4:

$$F_1 v_1 = F_2 v_2 = F_3 v_3 = F_4 v_4 \quad (32)$$

де F_1, F_2, F_3, F_4 - площі поперечних перерізів дроту на виході із волок 1,2,3,4;

v_1, v_2, v_3, v_4 - швидкості металу на виході відповідно із волок 1,2,3 і 4.

Вираз (32) для стана i -кратного волочіння записується у вигляді:

$$F_1 v_1 = F_2 v_2 = \dots = F_i v_i \quad (33)$$

перемноживши праві і ліві частини виразів (30), отримаємо:

$$\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \mu_4 = \frac{d_0^2}{d_1^2} \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot \frac{d_2^2}{d_3^2} \cdot \frac{d_3^2}{d_4^2} \quad (34)$$

де

$$\mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \mu_4 = \mu_{\Sigma} \quad (35)$$

де μ_{Σ} - підсумкова загальна витяжка дроту при волочінні через усі волокни.

Провівши скорочення в правій частині (34), із (34) і (35) отримаємо:

$$\mu_{\Sigma} = \frac{d_0^2}{d_4^2} \quad (36)$$

або в загальному вигляді для і-кратного стана:

$$\mu_{\Sigma} = d_0^2 / d_i^2 \quad (37)$$

Коефіцієнти витяжки металу за перехід μ , кут волочіння α вибирається в залежності від діаметра дроту по практичним даним (табл.9).

Таблиця 9. Параметри волочіння дроту із вуглецевих і нержавіючих сталей [8]:

Сталь	Діаметр дроту на виході із волокни, мм	Коефіцієнт витяжки За перехід		Напівкут волочіння α , град	
		сталь вуглецева	сталь нержавіюча	сталь вуглецева	сталь нержавіюча
Мало- і середньо-вуглецева	0,2-0,5	1,14-1,32	1,12-1,22	3-4	2-4
	0,6-1,0	1,16-1,35	1,15-1,25	4-5	3-5
	1,2-2,0	1,19-1,37	1,18-1,30	5-6	4-6
	2,1-3,0	1,22-1,41	1,20-1,35	6-7	5-7
	3,1-5,0	1,25-1,43	1,22-1,38	7-8	6-8
	5,2-7,3	1,28-1,51	1,25-1,40	8-10	7-9

Вибравши витяжки для заданого профіля діаметром d_i та знаючи кількість барабанів (волок) стана, визначають μ_{Σ} по виразу (35) і діаметр гарячекатаного дроту (заготовки) із (36).

$$d_0 = \sqrt{\mu_{\Sigma} d_i^2} \quad (38)$$

Вимірявши сили волочіння в кожній із волок визначають напругу волочіння $\sigma_{вл.i}$:

$$\sigma_{вл.i} = P_i / F_{i1} = 4P_i / \pi d_i^2 \quad (39)$$

Користуючись теоретичними формулами Зібеля для визначення напруги волочіння, отримана формула для розрахунку коефіцієнта тертя f :

Формула Зібеля:

$$f = \left(\frac{\sigma_{вл} / \sigma_{Tcp} - 0,67\alpha}{\varepsilon} - 1 \right) \cdot \alpha \quad (40)$$

де $\sigma_{вл}$ - напруга волочіння, визначена по (38) Мпа (Н/мм²);

σ_{Tcp} - середня границя текучості метала в осередку деформації, Мпа (Н/мм²);

ε - відносний обтиск метала

α - напівкут робочого конуса (по табл.9).

Відносний обтиск при волочінні ε визначають по співвідношенню:

$$\varepsilon = \frac{F_{i-1} - F_i}{F_{i-1}} \quad (41)$$

де F_{i-1} і F_i – площа поперечного перерізу дроту відповідно на вході і на виході із волоки.

Підставивши значення площ відповідних перерізів ($F = \pi d^2 / 4$), скоротивши подібні члени і провівши почленне ділення, отримаємо:

$$\varepsilon = \frac{\pi d_{i-1}^2 / 4 - \pi d_i^2 / 4}{\pi d_{i-1}^2} = \left(1 - \frac{d_i^2}{d_{i-1}^2} \right) \quad (42)$$

Середню границю текучості σ_{Tcp} в осередку деформації σ_{Tcp} під час волочіння визначають за формулою:

$$\sigma_{Tcp_i} = \sigma_{T_{i-1}} + 0,67 (\sigma_{T_{i-1}} - \sigma_{T_i}) \quad (43)$$

де $\sigma_{T_{i-1}}$ - границя текучості металу перед волокою

σ_{T_i} - границя текучості після протягування металу через волоку.

Границі текучості можливо визначати доволі складним розрахунковим методом по хімічному складу металу. Доволі просто границя текучості визначається по графікам зміцнювання металу під час деформації. На рис.5 наведені дані автора [9], отримані для маловуглецевих (Ст.08, 08ПС, 08Ю, 08ПСН, Ст.0, Ст.1ПС) і нержавіючої сталі (12Х18Н10Т).

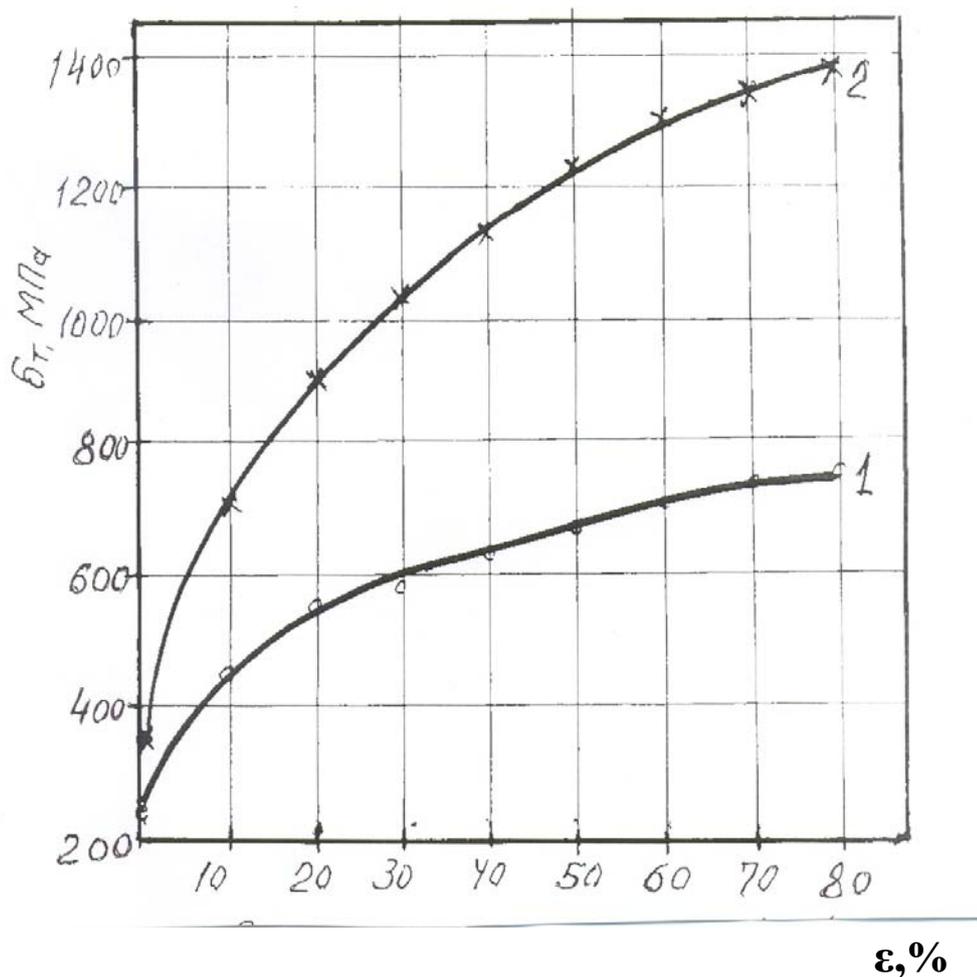


Рис. 5. Залежність границі текучості σ_T від відносного обтиску ϵ : 1-маловуглецева сталь, 2-нержавіюча сталь.

Користування графіком рис.5 буде пояснено далі в прикладі вирішення задачі №4.

4.3. Варіанти завдань до задачі №4.

Визначити коефіцієнт тертя по формулі Зібеля під час холодного волочіння дроту діаметром d_6 на п'ятикратному стані з твердим мастилом – порошок натрієвого мила за заданих сил волочіння $P_1 P_2 P_3 P_4 P_5$. Варіанти 1-15 сталь маловуглецева, 16-30 сталь нержавіюча.

Інші дані: $d_0, \mu_i, \varepsilon_i, \alpha_i, \alpha_{ni}, \sigma_{Ti}$ визначаються по методиці алгоритма розрахунку (див.п.4.2)

Таблиця 10. Індивідуальні (по варіантам) вихідні дані до задачі №4.

№№ варіанта	Діаметр готового дроби d_6 , мм	Сила волочіння, кН				
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
1/16	0,20/1,00	0,6/1,7	0,5/1,5	0,4/1,4	0,3/1,3	0,2/1,2
2/17	0,35/1,10	0,7/2,0	0,6/1,8	0,5/1,5	0,4/1,4	0,3/1,3
3/18	0,50/1,20	0,8/2,2	0,7/2,0	0,6/1,7	0,5/1,6	0,4/1,5
4/19	0,65/1,30	0,9/2,5	0,8/2,3	0,7/2,0	0,6/1,8	0,5/1,6
5/20	0,70/1,40	1,0/2,7	0,9/2,4	0,8/2,1	0,7/1,9	0,6/1,7
6/21	0,30/1,50	0,9/3,0	0,7/2,8	0,6/2,5	0,5/2,0	0,3/1,9
7/22	0,40/1,60	1,0/3,2	0,8/3,0	0,6/2,7	0,4/2,5	0,3/2,1
8/23	0,60/1,70	1,0/3,5	0,9/3,3	0,8/3,0	0,6/2,8	0,4/2,5
9/24	0,80/1,80	1,1/3,8	1,0/3,5	0,9/3,1	0,8/3,0	0,7/2,7
10/25	0,90/1,90	1,2/4,0	1,1/3,8	1,0/3,5	0,8/3,1	0,6/2,8
11/26	1,00/2,00	1,3/5,0	1,0/4,5	0,9/2,2	0,8/4,0	0,7/3,5
12/27	1,10/1,55	1,4/3,1	1,2/2,9	1,0/2,7	0,8/2,5	0,7/2,0
13/28	1,20/1,85	1,6/4,0	1,4/3,7	1,2/3,5	1,0/3,3	0,8/3,0
14/29	1,30/1,65	1,8/3,5	1,5/3,2	1,3/3,0	1,1/2,7	0,9/2,5
15/30	1,40/1,75	2,0/3,8	1,7/3,5	1,5/3,0	1,2/2,5	1,0/2,0

4.4. Приклад розрахунку до задачі №4.

Визначити коефіцієнт тертя по формулі Зібеля під час холодного волочіння дроту діаметром $d_5=1,45$ мм із нержавіючої сталі на мастилі – порошок натрієвого мила при

силах волочіння: $P_1=3,0\text{кН}$; $P_2=2,8\text{кН}$; $P_3=2,6\text{кН}$; $P_4=2,4\text{кН}$; $P_5=2,1\text{кН}$.

1. Визначаємо розмірні і геометричні параметри волочіння:

Попередньо по табл.9 вибираємо коефіцієнти витяжки по переходам: $\mu_5 = 1,20$; $\mu_4 = 1,25$; $\mu_3 = 1,30$; $\mu_2 = 1,35$; $\mu_1 = 1,40$;

По формулі (35) визначаємо сумарний коефіцієнт витяжки μ_Σ :

$$\mu_\Sigma = \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \cdot \mu_4 \cdot \mu_5 = 1,40 \cdot 1,35 \cdot 1,30 \cdot 1,25 \cdot 1,20 = 3,6855$$

По формулі (37) визначаємо діаметр заготовки d_0 :

$$d_0 = \sqrt{\mu_\Sigma \cdot d_5^2} = \sqrt{3,6855 \cdot 1,45^2} = 2,78\text{мм}$$

Користуючись виразом (31) визначаємо діаметри дроту по переходам:

$$d_1 = \sqrt{\frac{d_0^2}{\mu_1}} = \sqrt{\frac{2,78^2}{1,4}} = 2,35\text{ мм}$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{d_1^2}{\mu_2}} = \sqrt{\frac{2,35^2}{1,35}} = 2,62\text{ мм}$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{d_2^2}{\mu_3}} = \sqrt{\frac{2,02^2}{1,3}} = 1,77\text{ мм}$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{d_3^2}{\mu_4}} = \sqrt{\frac{1,77^2}{1,25}} = 1,59\text{ мм}$$

$$d_5 = \sqrt{\frac{d_4^2}{\mu_5}} = \sqrt{\frac{1,59^2}{1,2}} = 1,45\text{ мм}$$

2. Відповідно розрахованим діаметром із табл.9 для нержавіючої сталі вибираємо напівкут робочого каналу волок $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 5^\circ$ або $0,0436$ радіан.

3. Визначаємо відносні обтиски по переходам 1-5 по формулі (42):

$$\varepsilon_1 = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_0^2}\right) = \left(1 - \frac{2,35^2}{2,78^2}\right) = 0,29$$

$$\varepsilon_2 = \left(1 - \frac{2,02^2}{2,35^2}\right) = 0,26$$

$$\varepsilon_3 = \left(1 - \frac{1,77^2}{2,02^2}\right) = 0,23$$

$$\varepsilon_4 = \left(1 - \frac{1,59^2}{1,77^2}\right) = 0,20$$

$$\varepsilon_5 = \left(1 - \frac{1,45^2}{1,59^2}\right) = 0,17$$

4. Визначаємо напруження волочіння $\sigma_{вл}$ по формулі (43):

$$\sigma_{вл1} = 4P_1 / \pi d_1^2 = 4 \cdot 3 \cdot 10^3 / 3,14 \cdot 2,35^2 = 692,3 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{вл2} = 4 \cdot 2,8 \cdot 10^3 / 3,14 \cdot 2,02^2 = 874,2 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{вл3} = 4 \cdot 2,6 \cdot 10^3 / 3,14 \cdot 1,77^2 = 1058,2 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{вл4} = 4 \cdot 2,4 \cdot 10^3 / 3,14 \cdot 1,59^2 = 1208,4 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{вл5} = 4 \cdot 2,1 \cdot 10^3 / 3,14 \cdot 1,45^2 = 1273,9 \text{ МПа}$$

5. Визначаємо середню границю плинності $\sigma_{T_{cp}}$, користуючись графіком для нержавіючої сталі на рис.5 і формулою (43):

$$\sigma_{T_{cp1}} = \sigma_{T_0} + 0,67(\sigma_{T_1} - \sigma_{T_0}) = 350 + 0,67(1010 - 350) = 792 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{T_2} = 1010 + 0,67(1198 - 1010) = 1136 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{T_{cp3}} = 1198 + 0,67(1298 - 1198) = 1265 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{T_{cp4}} = 1298 + 0,67(1338 - 1298) = 1325 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{T_{cp5}} = 1398 + 0,67(1360 - 1388) = 1353 \text{ МПа}$$

6. Визначаємо коефіцієнти тертя по формулі Зібеля:

$$f_1 = \left(\frac{\sigma_{вл1} / \sigma_{T_{cp1}} - 0,67\alpha}{\varepsilon_1} - 1 \right) \cdot \alpha = \left(\frac{692,3 / 792 - 0,67 \cdot 0,0436}{0,29} - 1 \right) \cdot \alpha = 0,083$$

$$f_2 = \left(\frac{974,2 / 1136 - 0,67 \cdot 0,0486}{0,26} - 1 \right) \cdot 0,0436 = 0,076$$

$$f_3 = \left(\frac{1058,2 / 1265 - 0,67 \cdot 0,0486}{0,23} - 1 \right) \cdot 0,0436 = 0,109$$

$$f_4 = \left(\frac{1208,4 / 1325 - 0,67 \cdot 0,0486}{0,20} - 1 \right) \cdot 0,0436 = 0,149$$

$$f_5 = \left(\frac{1273,9/1353 - 0,67 \cdot 0,0486}{0,17} - 1 \right) \cdot 0,0436 = 0,190$$

7. Визначаємо сумарний обтиск під час волочіння від першого до п'ятого переходу по формулі (42):

$$\varepsilon_{1\Sigma} = \varepsilon_1 = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_0^2} \right) = \left(1 - \frac{2,35^2}{2,78^2} \right) = 0,29$$

$$\varepsilon_{2\Sigma} = \left(1 - \frac{d_2^2}{d_0^2} \right) = \left(1 - \frac{2,02^2}{2,78^2} \right) = 0,47$$

$$\varepsilon_{3\Sigma} = \left(1 - \frac{d_3^2}{d_0^2} \right) = \left(1 - \frac{1,77^2}{2,78^2} \right) = 0,60$$

$$\varepsilon_{4\Sigma} = \left(1 - \frac{d_4^2}{d_0^2} \right) = \left(1 - \frac{1,59^2}{2,78^2} \right) = 0,67$$

$$\varepsilon_{5\Sigma} = \left(1 - \frac{d_5^2}{d_0^2} \right) = \left(1 - \frac{1,45^2}{2,78^2} \right) = 0,73$$

Будуємо графік f =функція ε_{Σ} і d_i .

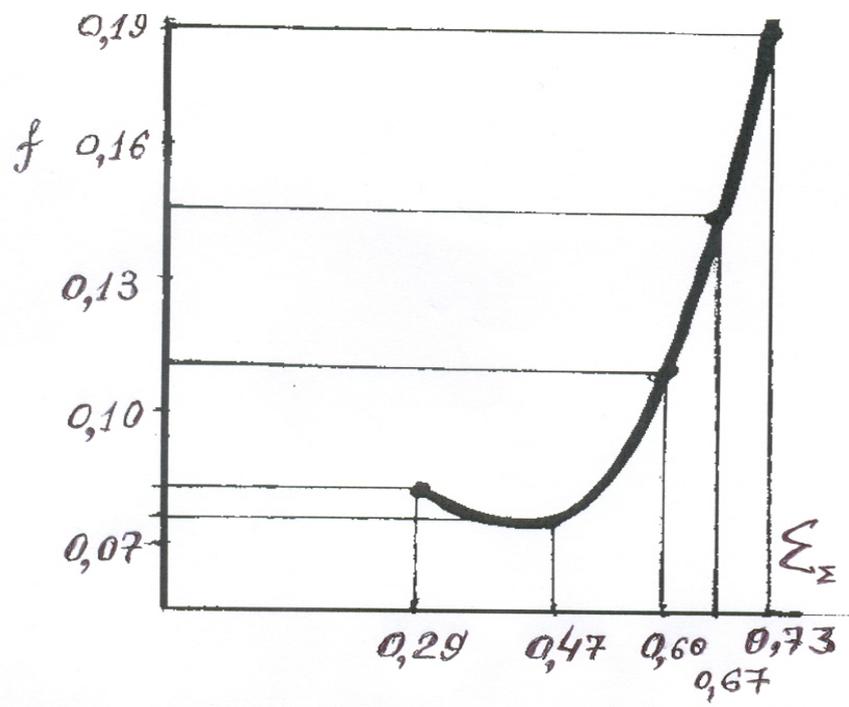


Рис.6. Залежність коефіцієнта тертя f від сумарного відносного обтиску під час волочіння дроту із нержавіючої сталі.

Висновок зробити самостійно і пояснити отримані результати.

Використана література

1. Теория прокатки. Справочник. / А.И. Целиков, А.Д. Гонлёнов, В.И. Зюзин и др. – М.: Metallurgy, 1982 – 335с.
2. В.А. Николаев. Теория процессов прокатки. / Запорожье: Издательство ЗГИА, 2001 – 188с.
3. Грудев А.П., Тилик В.Г. Технологические смазки в прокатном производстве. – М.: Metallurgy, 1975 – 368с.
4. Николаев В.А. Трение и технологические смазки при прокатке. / Запорожье: Издательство ЗГИА, 2002 – 114с.
5. В.А Николаев. Холодная прокатка полос. / Запорожье: Издательство ЗГИА, 2003 – 126с.
6. Холодная прокатка и отделка жести. / А.Ф. Пименов, О.Н. Сосковец, В.Л. Мазур и др. – М.: Metallurgy, 1983 – 208с.
7. В.О. Николаев. Технологія волочіння металу./ Запоріжжя. ЗДІА, 2000 – 155с.
8. Зиков Ю.С. Методичні вказівки до розрахунків параметрів волочіння круглих профілів. / Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 1997 – 46с.
9. Ксензук Ф.А., Трощенко Н.А., Прищип Н.И. Вальцовщик станов холодной прокатки. – М.: Metallurgy, 1969 – 256с.

Зміст

1. Визначення коефіцієнта тертя під час захоплення металу валками в процесі гарячої прокатки.....	3
1.1. Загальні відомості.....	3
1.2. Задача №1 і варіанти завдань.....	3
1.3. Алгоритм і приклад розрахунку задачі №1.....	4
2. Визначення коефіцієнта тертя в усталеній стадії гарячої прокатки.....	6
2.1. Загальні відомості.....	6
2.2. Алгоритм розрахунку коефіцієнта тертя в процесі гарячої прокатки.....	7
2.3. Вихідні дані (по варіантам) для розрахунку параметрів тертя під час гарячої прокатки.....	8
2.4. Приклад розрахунку до задачі №2.....	9
3. Визначення параметрів тертя і змащування під час холодної прокатки.....	12
3.1. Закономірності тертя при холодній прокатці.....	12
3.2. Алгоритм розрахунку коефіцієнта тертя під час холодної прокатки.....	15
3.3. Варіанти вихідних даних для розрахунку коефіцієнта і показника тертя в процесі холодної прокатки. (Задача №3).....	17
3.4. Приклад розрахунку до задачі №3.....	18
4. Визначення параметрів тертя та змащування при волочінні металу.....	24
4.1. Умови тертя та змащування під час волочіння металу з мастилом.....	24
4.2. Алгоритм розрахунку коефіцієнта тертя при протягуванні дроту на багатократному волочільному стані.....	27
4.3. Варіанти завдань до задачі №4.....	32
4.4. Приклад розрахунку до задачі №4.....	32
Використана література.....	36