

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни
«Теорія чисельного моделювання пластичної деформації»

Розглянуто і схвалено
на засіданні кафедри автоматизованих
металургійних машин та обладнання
Протокол № 16 от 09.10.2019

Краматорськ 2019

УДК 621.771

Теорія чисельного моделювання пластичної деформації: методичні вказівки до практичних занять для магістрів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізація «Інжиніринг автоматизованих машин і агрегатів» / уклад. : В. А. Федоринів. - Краматорськ: ДДМА, 2019. - 20 с.

Викладено короткі теоретичні відомості та методики виконання розрахунків енергосилових параметрів різних процесів обробки металів тиском, а також завдання та контрольні питання для підготовки до занять.

Укладачі В. А. Федоринів, проф.

Відп. за випуск В. І. Чередниченко, лаб.

1 Загальні вказівки

Практичні заняття з дисципліни «Теорія обробки металів тиском» проводяться після теоретичної опрацювання матеріалу на лекціях або самостійного опрацювання студентами окремих розділів дисципліни і спрямовані на вирішення конкретних технологічних завдань, які стоять при проектуванні процесів обробки тиском.

При вирішенні конкретних завдань крім використовуваних методик студенти повинні бути ознайомлені з іншими можливими методами рішення, при цьому необхідно давати оцінку їх точності.

При опрацюванні розділів дисципліни студентам необхідно самостійно вивчати основні положення і методики розрахунків в теорії обробки металів тиском на додаток до матеріалу, розглянутого під час аудиторних занять.

2 Практичне заняття

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ ЛИСТІВ І СМУГ

Мета заняття - закріплення теоретичного матеріалу, набуття практичних навичок з розрахунку енергосилових параметрів процесу гарячої прокатки листів і смуг.

2.1 Теоретичні відомості

До основних енергосилових параметрів процесу прокатки листів і смуг відносять: силу прокатки P , момент прокатки $M_{пр}$, потужність прокатки N , а також значення переднього T_1 і заднього T_0 натяжінь.

Вихідними параметрами для розрахунків є: матеріал прокату, радіус робочих валків R , товщина металу до прокатки h_0 і після прокатки h_1 , ширина металу (листа, смуги) до прокатки b_0 , швидкість прокатки $V_{пр}$, температура прокатки t , коефіцієнт тертя в осередку деформації μ , переднє T_1 і заднє T_0 натягу або напруги переднього σ_1 і заднього σ_0 натяжений [1]. Рівень переднього і заднього натяжений можуть характеризувати також коефіцієнти натяжений: переднього - $\sigma_1 / 2K_c$; заднього - $\sigma_0 / 2K_c$,

де $2K_c$ - середнє (або середньоінтегральної) по довжині осередку деформації подвоєне опір металу чистому зрушення.

Для випадку плоскодеформірованого стану (випадок прокатки широких листів і смуг):

$$2K_c = 1,15 \sigma_{\phi} \quad (2.1)$$

У загальному випадку значення σ_{ϕ} визначається механічними властивостями (фізичною межею плинності σ_T) матеріалу і залежить від ступеня (ϵ), швидкості деформації (U) і від температури (t)

$$\sigma_{\phi} = \sigma_T k_t k_{\epsilon} k_u, \quad (2.2)$$

де k_t , k_{ϵ} , k_u - коефіцієнти, що враховують вплив температури, ступеня і швидкості деформації.

При гарячій деформації важливою умовою реалізації процесу є те, щоб швидкість рекристалізації була вищою за швидкість деформації. В цьому випадку зміцнення не встигає відбутися, і метал зберігає пластичні властивості. Таким чином, при гарячій деформації основний вплив на величину σ_{ϕ} надає температура і швидкість деформації.

Серед формул для визначення середньоінтегральної значення фактичної межі текучості при гарячій деформації найбільш часто використовують у вирішенні завдань гарячої прокатки формулу Андреюка [2]:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{T0} \cdot U^{a_1} \cdot \left(\frac{20}{3}\epsilon\right)^{a_2} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{a_3}, \quad (2.3)$$

де U - швидкість деформації;

σ_{T0} - значення межі текучості матеріалу при $U = 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; $\epsilon = 0,1$; $t = 10000\text{С}$ (табл. 2.1);

ϵ - відносне обтиснення;

a_1, a_2, a_3 - енергетичні коефіцієнти (див. табл.2.1).

Таблиця 2.1 - Розрахункові величини, що враховують опір деформації сталей і сплавів

Материал	σ_{T0}	a_1	a_2	a_3
Ст 3 кп	68,9	0,135	0,164	-2,8
Ст 3 сп	87,1	0,124	0,167	-2,54
Сталь 10	81,8	0,125	0,266	-2,46
Сталь 15Г	89,6	0,126	0,188	-2,74
Сталь 45	87,4	0,143	0,173	-3,05
Сталь 40Х	85,6	0,130	0,170	-3,62
Сталь 65Г	78,2	0,166	0,222	-3,02
Сталь У7А	74,2	0,163	0,197	-2,87
Сталь У10А	80,1	0,163	0,194	-3,57

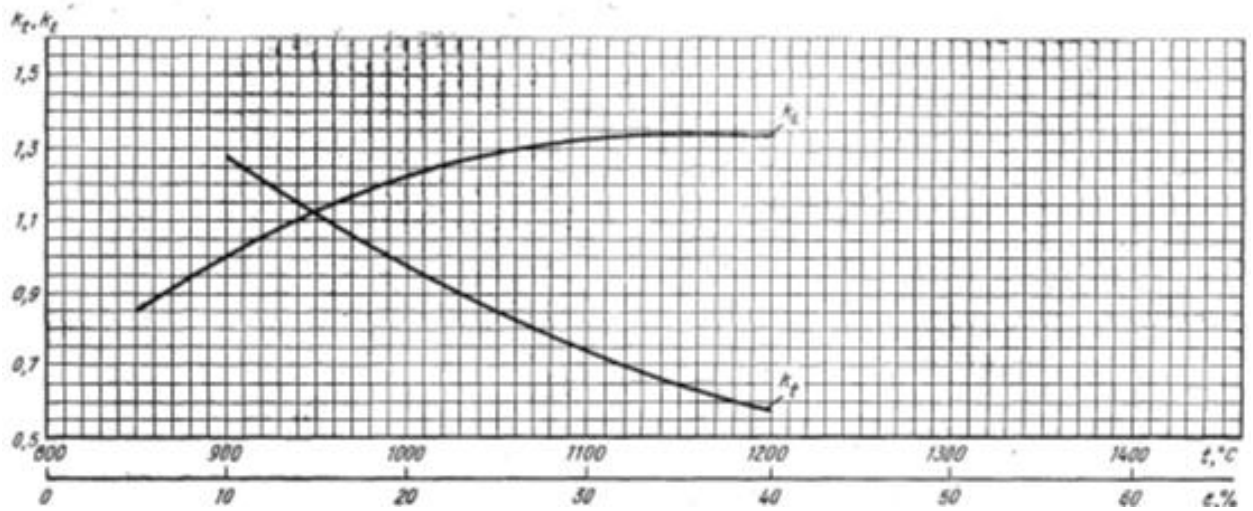
При визначенні σ_{ϕ} по залежності (2.2) можна використовувати графіки термомеханічних коефіцієнтів k_t , k_{ϵ} , k_u [3] і дані для використання цих графіків при визначенні опору деформації при гарячій прокатки (табл. 2.2).

Перерахованого складу металів (сплавів) в табл. 2.2 відповідає число графіків термомеханічних коефіцієнтів, які наведені в роботі [3].

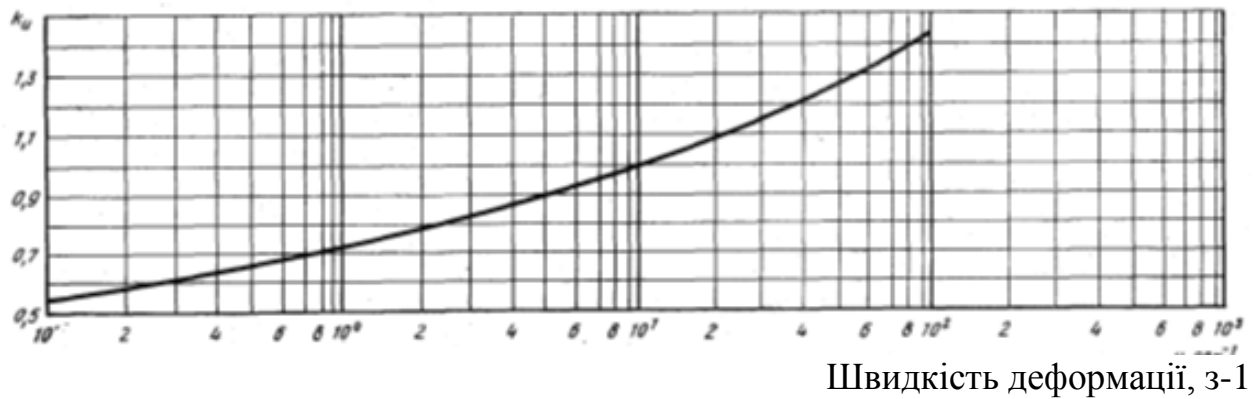
Таблиця 2.2 - Дані для використання графіків термомеханічних коефіцієнтів k_t , k_ε , k_u для визначення опору деформації σ_ϕ під час гарячої прокатки

Найменування групи	Металл, сплав	Номер рисунка		Термомеханические параметры для коэффициентов k_t , k_ε , k_u			Базисное значение $\sigma_{0.2}$, кг/мм ²	Термомеханические параметры для определения σ_ϕ			Источник	
		k_t	k_ε	k_u	t , °C	ε , %		u , сек ⁻¹	t , °C	ε , %		t , сек ⁻¹
Углеродистые и легированные стали и сплавы	08кп	45	46	700—1200	5—50	0,005—300	8,4	1000	10	10	[19] и авт.	
	25	47	48	900—1200	5—50	1—250	8,6	1000	10	10	[24] и авт.	
	40 (н.р.)	49	50	900—1200	5—50	1—250	8,7	1000	10	10	[24] и авт.	
	45	51	52	700—1200	5—50	0,005—300	8,8	1000	10	10	[19] и авт.	
	45	53	54	900—1200	5—40	0,1—100	8,8	1000	10	10	Авт.	
	45Х н.р.	55	56	900—1200	5—50	1—250	8,9	1000	10	10	[24] и авт.	
	45ХН н.р.	57	58	900—1200	5—50	1—250	9,5	1000	10	10	[24] и авт.	
	18ХГТ н.р.	59	60	900—1200	5—50	1—250	9,5	1000	10	10	[24] и авт.	
	20ХГНР н.р.	61	62	900—1200	5—50	1—250	10,0	1000	10	10	[24] и авт.	
	12ХНЗА	63	64	900—1200	5—40	0,1—100	10,0	1000	10	10	Авт.	
	30ХГСА	65	66	900—1200	5—40	0,1—100	10,5	1000	10	10	[19] и авт.	
	4Х13	67	68	900—1200	5—40	0,1—100	10,9	1000	10	10	Авт.	
	Молибденомарганцовистая	69	70	900—1200	5—40	1—100	11,0	1000	10	10	[18] и авт.	
	X17H2	71	72	900—1200	5—40	0,1—100	11,2	1000	10	10	Авт.	
	Хромомолибденовая	73	74	900—1200	5—40	1—100	11,5	1000	10	10	[18] и авт.	
	18ХНВА	75	76	900—1200	5—40	0,01—100	11,5	1000	10	10	[20] и авт.	
	XBГ	77	78	900—1200	5—40	0,01—100	12,0	1000	10	10	[20] и авт.	
	Кремниймарганцовистая	79	80	900—1200	5—40	1—100	12,0	1000	10	10	[18] и авт.	
	Хромоникельмолибденовая	81	82	900—1200	5—40	1—100	12,0	1000	10	10	Авт.	
	X18H9T	83	84	900—1200	5—40	0,1—100	12,2	1000	10	10		
	XH78T(ЭИ435)	85	86	900—1200	5—25	0,1—100	19,6	1000	10	10	>	
	XH75MBTЮ(ЭИ602)	87	88	900—1200	5—25	0,1—100	22,2	1000	10	10	>	
	ВЖ98	89	90	900—1200	5—25	0,1—100	25,0	1000	10	10	>	
XH70Ю(ЭИ652)	91	92	900—1200	5—25	0,1—100	26,6	1000	10	10	>		
ЭИ661	93	94	1000—1200	5—25	0,1—100	33,0	1000	10	10	>		
Легированные цветные металлы и сплавы	ЦО	95	96	150—340	10—80	0,2—40	6,5	200	40	5	[29] и авт.	
	М1	97	98	450—950	10—80	0,2—40	9,5	600	40	5	[29] и авт.	
	АМФ	99	100	450—950	10—80	0,2—40	10,0	600	40	5	[29] и авт.	
	Л62	101	102	450—850	10—80	0,2—40	8,0	600	40	5	[29] и авт.	
	Л68	103	104	450—850	10—80	0,2—40	10,7	600	40	5	[29] и авт.	
	Л70	105	106	450—850	10—80	0,2—40	11,0	600	40	5	[29] и авт.	
	Л90	107	108	450—900	10—80	0,2—40	10,3	600	40	5	[29] и авт.	
	НПА1	109	110	600—1250	10—80	0,2—40	16,7	800	40	5	[29] и авт.	
	НПАН	111	112	800—1250	10—80	0,2—40	13,7	800	40	5	[29] и авт.	
	МНЖМц28-2,5-1,5	113	114	600—1200	10—80	0,2—40	19,2	800	40	5	[29] и авт.	
	МНЖМц30-0,8-1,0	115	116	600—1050	10—80	0,2—40	14,6	800	40	5	[29] и авт.	
	МН19	117	118	600—1030	10—80	0,2—40	12,4	800	40	5	[29] и авт.	
МНЦ15-20	119	120	600—950	10—80	0,2—40	11,0	800	40	5	[29] и авт.		
Алюминий и магниевые сплавы	Al	121	122	300—500	5—50	0,5—60	3,55	400	10	10	[28]	
	АМц	123	124	300—500	5—50	0,5—60	4,8	400	10	10	[28]	
	АМг6	125	126	300—450	5—50	0,5—60	10,5	400	10	10	[28]	
	Д16	127	128	300—450	5—50	0,5—60	9,05	400	10	10	[28]	

Як приклад графіки коефіцієнтів k_t , k_ε , k_u для сталі 45 наведені на рис. 2.1 і 2.2.



Малюнок 2.1 - Температурний k_t і статичної k_ϵ коефіцієнти стали 45



Малюнок 2.2 - Швидкісний k_u коефіцієнт стали 45

Швидкість деформації:

$$U = \frac{V_{\text{пр}} \cdot \epsilon}{l}, \quad (2.4)$$

де l - горизонтальна проекція довжини дуги контакту

$$l = \sqrt{R \cdot \Delta h}. \quad (2.5)$$

Абсолютне обтиснення

$$\Delta h = h_0 - h_1. \quad (2.6)$$

Відносне обтиснення:

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h_0}. \quad (2.7)$$

Значення сили прокатки визначають за формулою:

$$P = p_{\text{сер}} b_{\text{сер}} \cdot l, \quad (2.8)$$

де $p_{\text{сер}}$ - середнє нормальне контактне напруження в осередку деформації;

l - довжина дуги контакту;

$b_{\text{сер}}$ - середня ширина смуги в осередку деформації.

Величину $P_{\text{сер}}$ визначають за формулою:

$$p_{\text{сер}} = n_{\sigma} \cdot 2K_{\sigma}, \quad (2.9)$$

де n_{σ} - коефіцієнт напруженого стану.

При відношенні $b_0 / l < 5$ розширення в розрахунках не враховують (воно менш 1%). При менших значеннях b_0 / l розширення слід враховувати.

Тоді

$$b_{\text{сер}} = b_0 + \Delta b / 2, \quad (2.10)$$

де абсолютна розширення $\Delta b = b_1 - b_0$. (2.11)

Величину розширення розраховують за різними залежностями, найбільш точною з яких є формула А. І. Целікова [1]:

$$\Delta b = 2C_b C_{\sigma} \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \left[\left(\frac{h_1}{\Delta h} \right)^2 \ln \left(\frac{h_0}{h_1} - \frac{h_1}{\Delta h} + 0,5 \right) \right], \quad (2.12)$$

або її спрощений варіант, запропонований А. І. Гришкова [1]:

$$\Delta b = 0,54 C_b C_{\sigma} \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2\mu} \right) \ln \frac{h_0}{h_1}, \quad (2.13)$$

де C_b - коефіцієнт, що враховує вплив ширини смуги на розширення:

$$C_b = 4(1 - \varepsilon) \left(b_0 / \sqrt{R\Delta h} - 0,15 \right) e^{1,5(0,15 - b_0 / \sqrt{R\Delta h})} + \varepsilon; \quad (2.14)$$

C_{σ} - коефіцієнт, що враховує вплив натяжений:

$$C_{\sigma} = 1 - 2\sigma_0 / \sigma_{\phi}. \quad (2.15)$$

При розрахунку енергосилових параметрів з урахуванням розширення [4]

$$P_{cp} = n_{\sigma} n_B 2K_c, \quad (2.16)$$

де n_B - коефіцієнт, що враховує вплив розширення на напружений стан металу.

При $1/h_{cp} < 1$ $n_B = 1$, а при $1/h_{cp} = 1 \dots 3$ [4]:

$$n_B = 1 - 0,16 \frac{h_0}{b_0} (1/h_{cp} - 1). \quad (2.17)$$

Величина коефіцієнта напруженого стану n_{σ} залежить від величини $1/h_{cp}$, де h_{cp} - середня товщина прокату в осередку деформації. Нижче наведені формули для визначення коефіцієнта напруженого стану n_{σ} , отримані В. Ф. Потапкін на основі методу полів ліній ковзання [4]

$$h_{cp} = \frac{h_0 + h_1}{2} \quad (2.18)$$

$$\text{При } 1/h_{cp} < 1 \quad n_{\sigma} = 1 + 1,5 \left(-1/h_{cp} \right)^3; \quad (2.19)$$

$$\text{При } 1 < 1/h_{cp} < 2,5 \quad n_{\sigma} = 1 + 0,2 \left(1/h_{cp} - 1 \right); \quad (2.20)$$

$$\text{При } 1/h_{cp} > 2,5 \quad n_{\sigma} = 1 + 0,5\mu \left(1/h_{cp} - 1 \right); \quad (2.21)$$

де μ - коефіцієнт зовнішнього тертя.

При гарячій прокатці сталі величину коефіцієнта тертя для сталевих валків визначають за формулою С. Екелунда [1]:

$$\mu = 1,05 - 0,0005t. \quad (2.22)$$

Ш. Геллеї рекомендує визначати μ для валків: сталевих

$$\mu = 1,05 - 0,0005t - 0,056V; \quad (2.23)$$

загартованих чавунних

$$\mu = 0,94 - 0,0005t - 0,056V; \quad (2.24)$$

для шліфованих сталевих

$$\mu = 0,82 - 0,0005t - 0,056V, \quad (2.25)$$

де t - температура металу, $^{\circ}\text{C}$;

V - швидкість прокатки, $\text{м} / \text{с}$.

Ці формули дійсні при $t > 700$ $^{\circ}\text{C}$ і $V < 5$ $\text{м} / \text{с}$.

Використовуючи математичні моделі, отримані на основі методу полей ліній ковзання, з огляду на високу ступінь чутливості до коефіцієнта тертя μ , такого параметра як випередження S , В. Ф. Потапкін запропонував [4] залежність для визначення коефіцієнта тертя під час гарячої прокатки середніх по товщині і тонких смуг, коли $l / h_{\text{ср}} > 2$:

$$\mu = 0,25 + 0,006\left(7 - \frac{1}{h_{\text{ср}}}\right)^2 - 0,01\alpha\left(\frac{1}{h_{\text{ср}}} V_{\text{в}} - 57\right) - 0,1(10^{-3}t - 1), \quad (2.26)$$

де α - кут контакту, радий .;

$V_{\text{в}}$ - окружна швидкість валків, $\text{м} / \text{с}$;

t - температура прокатки, $^{\circ}\text{C}$.

Формула (2.26) дійсна для випадку прокатки вуглецевих сталей з вмістом вуглецю $C = 0,1 \dots 0,4\%$, при температурах прокатки $850 \dots 1100$ $^{\circ}\text{C}$ і швидкостях $0,5 \dots 19$ $\text{м} / \text{с}$.

При наявності натяжений, коефіцієнт напруженого стану, вчи-розробляються вплив натяжений на величину контактних напружень, при-наближенні можна знаходити за формулою [5]:

$$n_{\sigma}^{///} \approx 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2\sigma_{\text{ср}}}, \quad (2.27)$$

де σ_0, σ_1 - значення напруг відповідно заднього і переднього натяжений;

$\sigma_{\text{ср}}$ - середнє контактна нормальне напруга без урахування натяж-ний.

Для визначення $\sigma_{\text{ср}}$ слід використовувати залежності (2.9) або (2.16) і (2.19-2.21).

Таким чином, при розрахунку енергосилових параметрів з урахуванням натяжений:

$$P_{\text{ср}} = n_{\sigma} n_{\sigma}^{///} 2K, \quad (2.28)$$

а з урахуванням розширення

$$P_{\text{ср}} = n_{\sigma} n_{\text{в}} n_{\sigma}^{///} 2K. \quad (2.29)$$

Величину моменту прокатки визначають за формулою:

$$M_{np} = 2P \cdot \psi \cdot l, \quad (2.30)$$

де ψ - коефіцієнт плеча прикладання рівнодіючої тиску металу на валки.

Значення коефіцієнта плеча ψ також залежить від відносини l / h_{cp} [4].

При $l/h_{cp} < 0.7$;

$$\psi = 0.6 - 0.3 \left(0.5 - l/h_{cp} \right)^2; \quad (2.31)$$

При $0.7 < l/h_{cp} < 2.5$;

$$\psi = 0.6 - 0.15 \sqrt{l/h_{cp} - 0.7}; \quad (2.32)$$

При $l/h_{cp} > 2.5$;

$$\psi = 4.4 \cdot 10^{-1} - 2.2 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{l/h_{cp} - 2.5} + 4.4 \cdot 10^{-3} \left(0 - \alpha \right); \quad (2.33)$$

де α - кут захоплення (град).

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{2R} \right). \quad (2.34)$$

При наявності переднього і заднього натяжений без урахування пружного сплюснення валків момент прокатки дорівнює [4]:

$$M_{np} = b \cdot l^2 \left[2p_{cp} \left(\psi + 0.1 \frac{\Delta \sigma}{2K_c} \right) + \Delta \sigma \left(0.5 - \frac{1}{l/h_{cp} \cdot \alpha} \right) \right], \quad (2.35)$$

де $\Delta \sigma$ - різниця між напругою переднього σ_1 і заднього σ_0 напруг натяжений ($\Delta \sigma = \sigma_1 - \sigma_0$);

α - кут контакту, радий.

Потужність прокатки:

$$N_{np} = M_{np} \cdot \omega = M_{np} \cdot \frac{V_{np}}{R} \text{ (Вт)}, \quad (2.36)$$

де M_{np} - момент прокатки, Нм;

V_{np} - швидкість прокатки м / с;

R - радіус валків, м.

2.2 Завдання

Завдання 2.2.1. Визначити силу і момент під час гарячої прокатки листа на товстолистовому стані 3000. Вихідна товщина листа - 40 мм. Вихідна

ширина листа - 2600 мм. Товщина листа після пропуску - 28 мм. Діаметр робочих валків - 1000 мм. Матеріал листа - сталь 45. Швидкість прокатки - 3.0 м / с. Температура прокатки – 1050 °С.

2.2.2. Визначити силу P і момент $M_{пр}$ при прокатці смуги зі сталі 08кп розмірами $h_0 \times b_0 = 10 \times 1200$ мм до товщини $h_1 = 7$ мм в валках радіусом $R = 400$ мм. Температура прокатки – 980 °С, швидкість прокатки - 5 м / с, коефіцієнти натяжений $\sigma_0 / 2K_C = 0.3$, $\sigma_1 / 2K_C = 0.3$.

Завдання 2.2.3. Визначити потужність прокатки N при прокатці смуги зі сталі У8А розмірами $h_0 \times b_0 = 12 \times 1500$ мм до товщини $h_1 = 10$ мм в валках радіусом $R = 400$ мм. Температура прокатки – 1030 °С, швидкість прокатки - 3 м / с, коефіцієнти натяжений $\sigma_0 / 2K_C = 0.2$, $\sigma_1 / 2K_C = 0.2$.

2.3 Домашнє завдання

Визначити силу і момент при гарячій прокатки листа (смуги).

Таблиця 2.2. Початкові дані.

Варіант	Вихідна товщина штаби(листа), мм	Вихідна ширина штаби (листа), мм	Товщина штаби(листа) після пропуску, мм	Діаметр робочих валків, мм	Матеріал штаби (листа)	Швид прокатки, м/с	Температура прокатки, °С
1	200	1200	120	1250	Ст 3кп	5,0	1000
2	100	1000	60	1200	Сталь 10	2,0	900
3	80	700	60	850	Сталь 45	2,0	900
4	50	950	30	900	Сталь 65Г	2,5	1000
5	70	1100	45	000	Сталь У7А	2,5	900
6	85	1250	55	950	Саль У10А	3,0	800
7	35	900	25	1000	Ст 3сп	4,0	1000
8	20	800	15	800	Сталь 15Г	4,0	1050
9	60	1250	50	1000	Сталь 45	4,5	1100
10	70	1400	50	950	Сталь 65Г	4,0	1100
11	14	900	10	700	Ст 3кп	4,5	950
12	15	950	11	800	Ст 3сп	4,5	1000
13	10	1050	7	700	Сталь 10	3,5	900
14	30	1200	20	1150	Сталь 45	4,5	1200

2.4. Контрольні питання

1. Які основні фактори визначають величину енергосилових параметрів при гарячій прокатки?

2. Яким чином натягу впливають на енергосилові параметри під час гарячій прокатки широких смуг?

3. Опишіть характер неоднорідності напружено-деформованого стану під час гарячій прокатки широких смуг.

4. Як визначити величину моменту і потужність під час гарячої прокатки широких смуг?

5. Що називається коефіцієнтом плеча? Як він змінюється з додатком переднього і заднього натяжений?

6. У якому випадку при розрахунку сили прокатки треба враховувати розширення?

7. Які фактори впливають на величину коефіцієнта тертя під час гарячої прокатки?

8. Опишіть характер зміни коефіцієнта напруженого стану металу при прокатці в залежності від ставлення l / h_{cp} .

Література [1-5].

3 Практичне заняття

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ТОНКИХ СМУГ

Мета заняття - закріплення теоретичного матеріалу, набуття практичних навичок з розрахунку енергосилових параметрів процесу холодної прокатки листів і смуг.

3.1 Теоретичні відомості

До основних енергосилових параметрів процесу холодної прокатки відносяться: сила прокатки P , момент прокатки M , потужність прокатки N .

Характерною особливістю розрахунку енергосилових параметрів при холодної прокатки є необхідність врахування деформаційного зміцнення і пружного сплющивання валків. Розширенням смуги нехтують [1].

Значення сили прокатки визначають з виразу:

$$P = p_{сеп} \cdot b \cdot l_c, \quad (3.1)$$

де $p_{сеп}$ - середнє нормальне контактне напруження в осередку деформації;

b - ширина смуги;

l_c - довжина дуги контакту з урахуванням пружного сплющення.

Величину $p_{сеп}$ визначають за формулою:

$$P_{cp} = n_{\sigma} \cdot 2K_{\sigma}, \quad (3.2)$$

де n_{σ} - коефіцієнт напруженого стану;

$2K_{\sigma}$ - середнє (або середньоінтегральної) по довжині осередку деформації значення подвоєного опору чистому зрушення.

Для випадку плоскодеформованного стану (випадок прокатки широких листів і смуг) [5]:

$$2K_c = 1,15\sigma_{Tc}. \quad (3.3)$$

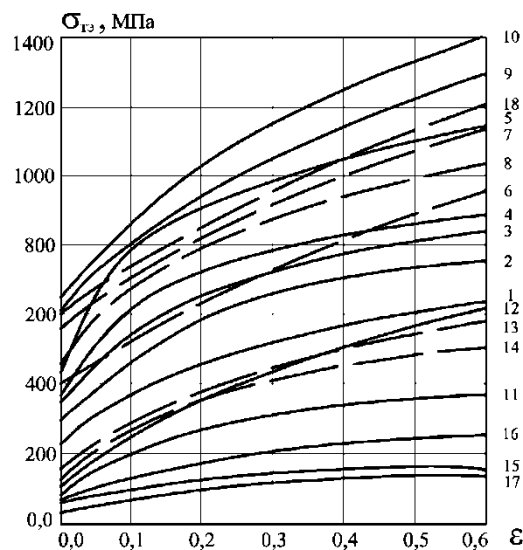
Як аналітичних описів інтенсивності деформаційного зміцнення $\sigma_T = F(\epsilon)$ (рис. 3.1) в даний час найбільшого поширення набули статичні і поліноміальні залежності наступного виду [6]:

$$\sigma_T = \sigma_{T0} + a\epsilon^n; \quad (3.4)$$

$$\sigma_T = \sigma_{T0} + a_1\epsilon + a_2\epsilon^2 + a_3\epsilon^3, \quad (3.5)$$

де σ_{T0} - напруження плинності даного матеріалу у вихідному, тобто в відпаленому стані (рис. 3.2);

a, n, a_1, a_2, a_3 - визначаються на основі результатів стандартних випробувань значення коефіцієнтів, що характеризують природні механічні властивості даного металу або сплаву з урахуванням його деформаційного зміцнення.



- 1 - сталь 08кп; 2 - сталь 20сп; 3 - сталь 20А; 4 - сталь 45; 5 - сталь 65Г;
 6 - сталь У8А; 7 - сталь У12; 8 - сталь 30ХГСА; 9 - сталь 2Х18Н9;
 10 - сталь 2Х22Н5АГ9; 11 - мідь; 12 - латунь Л80; 13 - латунь Л63;
 14 - мельхіор МН19; 15 - алюміній; 16 - алюмінієвий сплав АМГ;
 17 - сплав АСМ; 18 - молібден

Малюнок 3.1 - Експериментальні значення напруг плинності $\sigma_{Tз}$ різних металів і сплавів в залежності від ступеня їх холодною деформації ϵ

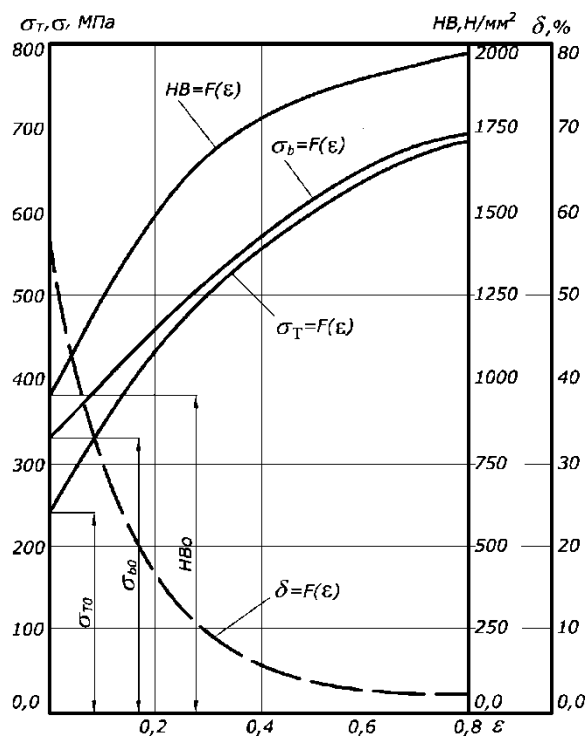
Залежність (3.5) дозволяє визначити середньоінтегральне значення σ_{TC} в осередку деформації при прокатці з урахуванням реальної форми робочих валків прокатного стану. Так, проінтегрував вираз (3.5), приймаючи до уваги поточне значення відносного обтиску $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0)[h_0 - h_1 - 2R(1 - \cos\alpha)]/h_0$ з урахуванням рівняння окружності, запишемо:

$$\sigma_{TC} = \frac{1}{\alpha_0} \int_0^{\alpha_0} \sigma_{T\alpha} d\alpha = \frac{1}{\alpha_0} \int_0^{\alpha_0} (\sigma_{T0} + a_1\varepsilon_\alpha + a_2\varepsilon_\alpha^2 + a_3\varepsilon_\alpha^3) d\alpha,$$

де α_0, α - величина кута контакту та його поточне значення, а після інтегрування отримаємо

$$\begin{aligned} \sigma_{TC} = & (\sigma_{T0} + a_1\varepsilon_0 + a_2\varepsilon_0^2 + a_3\varepsilon_0^3) + 2(1 - \varepsilon_0)(a_1 + 2a_2\varepsilon_0 + 3a_3\varepsilon_0^2)\varepsilon_1/3 + \\ & + 8(1 - \varepsilon_0)^2(a_2 + 3a_3\varepsilon_0)\varepsilon_1^2/15 + 16(1 - \varepsilon_0)^3 a_3\varepsilon_1^3/35, \end{aligned} \quad (3.6)$$

де $\varepsilon_0, \varepsilon_1$ - значення відносного обтиску деформованого металу, досягнуті в усіх попередніх і в поточному проході під час прокатки.



Малюнок 3.2 - Емпіричні значення механічних властивостей сталі 08кп в залежності від відносної міри її холодної деформації [3]

Значення σ_{T0} і коефіцієнтів a_1, a_2, a_3 , що враховують природні властивості різних металів і сплавів при їх холодній деформації, наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Значення σ_{T0} і коефіцієнтів a_1, a_2, a_3

Матеріал	Коефіцієнти регресії			
	σ_{T0}	a_1	a_2	a_3
Сталь				
08 пс	319	2171	-3615	2393
08 кп	244	1227	-1470	827
10 сп	299	1294	-1247	221
20	368	1757	-3603	2666
40	356	3394	-10244	12121
45	350	2675	-5125	3750
65Г	460	3875	-9651	8555
У8А	381	1408	-995	437
У10А	405	3032	-6504	6364
Х18Н9	251	1951	-11	-303

Величину відносного обтиску, досягнутого у всіх попередніх проходах, можна визначити за формулою

$$\varepsilon_0 = (h - h_0)/h, \quad (3.7)$$

де h - товщина відпаленого металу (перед першим пропуском);

h_0 - вихідна товщина прокату в поточному проході.

Абсолютна і відносна обтиснення в поточному проході рівні:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= h_0 - h_1; \\ \varepsilon_1 &= \Delta h_1 / h_0, \end{aligned} \quad (3.8)$$

де h_1 - кінцева товщина прокату в поточному проході.

У разі прокатки відпаленого металу (перший прохід) залежність (3.6) істотно спрощується

$$\sigma_{Tc} = \sigma_{T0} + \frac{2}{3} a_1 \varepsilon_1 + \frac{8}{15} a_2 \varepsilon_1^2 + \frac{16}{35} a_3 \varepsilon_1^3. \quad (3.9)$$

У спрощених розрахунках можна використовувати середнє арифметичне значення напруг плинності:

$$\sigma_{Tсер} = \frac{\sigma_{T0} + \sigma_{T1}}{2}, \quad (3.10)$$

де σ_{T0}, σ_{T1} - відповідно напруги плинності металу до і після деформації в поточному проході.

Значення σ_{T0} і σ_{T1} можна знаходити з графіків, подібних тому, що наведено на рис. 3.2, використовуючи, наприклад, роботу [3].

Значення коефіцієнта напруженого стану n_σ краще визначати за формулою А. І. Целікова [5] як однієї з найбільш точних:

$$n_\sigma = \frac{1}{\Delta h} \left\{ \frac{\xi_0 \cdot h_0}{\delta - 2} \left[\left(\frac{h_0}{h_H} \right)^{\delta - 2} - 1 \right] + \frac{\xi_1 \cdot h_1}{\delta + 2} \left[\left(\frac{h_H}{h_1} \right)^{\delta + 2} - 1 \right] \right\}, \quad (3.11)$$

де $h_H = \sqrt[2\delta]{\xi_0 / \xi_1} h_0^{\delta - 1} h_1^{\delta + 1}$ - товщина смуги в нейтральному перерізі.

ξ_0, ξ_1 - коефіцієнти, що враховують вплив заднього і переднього натяжений:

$$\xi_0 = 1 - \sigma_0 / 2K_c; \quad \xi_1 = 1 - \sigma_1 / 2K_c, \quad (3.12)$$

де σ_0, σ_1 - напруги переднього і заднього натяжений.

На практиці величину переднього і заднього натяжений, як правило, задають відносинами $\sigma_0 / 2K_c, \sigma_1 / 2K_c$ з подальшим після розрахунку $2K_c$ визначенням σ_0, σ_1 .

Коефіцієнт δ , що враховує вплив контактного тертя і зовнішніх зон розраховується за формулою

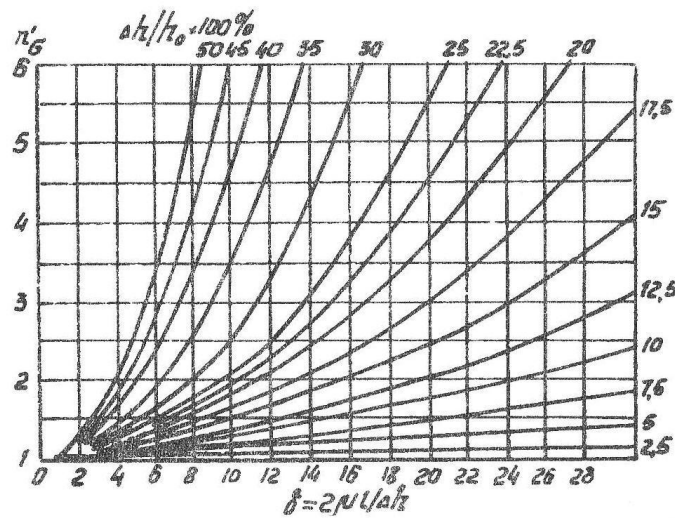
$$\delta = 2\mu \cdot l / \Delta h, \quad (3.13)$$

де μ - коефіцієнт контактного тертя;

l - довжина дуги контакту.

Коефіцієнт контактного тертя μ визначають на підставі досвідчених даних. Він залежить від безлічі факторів. Серед них матеріали валків і смуги, технологічна мастило, стан поверхні бочки валків, швидкість прокатки і ін.

Для спрощених розрахунків, при визначенні значення коефіцієнта напруженого стану n_σ можна використовувати номограму А. І. Целікова [5], наведену на рис. 3.3.



Малюнок 3.3 - Номограма А. І. Целікова

Обчислення дуги контакту при холодній прокатки необхідно проводити з урахуванням пружного сплюснення валків:

$$l_c = \sqrt{R \cdot \Delta h + x_2^2} + x_2, \quad (3.14)$$

$$\text{де } x_2 = 8\rho_{\text{ср}}R \left(\frac{1 - \nu_B^2}{\pi \cdot E_B} + \frac{1 - \nu_{\Pi}^2}{\pi \cdot E_{\Pi}} \right), \quad (3.15)$$

ν_B, ν_{Π} - коефіцієнти Пуассона матеріалу валків і смуги;
 E_B, E_{Π} - модулі пружності матеріалу валків і смуги.

Відомо, що величина l_c залежить від значення $\rho_{\text{ср}}$, яке залежить від значення n_{σ} , в розрахунок якого, в свою чергу, входить довжина дуги контакту. Таким чином, величину L_C можна визначити на основі методу послідовних наближень (ітераційне рішення). Спочатку визначають довжину дуги контакту без урахування пружного сплюснення:

$$l = \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (3.16)$$

потім роблять розрахунок величини $\rho_{\text{ср}}$ і на її основі роблять розрахунок L_C за формулою (3.14). Потім проводять порівняння L_C і l і, в разі, якщо результат не задовольняє заданій погрішності, підставляють знайдене значення L_C в вираз (3.13) і роблять повторний розрахунок $\rho_{\text{ср}}$, а потім L_C . Операцію повторюють, поки попереднє і розраховане значення L_C не відрізняться на задану величину (в навчальних завданнях - 5%).

Вирази (3.1) - (3.16) складають повну методику розрахунку сили прокатки P .

Величину моменту прокатки $M_{\text{пр}}$ визначають за формулою

$$M_{\text{пр}} = 2P \cdot a = 2P \cdot \psi \cdot l_c ; \quad (3.17)$$

де ψ - коефіцієнт плеча.

Зважаючи на складність визначення ψ для розрахунку $M_{\text{пр}}$ можна використовувати вираз:

$$M_{\text{пр}} = 2K_c \left\{ \frac{\xi_0 \cdot h_0}{\delta - 2} \left[\left(\frac{h_0}{h_*} \right)^{\delta - 2} - 1 \right] - \frac{\xi_1 \cdot h_1}{\delta + 2} \left[\left(\frac{h_*}{h_1} \right)^{\delta + 2} - 1 \right] \right\} \cdot \frac{2b \cdot R \cdot \mu \cdot l_c}{\Delta h} . \quad (3.18)$$

Міцність прокатки

$$N = M \cdot \omega = M \cdot V / R, \quad (3.19)$$

де V - швидкість прокатки.

Величина переднього і заднього натяжений відповідно:

$$T_0 = \sigma_0 b h_0; \quad T_1 = \sigma_1 b h_1. \quad (3.20)$$

3.2 Завдання

Завдання 3.2.1. Визначити силу прокатки при деформації смуги в першому проході вихідної товщиною $h_0 = 2$ мм до товщини $h_1 = 1,5$ мм. Ширина 1000 мм. Матеріал смуги - сталь 08 кп. Радіус валків - 200 мм. Валки сталеві. Коефіцієнт тертя $f = 0,09$, коефіцієнти натяжений $\sigma_0/2K_c = 0,3$; $\sigma_1/2K_c = 0,7$. Довжину дуги контакту прийняти рівною LC після першої ітерації.

Завдання 3.2.2. Визначити реальну довжину дуги контакту при прокатці стрічки зі сталі 20 товщиною в відпаленого стані 2 мм в другому проході ($h_0 = 1,7$ мм, $h_1 = 1,4$ мм) в валках діаметром 400 мм. Коефіцієнт тертя $f = 0,08$, коефіцієнти натяжений $\sigma_0/2K_c = 0,5$; $\sigma_1/2K_c = 0,3$.

Завдання 3.2.3. Визначити потужність прокатки при деформації смуги зі сталі 10 сп, якщо відомі наступні параметри: $h = 3$ мм; $h_0 = 2,4$ мм; $h_1 = 2$ мм; $R = 200$ мм, $f = 0,08$; $\sigma_0/2K_c = 0,3$; $\sigma_1/2K_c = 0,3$. Швидкість прокатки $V = 5$ м / с.

Список рекомендуемой литературы

1. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Рокотян, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 318 с.

2. Андреюк Л. В. Определение давлений металла на валки при горячей прокатке сталей и сплавов широкого сортамента / Л. В. Андреюк // Теория

прокатки : материалы всесоюзн. науч.-техн. конф. Теоретические проблемы прокатного производства. – М. : Metallurgy, 1975. – С. 383–385.

3. Третьяков А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. Н. Зюзин. – М. : Metallurgy, 1973. – 224 с.

4. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос : монография / В. Ф. Потапкин. – Краматорск : ДГМА, 2005. – 316 с.

5. Целиков А. И. Основы теории прокатки / А. И. Целиков. – М. : Metallurgy, 1965. – 247 с.