

621.771

С 325

**Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія**



**Б. П. Серeda
Ю. О. Бєлокoнь**

ТЕОРІЯ ПРОКАТКИ

Навчально-методичний посібник

*для студентів ЗДІА
спеціальності 6.05040104 «Обробка металів тиском»*

Міністерство освіти і науки України
Запорізька державна інженерна академія

*Затверджено до друку
рішенням науково-методичної ради ЗДІА
протокол № 6 від 27.06.2013 р.*

ТЕОРІЯ ПРОКАТКИ

Навчально-методичний посібник

*для студентів ЗДІА
спеціальності 6.05040104 «Обробка металів тиском»*

*Рекомендовано до видання
на засіданні кафедри МОМ,
протокол № 19 від 04.06.2013 р.*

Запоріжжя
ЗДІА
2013

ББК 621.771
С 325

*Б. П. Середа, д.т.н., професор
Ю. О. Белоконь, к.т.н., доцент*

Відповідальний за випуск: *зав. кафедри МОМ,
к.т.н., доцент М. Г. Прицип*

Рецензенти :

І. С. Алієв, д.т.н., професор, завідувач кафедри обробки металів тиском, проректор з навчальної роботи Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ);

М. Г. Прицип, к.т.н., доцент кафедри матеріалознавства та обробки металів Запорізької державної інженерної академії

Середа Б. П.

С 325 Теорія прокатки: навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА спеціальності 6.05040104 «Обробка металів тиском» / Середа Б. П., Белоконь Ю. О.; Запоріз. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2013. – 105 с.

Навчально-методичний посібник призначений для студентів спеціальності «Обробка металів тиском», який містить теоретичні основи прокатування: геометрія осередку деформації, кінематику осередку деформації, напружений та деформований стан, зовнішнє тертя та ін. Наведені практичні задачі та методи розрахунків зусиль та деформацій для різних процесів прокатки.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ОСЕРЕДОК ДЕФОРМАЦІЇ ТА УМОВИ ЗАХОПЛЕННЯ МЕТАЛУ ВАЛКАМИ	6
1.1 Осередок деформації при прокатці та його параметри.....	6
1.2 Умова сталості об'єму і коефіцієнти деформації при прокатці	10
1.3 Сили тертя	14
1.4 Умови захвату штаби валками	21
1.5 Практичні задачі до розділу 1	27
1.6 Контрольні питання до розділу 1	33
2 КІНЕМАТИКА ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ	34
2.1 Стадії процесу прокатки	34
2.2 Випередження при прокатці.....	36
2.3 Середня швидкість деформації	39
2.4 Практичні задачі до розділу 2	46
2.5 Контрольні питання до розділу 2	49
3 НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І ФОРМОЗМІНЕННЯ ШТАБИ ..	50
3.1 Напружено-деформований стан металу	50
3.2 Розподіл деформацій по висоті штаби.....	52
3.3 Розширення металу під час прокатки	55
3.4 Практичні задачі до розділу 3	60
3.5 Контрольні питання до розділу 3	65
4 ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ ПРОКАТКИ.....	66
4.1 Тиск на контакті металу з валками	66
4.2 Сила прокатки	71
4.3 Крутний момент, робота та потужність прокатки	74
4.4 Практичні задачі до розділу 4	85
4.5 Контрольні запитання до розділу 4.....	93
ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	109

ВСТУП

Прокаткою називається процес пластичного деформування тіл між приводними обертовими валками.

У загальному випадку тіло, яке деформується між валками, називають *штабою*. Штаба втягується у валки за рахунок дії сил тертя на контакті.

Прокатка належить до основних способів обробки металів тиском. Методом прокатки одержують вироби різноманітної форми: тонкі і товсті листи, профілі квадратного та круглого перерізів, кутки, швелери, двотаврові балки, рейки, труби, тощо. При прокатці виробів типу листів застосовуються валки, робоча частина (бочка) яких має форму циліндра. Такий процес зветься *прокаткою на гладкій бочці*. При виробництві більш складних (сортових) профілів застосовуються калібровані валки, в яких прорізані канавки - рівчаки.

Процеси прокатки різноманітні і класифікувати їх можна за різними ознаками.

Як і інші способи обробки тиском, прокатка буває *гарячою, холодною та теплою*. Гаряча прокатка має більше поширення, ніж холодна. Холодна прокатка застосовується для одержання відносно тонких виробів із високоякісною поверхнею, наприклад, тонких листів або тонкостінних труб

За взаємним розташуванням осей тіла, яке піддається обробці, та валків розрізняють прокатку *поздовжню, поперечну та гвинтову (косу)*.

За умовою постійності деформаційних параметрів по довжині штаби виділяють *періодичну та звичайну (неперіодичну)* прокатку. При періодичній прокатці в процесі деформації висота зазору між палками періодично змінюється. Найчастіше це досягається шляхом надання валкам спеціальної некруглої форми. Таким способом одержують періодичні профілі.

Якщо дія валків на штабу однакова, такий процес називають *симетричним*, якщо ні - *несиметричним* (це прокатка в валках різного діаметра

або при різній швидкості валків, прокатка з одним приводним валком, прокатка з нерівномірним розподілом властивостей по перерізу штаби, тощо).

За наявністю зовнішніх сил, що прикладені до кінців штаби, виділяють *вільну* та *невільну* (з натягінням або підпором) прокатку.

В сучасному прокатному виробництві широко використовується безперервна прокатка. Цей вид прокатки є найпродуктивнішим. З його допомогою отримують великі партії прокату простих профілів, плоского прокату та труб. Ефективність безперервної прокатки збільшується з використанням натягіння.

Під *простим процесом прокатки* розуміють вільну симетричну поздовжню прокатку штаби прямокутного перерізу в циліндричних валках. При теоретичному розгляді цей процес є основним фундаментальним процесом прокатки.

1 ОСЕРЕДОК ДЕФОРМАЦІЇ ТА УМОВИ ЗАХОПЛЕННЯ МЕТАЛУ ВАЛКАМИ

1.1 Осередок деформації при прокатці та його параметри

Осередком деформації називається частина штаби, яка у цей момент часу піддається пластичній деформації. Подивимось на рисунку 1.1. При спрощеному описі процесу прокатки за осередок деформації приймають область, обмежену перерізами AA' , BB' і дугами кіл валків AB , $A'B'$. Це так званий *геометричний* (ідеалізований) осередок деформації.

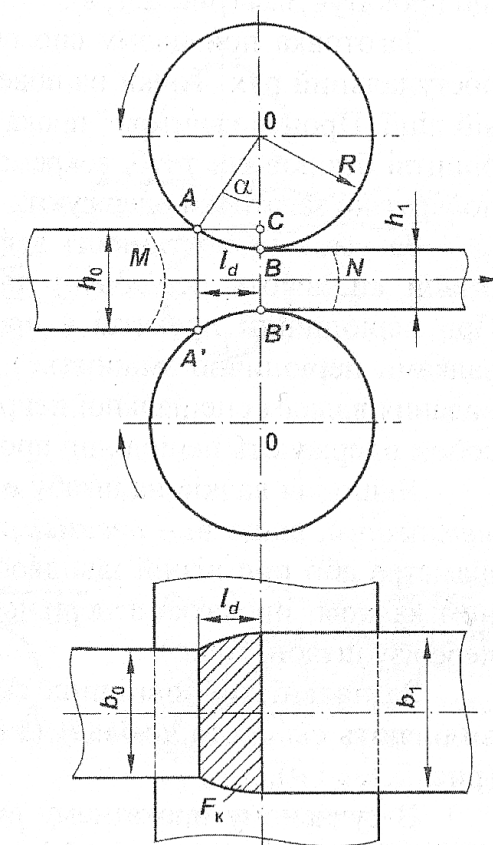


Рисунок 1.1 – Осередок деформації при прокатці

Експериментальні дослідження показують, що дійсні межі осередку деформації можуть не збігатися з перерізами AA' і BB' . Наприклад, пластична деформація може починатися на лінії M , а закінчуватися на лінії N . Область між

лініями M і N – це *фізичний* (дійсний) осередок деформації. Довжина фізичного осередку деформації більше, ніж геометричної. Частини штаби, що прилягають до осередку деформації, але не деформуються в цей момент часу, називаються *зовнішніми зонами* або *жорсткими кінцями*.

Під час прокатки зменшується товщина штаби від H_0 до h_1 , збільшується довжина від L_0 до l_1 і ширина від B_0 до b_1 . Зменшення товщини штаби називають *абсолютним отиском* Δh :

$$\Delta h = H_0 - h_1, \quad (1.1)$$

а збільшення ширини штаби – *розширенням* Δb :

$$\Delta b = b_1 - B_0, \quad (1.2)$$

індекси «0» позначають розміри штаби до прокатки, а «1» – після прокатки.

Розглянемо основні поняття, що стосуються геометричного осередку деформації. Дугу AB називають *дугою контакту* або *дугою захвату*, а відповідний їй центральний кут α – *кутом контакту* або *кутом захвату*. Горизонтальну проекцію дуги контакту (відрізок AC) приймають за *довжину осередку деформації* l_d . У нижній частині рисунку 1.1 штрихуванням показана горизонтальна проекція поверхні торкання штаби з валками – *контактна поверхня* F_k .

Кут контакту металу з валками α – центральний кут, утворений двома радіусами валка, проведений із його центру до точок входу A та виходу B металу із валків. Величина кута α визначається із трикутника AOC :

$$\cos \alpha = \frac{OC}{OA} = \frac{R - \Delta h/2}{R} \quad (1.3)$$

Звідки:

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h}{D}\right) \quad (1.4)$$

де D – діаметр робочого валка.

Для розрахунку кута контакту можна використовувати наближену, але просту й зручну формулу:

$$\alpha = \sqrt{\Delta h/R}, \text{ рад.} \quad (1.5)$$

$$\alpha = 57,3 \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}, \text{ град} \quad (1.6)$$

де R – радіус робочого валка.

Точність наближеної формули (1.5) є цілком достатньою. Порівняльні розрахунки за формулами (1.4) і (1.5) показують, що навіть при дуже великих величинах кутів контакту (до $30 \div 35^\circ$) похибка обчислень за формулою (1.5) не перевищує $1,0 \div 1,5\%$.

Довжину осередку деформації l_d можна визначити із прямокутного трикутника AOC , звідки:

$$l_d = AC = \sqrt{(AC)^2 - (OC)^2} = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2} = \sqrt{R^2 - R^2 + 2R \frac{\Delta h}{2} - \frac{\Delta h^2}{4}} = \sqrt{R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}$$

Зневаживши за малістю другим членом під коренем, в кінцевому вигляді отримують:

$$l_d = \sqrt{\Delta h R} \quad (1.7)$$

де R – радіус робочого валка.

Для розрахунку довжини осередку деформації можна використовувати формулу:

$$l_d = R \sin \alpha . \quad (1.8)$$

Площа контакту металу з валками F_k визначається з рисунку 1.1, звідки:

$$F_k = \frac{B_0 + b_1}{2} l_d \quad (1.9)$$

або

$$F_k = \frac{B_0 + b_1}{2} \sqrt{\Delta h R} \quad (1.10)$$

Інтенсивність деформації при прокатці листів і штаб визначають *відносим отиском* ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{H_0} \cdot 100\% , \quad (1.11)$$

а також *коефіцієнтом витяжки* μ :

$$\mu = \frac{F_0}{F_1} , \quad (1.12)$$

де F_0, F_1 – площа поперечного перетину штаби відповідно до і після проходу.

Важливою характеристикою геометричних умов деформації є відношення довжини осередку деформації до середньої товщини штаби: $l_d/h_{\text{ср}}$. Цей показник, називають *фактором форми* або *коефіцієнтом форми*.

Середню товщину штаби в осередку деформації зазвичай визначають як середньоарифметичну:

$$h_{cp} = \frac{(H_0 + h_1)}{2} \quad (1.13)$$

Вираз (1.13) є найпростішим, але не зовсім точним, тому що товщина штаби змінюється протягом осередку деформації не прямолінійно (не по хордах AB і $A'B'$), а по колу. Істинна середня товщина штаби в осередку деформації є трохи меншою за ту, що обчислюється за формулою (1.13). Якщо дугу кола замінити параболою, формула має вигляд:

$$h_{cp} = \frac{(H_0 + 2h_1)}{3} \quad (1.14)$$

Досить точне значення h_{cp} дає також формула:

$$h_{cp} = \sqrt{H_0 h_1} . \quad (1.15)$$

Параметр l_d/h_{cp} характеризує геометричні умови в поздовжньому перерізі осередку деформації. Для характеристики форми осередку деформації в плані служить відношення b_{cp}/l_d , де b_{cp} – середня ширина штаби в осередку деформації; іноді використовується відношення b_0/l_d .

1.2 Умова сталості об'єму і коефіцієнти деформації при прокатці

У процесі прокатки змінюються лінійні розміри штаби – висота (товщина), ширина та довжина. Розглянемо систему показників, які характеризують величину деформації в кожному із цих напрямків.

Висотна деформація. Зміна висоти (товщини) штаби характеризується величиною абсолютного і відносного обтиснення. *Абсолютне обтиснення становить:*

$$\Delta h = H_0 - h_1. \quad (1.16)$$

Відносне обтиснення може бути визначено з різним ступенем точності. *Дійсне відносне обтиснення* визначається за формулою:

$$e_h = \ln(H_0/h_1). \quad (1.17)$$

У механіці твердого тіла прийнято дещо інше визначення e_h , а саме як логарифм відношення кінцевої висоти до початкової. Проте у теорії та практиці обробки металів тиском прийнято визначення e_h за формулою (1.17), щоб у розрахунках оперувати позитивними величинами.

Обчислення величини e_h , є трохи незручним, тому що вимагає логарифмування. Тому часто користуються величиною *умовного відносного обтиснення*:

$$\varepsilon = \frac{(H_0 - h_1)}{H_0} = \frac{\Delta h}{H_0}. \quad (1.18)$$

Відносне обтиснення визначають у частках одиниці або у відсотках; в останньому випадку результати розрахунків за формулою (1.18) множать на 100.

Крім величин Δh , e_h , ε показником висотної деформації служить *коефіцієнт обтиснення*:

$$\eta = \frac{h_1}{H_0}. \quad (1.19)$$

Оскільки η менше одиниці, у розрахунках іноді зручно користуватися зворотною величиною $1/\eta = H_0/h_1$.

Поперечна деформація. Зміна поперечних розмірів штаби називається *розширенням*. Показники розширення за змістом аналогічні показникам висотної деформації.

Абсолютне розширення становить:

$$\Delta b = b_1 - B_0. \quad (1.20)$$

Істинне відносне розширення:

$$e_b = \ln(b_1/B_0). \quad (1.21)$$

Умовне відносне розширення:

$$\xi = \frac{(b_1 - B_0)}{B_0} = \frac{\Delta b}{B_0}. \quad (1.22)$$

Коефіцієнт розширення:

$$\beta = \frac{b_1}{B_0}. \quad (1.23)$$

Величину поперечної деформації також характеризують відношенням абсолютного розширення до абсолютного обтиснення:

$$a = \frac{\Delta b}{\Delta h}. \quad (1.24)$$

Цю величину називають *показником розширення*.

Поздовжня деформація. Абсолютне подовження штаби становить:

$$\Delta l = l_1 - L_0. \quad (1.25)$$

Істинне відносне подовження:

$$e_l = \ln(l_1/L_0). \quad (1.26)$$

Умовне відносне подовження:

$$\theta = \frac{(l_1 - L_0)}{L_0} = \frac{\Delta l}{L_0}. \quad (1.27)$$

Слід зазначити, що величини Δl , e_l , θ рідко застосовуються на практиці для характеристики подовжньої деформації. Разом з тим широко використовується показник, названий *коефіцієнтом витяжки*:

$$\mu = l_1/L_0 \quad (1.28)$$

Коефіцієнт витяжки характеризує не тільки зміну довжини штаби, але й зміну площі її поперечного перерізу. Дійсно, з умови сталості об'єму маємо $F_0 L_0 = F_1 l_1$ звідки випливає $l_1/L_0 = F_0/F_1$.

Таким чином, коефіцієнт витяжки можна визначити також за співвідношенням площ поперечного перерізу штаби до і після прокатки:

$$\mu = \frac{F_0}{F_1}. \quad (1.29)$$

Якщо технологічний процес включає кілька проходів штаби через валки, що буває майже завжди, то розрізняють *поодинокі* або *часткові коефіцієнти витяжки* (у кожному проході) та *загальний коефіцієнт витяжки*.

Взаємозв'язок деформацій. Коефіцієнти деформації в трьох основних напрямках зв'язані між собою умовою сталості об'єму металу. Так, для прямокутної штаби маємо $H_0 B_0 L_0 = h_1 b_1 l_1$, звідки випливає:

$$\frac{h_1}{H_0} \cdot \frac{b_1}{B_0} \cdot \frac{l_1}{L_0} = \eta \cdot \beta \cdot \mu = 1. \quad (1.30)$$

Таким чином, добуток коефіцієнтів обтиснення, розширення та витяжки повинен дорівнювати одиниці. У протилежному випадку порушується умова сталості об'єму.

Логарифмуючи вираз (1.30), одержимо:

$$\ln \frac{h_1}{H_0} + \ln \frac{b_1}{B_0} + \ln \frac{l_1}{L_0} = 0, \quad (1.31)$$

або

$$e_h + e_b + e_l = 0. \quad (1.32)$$

У цьому випадку e_h обчислюється як $\ln(h_1/h_0)$, що дозволяє виключити штучну зміну знаку показника.

Сума дійсних відносних деформацій по трьох основних напрямках (з урахуванням знака) дорівнює нулю. Вираз (1.32) є умовою сталості об'єму, записаною відносно деформації. Знаки перед членами формули (1.32) показують, що по висоті штаби відбувається зменшення, а по інших напрямках – збільшення розмірів.

1.3 Сили тертя

З фізики відомо, що *зовнішнім* або *контактним* тертям називають опір, що

виникає при переміщенні одного твердого тіла по поверхні іншого. Силу опору відносному тангенціальному зсуву називають *силою тертя*. Сила тертя величина векторна. Вектор сили тертя лежить в площині торкання тіл і направлений убік протилежний дії зрушуючої сили.

По кінематичних ознаках розрізняють *тертя ковзання* і *тертя кочення*.

При *прокатці* має місце *тертя ковзання*. Воно характеризується тим, що точки поверхні одного тіла (штаби) рухаються по дотичній до поверхні іншого тіла (валки). Між поверхнями, що труться, при прокатці завжди знаходяться різні речовини (окалина, мастило, продукти зносу, бруд і так далі), властивості яких різко відрізняються від властивостей штаби і валків. Ці речовини відомі під назвою *проміжні* або *розділові середовища*. Їх склад і кількість падають вплив на механізм тертя і рівень сил тертя при прокатці. Найбільш поширеним розділовим середовищем при прокатці є *технологічне мастило*, що спеціально вводиться в осередок деформації для зменшення сили тертя. Залежно від товщини розділового змащувального шару розрізняють три основні види тертя: *сухе*, *граничне* і *рідинне*. Коли поверхні тіл, що труться, абсолютно вільні від мастила і забруднень, має місце *сухе тертя*. За наявності на контактних поверхнях якнайтонших плівок мастила (товщиною порядку сотих доль мікрметра) тертя називають *граничним*. *Тертя* називають *рідинним* або *гідродинамічним* при великій товщині розділового змащувального шару, коли нерівності поверхонь тіл не входять в безпосереднє зачеплення. На практиці найчастіше реалізуються змішані види тертя. Тертя при прокатці зазвичай є *напівсухим* або *напіврідинним*.

Не дивлячись на особливості тертя при прокатці, сучасні наукові уявлення про механізм тертя металевих тіл свідчать про те, що у тертя при прокатці і у машинного тертя єдина природа. Тому силу тертя руху T при прокатці і при звичайному (машинному) терті металевих тіл визначають по формулі:

$$T = fN, \quad (1.33)$$

де N - нормальна сила.

Формула (1.33) здобула популярність як *закон Амонтона*. Відповідно до цієї формули між силами T і N , тобто між інтегральними характеристиками явища тертя, існує прямо пропорціональна залежність. Експериментально встановлено, що аналогічна залежність між силами T і N спостерігається і при прокатці практично у всьому діапазоні умов реалізації процесу.

Коефіцієнт пропорційності f у формулі (1.33) відомий під назвою *коефіцієнт тертя ковзання*. Коефіцієнт тертя ковзання (надалі коефіцієнт тертя) - це безмірна фізична величина, залежна від хімічного складу і стану поверхонь контактуючих тіл, а також від умов (температури, швидкості, складу і товщини розділового середовища, рівня контактних напружень і т.п.) їх фрикційної взаємодії. По сенсу в теорії тертя і в теорії прокатки під коефіцієнтом тертя мають на увазі якусь середню постійну величину даногб параметра на контактній поверхні. При прокатці літерою / позначають середнє значення коефіцієнта тертя для всього осередку деформації.

Умови тертя при захваті і при сталому процесі прокатки неоднакові. Між ними мають місце істотні відмінності, тому при визначенні умови початкового захвату штаби валками і умови захвату при сталому процесі прокатки користувалися різними коефіцієнтами тертя - f_z і f_y . Коефіцієнти тертя f_z і f_y відображають особливості умов тертя при захваті і при сталому процесі прокатки відповідно.

До захвату, точніше до затискання штаби валками, пластична деформація металу ще не почалася і відбувається тертя між двома твердими тілами. Очевидно, що у цей момент природа і закономірності тертя мають бути такими ж, як при звичайному (машинному) терті металевих тіл.

Тертя в початковий момент захвату характеризується своєрідними умовами контакту штаби з валками. При ковзанні передніх кромek штаби по валках відбувається їхнє помітне стирання, а також видалення оксидів (окаліни) та інших проміжних середовищ. У зв'язку з цим, в момент захвату штаби з валками контактує мала, але відносно чиста поверхня матеріалу штаби. Це сприяє

збільшенню коефіцієнта тертя при захваті. Існує ще одна причина, що викликає зміну умов тертя при захваті і при сталому процесі прокатки. При гарячій прокатці сталі, нагрітої до високої температури, окалина знаходиться в розм'якшеному стані і виконує роль мастила. Потрапляючи в осередок деформації така окалина сприяє зменшенню коефіцієнта тертя при сталому процесі прокатки. У початковий момент захвату, тобто при ковзанні передніх кромки штаби по валках, окалина не утримується і не потрапляє в осередок деформації. Тому коефіцієнт тертя при захваті знаходиться на більш високому рівні.

Неоднакові умови і коефіцієнти тертя при захваті та при сталому процесі мають місце і при прокатці з рідкими технологічними мастилами. При сталому процесі прокатки із- за гідродинамічного ефекту поліпшуються умови захвату мастила валками, що сприяє збільшенню товщини шару мастила в осередку деформації і зменшенню коефіцієнта тертя. При захваті гострі кромки штаби зчищають і прорізають шар мастила на контакті з валками, внаслідок чого коефіцієнт тертя при захваті також набуває вищих значень.

Приведений аналіз фізичних і кінематичних умов тертя при захваті та при сталому процесі прокатки дає підставу стверджувати, що коефіцієнт тертя f_3 має бути більшим ніж f_y .

Величина коефіцієнта тертя залежить від багатьох факторів (умов) прокатки, головні з яких наведені нижче.

Матеріал валків. Багато даних свідчать про те, що при прокатці на сталевих валках коефіцієнт тертя вище, ніж при прокатці на чавунних. Розходження становить в середньому $15 \div 20\%$. Пояснюється це тим, що в структурі чавуну значну долю складають ледебурит, цементит та графіт, які мають відносно низьку схильність до адгезійної взаємодії (схоплюванню) із власне металевими фазами (ферит, аустеніт).

Стан поверхні валків. Розглядаючи вплив цього фактора, треба враховувати два фактори: шорсткість (мікрорельєф) поверхні та присутність на поверхні налиплих часток металу, окалини, бруду та ін.

Шорсткість поверхні валків сильно впливає на величину коефіцієнта тертя. Зі збільшенням висоти нерівностей коефіцієнт тертя зростає. Дослідні дані свідчать про те, що при зміні шорсткості поверхні валків від 6-7-го класів (за ГОСТ 2789-73) до 2-3-го класів коефіцієнти тертя f_3 і f_y зростають приблизно в 1,5÷2 рази.

Хімічний склад металу. Ті метали, які мають яскраво виражену схильність до схоплювання й налипання, мають підвищені значення коефіцієнта тертя. До таких металів належать нержавіюча сталь (типу Х18Н9Т та ін.), алюміній і його сплави, титан, цинк, свинець. Наприклад, при гарячій прокатці нержавіючої сталі коефіцієнт тертя в 1,3÷1,5 рази вище, ніж для вуглецевої сталі.

Температура прокатки. З підвищенням температури металу T коефіцієнт тертя спочатку зростає, а потім зменшується. Така закономірність спостерігається при прокатці різних сталей і деяких інших металів, наприклад міді. У залежності від хімічного складу сталі та умов нагрівання максимум на кривій може зміщатися в той або інший бік, але найчастіше він знаходиться в межах 700÷1000 °С.

З підвищенням температури металу зростає шар оксидів на його поверхні. Спочатку оксиди викликають підвищення коефіцієнта тертя, а потім міцність їх зменшується, і вони починають відігравати роль мастила, сприяючи зниженню сил тертя.

Швидкість прокатки. Зі збільшенням швидкості прокатки коефіцієнт тертя знижується. Результати, одержані для випадку прокатки низьковуглецевої сталі при 1200÷1250 °С наведені на рисунку 1.2.

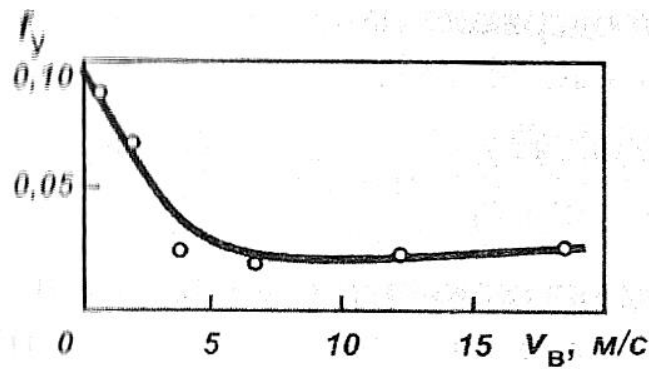


Рисунок 1.2 – Залежність коефіцієнта тертя f_y від швидкості при холодній прокатці з пальмовим мастилом (за Стоуном)

Чіткі дані щодо впливу швидкості на коефіцієнт тертя одержані при холодній прокатці з технологічними мастилами. Різде зниження коефіцієнта тертя спостерігається при підвищенні швидкості приблизно до 5 м/с. Дослідження показали, що прямою причиною падіння коефіцієнта тертя є збільшення кількості мастила, що втягується до осередку деформації.

Технологічні мастила сприяють зниженню сили тертя на контактних поверхнях в осередку деформації і зменшенню зносу валків. Ефективність дії мастила залежить від двох факторів: в'язкості мастила і вмісту в ньому поверхнево активних речовин (жирних кислот, їх похідних та ін.).

Зі збільшенням в'язкості росте товщина шару мастила на контактних поверхнях, що призводить до зменшення коефіцієнта тертя (рис. 1.3).

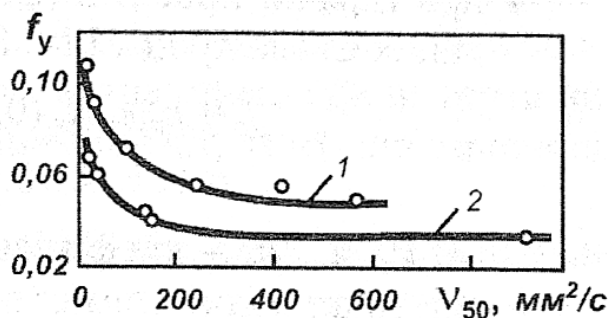


Рисунок 1.3 – Залежність коефіцієнта тертя f_y від в'язкості та виду мастила (v_{50} – кінематична в'язкість мастила при 50 °C): 1 – мінеральні мастила; 2 – рослинні мастиал

В якості мастила застосовуються в основному мінеральні та рослинні олії в чистому вигляді або у вигляді водомасильних сумішей (емульсій). Мінеральні олії майже не містять поверхнево активних речовин і мають більш низьку масильну здатність, ніж рослинні олії. Це видно з порівняння кривих 1 і 2 на рисунку 1.3.

Найбільш ефективними щодо зниження коефіцієнта тертя є ті мастила, які мають високу в'язкість і містять поверхнево активні речовини. Прикладом такого мастила може служити касторова олія.

Наприкінці цього підрозділу наведемо формули для розрахунку коефіцієнта тертя:

- при гарячій прокатці (формула одержана на основі дослідних даних С. Екелунда, І.М. Павлова, М.М. Гета та ін.):

$$f_s = k_n k_m k_v (0,84 - 0,0004T); \quad (1.34)$$

$$f_y = k_n k_m k_v (0,55 - 0,00024T); \quad (1.35)$$

де k_n , k_m , k_v – коефіцієнти, що враховують стан поверхні і матеріал валків, вміст вуглецю в сталі і швидкість прокатки, відповідно (конкретні значення можна знайти у спеціалізованих виданнях);

T – температура металу, °С.

- при холодній прокатці (формула О.П. Грудєва):

$$f_y = \frac{k_{мст} [1 + (0,4 + 0,01\varepsilon)R_z]}{1 + 0,25\sqrt{v_{50}} - 0,005v_{50}} \left[0,07 - \frac{0,1v_B^2}{2(1+v_B) + 3v_B^2} \right] \quad (1.36)$$

де $k_{мст}$ - коефіцієнт, що враховує природу мастила;

ε - відносне обтиснення, %;

R_z - висота нерівностей на поверхні валків, мкм;

v_{50} – кінематична в'язкість мастила при 50 °С, мм²/с.

1.4 Умови захвату штаби валками

Здійснення процесу прокатки обмежено співвідношенням сили, необхідної для деформації штаби та сил тертя, що діють з боку валків на штабу. Розглянемо умови початку процесу прокатки – захвату штаби валками.

Якщо заштовхуюча сила Q , за допомогою якої штаба підводиться до валків, є малою і не викликає значного змінання крайок, захоплення називається *вільним* або *природним*. Таке захоплення найчастіше зустрічається на практиці.

У точках дотику (рис. 1.4) з боку валків на штабу діють сили нормального тиску N та сили тертя T . Сили тертя прагнуть зтягнути штабу до зеву валків, а сили нормального тиску перешкоджають цьому. Для здійснення захоплення необхідно, щоб горизонтальні складові сил тертя T_f були більшими за горизонтальні складові сил нормального тиску N_x або дорівнювали їм. Математично ця умова може бути представлена у такому вигляді:

$$N_x \leq T_{fx}. \quad (1.37)$$

Зі схеми сил на рисунку 1.4 знаходимо:

$$N_x = N \sin \alpha_3; \quad (1.38)$$

$$T_{fx} = T_f \cos \alpha_3. \quad (1.39)$$

Використаємо умову тертя Амонтона:

$$T_f = f_3 N, \quad (1.40)$$

де f_3 – коефіцієнт тертя при ковзанні крайок штаби по валках, називаний у подальшому *коефіцієнтом тертя при захваті*. Тоді одержимо:

$$T_{fx} = f_3 N \cos \alpha_3. \quad (1.41)$$

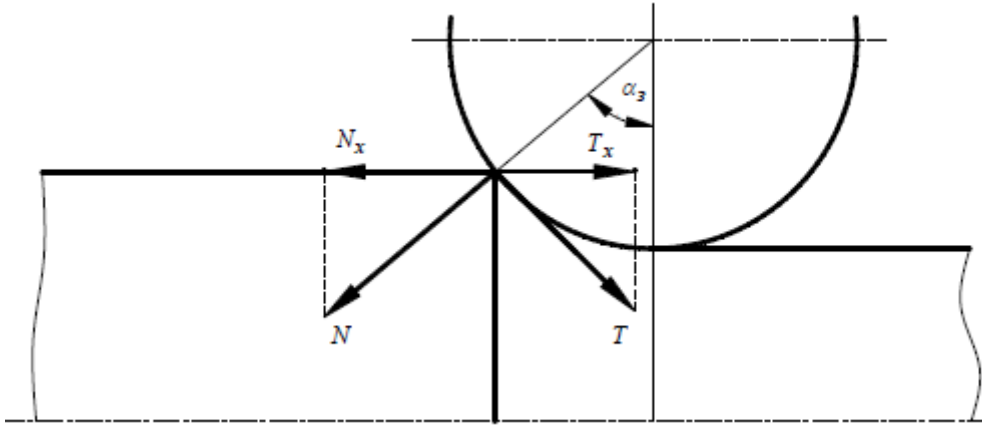


Рисунок 1.4 – Схема сил, що діють в початковий момент захвату

Умова (1.37) прийме вид:

$$N \sin \alpha_3 \leq f_3 N \cos \alpha_3. \quad (1.42)$$

Розділивши ліву та праву частини цього виразу на $N \cos \alpha_3$, одержимо:

$$\operatorname{tg} \alpha_3 \leq f_3. \quad (1.43)$$

Формула (1.43) є умовою вільного початкового захвату: щоб відбулося захоплення штаби валками, тангенс кута захвату повинен бути меншим за коефіцієнт тертя при захопленні або, принаймні, дорівнювати йому.

Часто умову захвату виражають у трохи іншому, ще більш простому вигляді. Оскільки $f_3 = \operatorname{tg} \beta_3$, де β_3 – кут тертя при захваті, замість формули (1.43) можна написати $\operatorname{tg} \alpha_3 < \operatorname{tg} \beta_3$; отже,

$$\alpha_3 \leq \beta_3. \quad (1.44)$$

Таким чином, щоб відбулося захоплення штаби валками, кут захвату повинний бути меншим або рівним куту тертя. Гранична величина, кута захвату цілком залежить від величини коефіцієнта тертя f_3 . Чим більшим є коефіцієнт тертя, тим вищою є захоплювальна здатність валків.

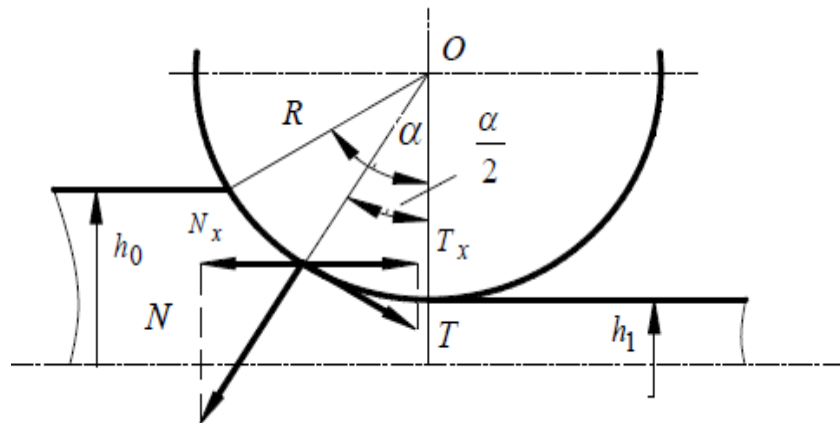


Рисунок 1.5 – Сили, що діють при сталому процесі прокатки

Максимальне значення кута захвату визначають з рівняння:

$$\alpha_3 = \beta_3 \quad (1.45)$$

Рівнянн (1.45) представляє собою граничну умову вільного захвату у початковий момент контакту штаби з валками.

Максимальний кут захвату знаходимо з формули:

$$\alpha_3 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_3}{2R}\right) \quad (1.46)$$

де Δh_3 – максимальний обтиск при вільному захваті (визначається з експерименту).

Детально геометрія осередку деформації та умови захоплення металу валками розглянута в роботах [3, 4, 6, 7].

Для засвоєння аналітичних методів визначення геометричних параметрів осередку деформації і коефіцієнту тертя нижче приведені практичні задачі, в яких використані формули з таблиці 1.1 і 1.2.

Таблиця 1.1 – Геометричні співвідношення елементів осередку деформації

Елементи осередка деформації	Формула для розрахунку	Позначення і примітки
1	2	3
Довжина дуги захоплення	$l_d = R_k \alpha_{\text{рад}}$ $l_d = 3,14 D_k \frac{\alpha^0}{360}$	l_d - довжина дуги захоплення; $\alpha_{\text{рад}}$ - кут захоплення; D_k - катаючий діаметр валку
Довжина хорди дуги захоплення	$L_{\text{хорд}} = \sqrt{R_{\epsilon} \Delta h}$	$\Delta h = h_0 - h_1$ - абсолютне обтиснення; $R_k = \frac{D_k}{2}$ - катаючий радіус валку
Довжина проекції дуги захоплення	$l_x = \sqrt{R_{\epsilon} \Delta h} - \frac{\Delta h^2}{4}$	Для простого процесу прокатування
Те ж, з урахуванням пружного стиснення	$l_x = x_2 + \sqrt{R_{\epsilon} \Delta h + x_2^2}$ <p>де</p> $x_2 = \frac{8(1 - \nu^2)}{\pi E} R_p$ <p>Для сталевих валків при $E = 22,0 \cdot 10^4$ МН/м² ($2,2 \cdot 10^4$ кГ/мм²) і $\nu = 0,3$</p> $x_2 \sim \frac{R_p}{9500} \text{ мм}$	ν - коефіцієнт Пуансона матеріалу валків; E - модуль пружності;
Те ж, для випадку прокатування у валках різних діаметрів	$l_x = \sqrt{\frac{DD'}{D+D'}} \Delta h = \sqrt{R_{\text{cp}} \Delta h}$ <p>де $R_{\text{cp}} = \sqrt{\frac{DD'}{D+D'}}$</p>	D, D' - діаметри більшого і меншого валків
Кут захоплення, град.	$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{D_{\epsilon}} \right);$ $\alpha \sim 57,3 \frac{\Delta h}{R_{\epsilon}}$	

Критичний кут, град.	$\gamma = \frac{\alpha (1 - \alpha)}{2 \cdot 2\beta}$	
Те ж, рад.	$\gamma = \frac{1,75 \cdot 10^{-2}}{2} \alpha \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right)$	
1	2	3
Максимально t допустиме лінійне обтиснення	Для обтискних, сортових станів і стану кварто: $\Delta h_{\max} = D_k \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + f^2}} \right)$ Для стану тріо Лауга: $\Delta h_{\max} = \frac{D'}{D} (D + D') \sin^2 \left(\frac{21 - 2v}{1 + D'/D} \right)$	$\frac{\Delta h_{\max}}{D} = f \left(\frac{D'}{D} \right)$ для окружних швидкостей валів: 1,5-2,0; 0-2,5-3- 3,5 м/сек; Δh_{\max} визначають по D_k номограмі.
Проекція площі контакту на горизонтальну площину	$\Pi_x = b_{\text{ср}} l_x = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot \sqrt{R_k \Delta h}$	l_x -див. формулу; b_0, b_1 - ширина штаби до і після прокатування; $b_{\text{ср}}$ - середня ширина штаби у осередку деформації; R_k - катаючий радіус.
Те ж, для валів з різними катаючими діаметрами	$\Pi_x = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot \sqrt{\frac{2R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}$	$\Delta h R_1$ і R_2 - радіуси валків ($R_2 < R_1$)
Те ж, при холодній прокатці	$\Pi_x = \frac{b_0 + b_1}{2} \cdot \left(x_2 + \sqrt{R \Delta h + x_2^2} \right)$	
Те ж	Для квадрату, що прокатують з овалу: $\Pi_x = 0,75 b_1 \sqrt{R \Delta h}$ Для овалу, що прокатують з квадрата: $\Pi_x = 0,54 (b_0 + b_1) \sqrt{R \Delta h}$ Для ромба або квадрата, прокатаного з ромба: $\Pi_x = 0,67 b_1 \sqrt{R \Delta h}$	b_0, b_1 - максимальні значення ширини профілю до і після прокатки

Абсолютне обтиснення при рівномірній деформації	$\Delta h = h_0 - h_1$	h_0, h_1 – початкова і кінцева товщина після прокатки
1	2	3
Те ж, при нерівномірній деформації	$\Delta h_{cp} = \frac{F_0}{b_0} - \frac{F_1}{b_1}$	F_0, F_1 – початкова і кінцева площа; b_0, b_1 – ширина штаби до і після прокатки
	<p>Для ромба: $\Delta h_{cp} = 0,5 + 0,6(h_0 - h_1)$</p> <p>Для плоского овалу: $\Delta h_{cp} = h_1 - 0,7h_1$</p> <p>Для круглого овалу: $\Delta h_{cp} = h_0 - 0,85h_1$</p> <p>Для квадрата, прокатаного з овалу: $\Delta h_{cp} = (0,65+0,7)h_0 - (0,55+0,6)h_1$</p> <p>Для круга: $\Delta h_{cp} = 0,85h_0 - 0,79 h_1$</p>	

Таблиця 1.2 – Формули для визначення зовнішнього тертя при прокатці

Назва формули	Формули	Позначення та примітки
Формула Екелунда	Гаряча прокатка $f = m_1 (1,05 - 0,0005t)$	Використовується при розрахунку низьковуглецевої сталі при окружній швидкості $v = 0,2 - 0,3$ м/с. Для сталевих валків $m_1 = 1$, а для відбілених валків $m_1 = 0,8$.
Те ж	$f = m_1 m_2 m_3 (1,05 - 0,0005t)$	Значення m_1 див. табл. 1.3, m_2 - див. рис. 1.7, m_3 табл. 1.5.

<p>Формули Ш. Гелеї</p>	<p>При прокатці в сталєних валках $f = 1,05 - 0,0005t - 0,056 v$</p> <p>При прокатці в чавунних валках $f = 0,92 - 0,0005t - 0,056 v$</p> <p>При прокатці в шліфованих сталєних або чавунних валках $f = 0,82 - 0,00051 - 0,056 v$</p>	<p>Дійсні при окружні швидкості валків $v < 5$ м/с. Та температурі прокатки $t > 700$ °С.</p>
<p>1</p>	<p>2</p>	<p>3</p>
<p>Формула О.П.Чекмарьова і В.О. Ніколаєва</p>	$f_v = f_n \cdot k_t \cdot k_{ш} \cdot k_v \cdot k_{п} \cdot k_c$	<p>де f_n - коефіцієнт тертя процесу прокатки, який встановився при $k_t = k_v = k_c = k_{п} = 1$ в функції кута захоплення α і параметра l/H_{cp} (див. рис. 1.8)</p> $\frac{1}{H_{cp}} = \frac{\sqrt{R\Delta h}}{\sqrt{Hh}}; \alpha = \frac{1}{R} = \frac{\sqrt{R\Delta h}}{R}$ <p>Коефіцієнт, який враховує</p> <p>k_t - температуру металу;</p> <p>$k_{ш}$ - твердість поверхні валку по Шору;</p> <p>k_c - вміст вуглецю;</p> <p>k_v - окружна швидкість валків (рис. 1.8);</p> <p>$k_{п}$ - стан поверхні валків.</p>
	$f = \operatorname{tg}\beta,$	<p>де β - кут тертя</p>
<p>Формула О.П. Грудєва</p>	<p>Холодне прокатування</p> $f_x = k_i \left[0,07 - \frac{0,1 \cdot v_{\dot{a}}^2}{2(1 + v_{\dot{a}}) + 3v_{\dot{a}}^2} \right]$	<p>v_v - окружна швидкість валків;</p> <p>k_m - коефіцієнт, який враховує вплив змащування (див. табл. 1.6)</p>

1.5 Практичні задачі до розділу 1

Задача № 1. В круглий калібр діаметром 60 мм задається овальна штаба шириною 56 мм і заввишки 88,4 мм. Площа овальної штаби дорівнює $f_{\text{ов}} = \frac{2}{3} b \cdot h \sim 33 \text{ мм}^2$. Визначити величину середнього обтиску $\Delta h_{\text{ср}}$.

Задача № 2. Дано: розміри штаби до прокатки $h_0 \times b_0 \times l_0 = 120 \times 150 \times 4000$ мм, після прокатування – $h_1 \times b_1 \times l_1 = 90 \times 160 \times 5000$ мм. Робочий діаметр валу $D_k = 600$ мм. Визначити: α , l_d , $l_{\text{хорд}}$, l_x і P_x .

Задача № 3. Визначити контактну площу при прокатці сляба на трьохвалковому стані 750/500/750. Ширина сляба до прокатування $b_0 = 250$ мм, лінійне обтиснення $\Delta h = 30$ мм, ширина сляба після прокатки $b_1 = 0,259$ мм.

Задача № 4. Квадратною заготовку перетином 14×14 мм прокатують на стані дуо $D_k = 300$ мм в плоскому овальному калібрі $8,5 \times 22,6$ мм.

Визначити контактну площу металу з валками, прийнявши лінійне обтиснення $\Delta h = h_0 - 0,7 h_{\text{ов}}$.

Задача № 5. Обчислити контактну поверхню при прокатці круга $d = 26$ мм з овалу розмірами $24,4 \times 35,5$ мм і квадрат 25×25 мм з овалу $19,8 \times 49,5$ мм. Діаметр валів $D_1 = 300$ мм при прокатуванні круга і $D_2 = 400$ мм при прокатці квадрата.

Задача № 6. Визначити контактну площу при прокатці ромба з розмірами діагоналей $170 \times 199,2$ мм з ромба $219,2 \times 190,6$ мм. Діаметр валів $D_k = 500$ мм.

Задача № 7. При прокатці штаби у валках з робочим діаметром 800 мм отримали обтиснення $\Delta h = 27$ мм. Визначити кут захоплення металу валками.

Задача № 8. До якої товщини можливо обтиснути штабу завтовшки 500 мм у валках діаметром $D_k = 1050$ мм, якщо коефіцієнт тертя $f = 0,4$, а $\alpha = \beta$?

Задача № 9. На сталевих валках з робочим діаметром 450 мм прокотили заготовку із сталі 20 квадратного перетину, із стороною 100 мм. Визначити, до якої товщини за один прохід і при якому коефіцієнті тертя f можна прокатати цю заготовку, якщо $\Delta h/D_k = 1/12$ і $\beta = \alpha$.

Задача № 10. Прокатили штабу заввишки 100 мм. Діаметр валків 600 мм, коефіцієнт тертя $f = 0,2$. Чи можливе захоплення або прокатка штаби до товщини 90 мм за один прохід?

Задача № 11. На безперервному листовому стані 1680 кварто робочий діаметр валків якого рівний $D_k = 610$ мм, прокотили в холодному стані штабу із сталі 10Г2А товщиною 2,5 мм з відносним обжиманням 28%. Визначити кут захоплення α і кінцеву товщину штаби h_1 .

Задача № 12. На трьох валковій стані Лаута 750/350/750 прокотили сталеву штабу завтовшки $h_0 = 45$ мм в другому проході з обтисканням $\Delta h = 5,8$ мм, коефіцієнт контактного тертя $f = 0,45$. Визначити середній кут захоплення $\alpha_{\text{ср}}$.

Задача № 13. Прокотили сталь марки 08кп на сталевих валках діаметром $D_k = 800$ мм. Поверхня валків - зношена. Твердість поверхні валків 45 один. по Шору. Окружна швидкість валків $v_B = 3$ м/с. Температура металу $t = 1100$ °С. Товщина штаби до прокатки $h_0 = 60$ мм, обтиснення $\Delta h = 20$ мм. Ширина штаби до прокатки $b_0 = 150$ мм.

Таблиця 1.3 – Значення коефіцієнта m_1 в рівнянні С. Екелунда залежно від матеріалу валків і їх стану:

Матеріалу валків і їх стан	m_1
Нові сталеві	1,1
Сталеві з сіткою розпалу	1,1 – 1,2
Нові чавунні напівтверді	0,8 – 0,9
Чавунні з сіткою розпалу	1,0 – 1,1
Чавунні сортові, з відбіленою поверхнею	0,8
Чавунні листові шліфовані	0,65 – 0,75
Стальні, термічно оброблені, шліфовані (для лабораторних станів)	0,7 – 0,9

Із рисунку 1.7 і 1.8 можна визначити всі коефіцієнти даного рівняння. При розрахунку $f_{и}$ із рис.1.7 спочатку визначаємо деякі значення. Тоді $f_{и} = 0,19$. Коефіцієнти k_t , $k_{ш}$, k_c , k_v знаходять з рисунку 1.9. Коефіцієнт $k_{п}$ беремо із наступних даних.

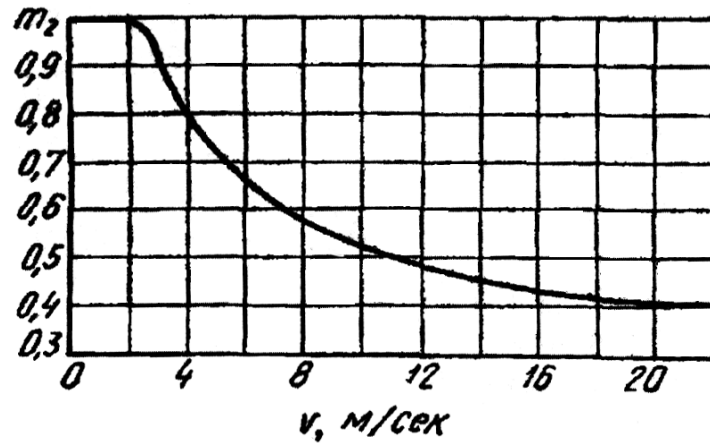


Рисунок 1.7 – Значення m_2 для розрахунків коефіцієнта тертя по рівнянню Б.П. Бахтінова

Таблиця 1.4 – Значення коефіцієнта $k_{п}$, що враховують стан поверхні валків

Стан поверхні валків	$k_{п}$
Валки грубошліфовані	1,0
Валки грубо оброблені з налиплим металом	1,3
Валки з насічкою або накатуванням	1,5

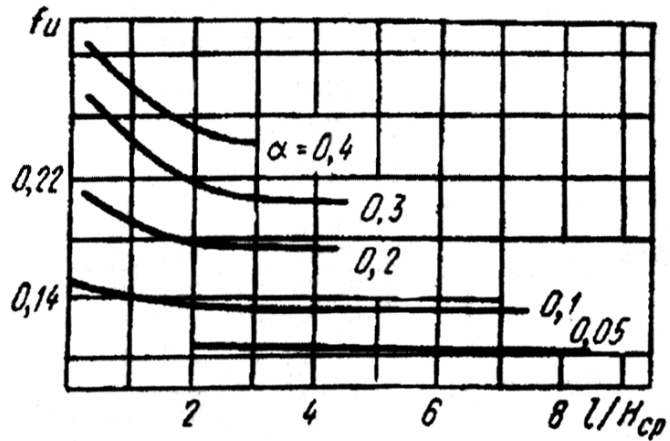


Рисунок 1.8 – Зміни вихідного коефіцієнта тертя f_u в залежності від параметрів l/H_{cp} і α (до табл. 1.4)

Задача № 14. На одноклітьовому стані кварто прокатили лист із нержавіючої сталі в холодному стані з швидкістю $v = 3$ м/с. Валки сталеві, змащуються емульсією. Визначити коефіцієнт тертя f_x .

За даними О.П. Грудєва (табл. 1.6 і 1.7) при прокатці нержавіючої сталі з використанням машинного масла і при швидкості прокатки 0,3 м/с. коефіцієнт тертя $f_x = 0,075$.

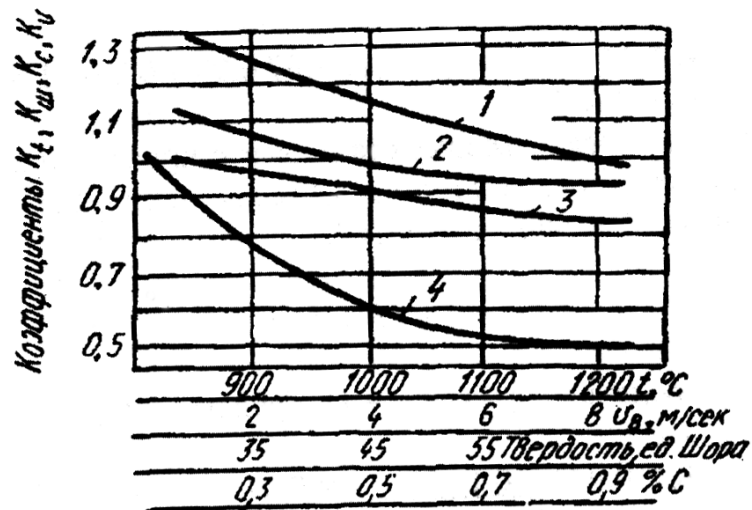


Рисунок 1.9 – Зміни поправочних коефіцієнтів в залежності від відповідних факторів (до табл. 1.4): 1 - $k_t = F(t)$; 2 - $k_{sh} = F$ (твердість по Шору); 3 - $k_c = F(\%C)$; 4 - $k_v = F(v)$.

Таблиця 1.5 – Значення коефіцієнта m_3 в рівнянні С. Екелунда

Сталь	Марка	m_3
Вуглецеві	Ст.1	1,00
Ледебуритні	P18,X12	1,10
Перлітно-мартенситні	ШХ15	1,30
Аустенітні	X13H4Г9	1,40
Аустенітні з включеннями фериту або ледебуриту	X18H10T	1,44
Феритні	X17Ю5	1,55
Аустенітні з включеннями карбідів	X15H60	1,62

Таблиця 1.6 – Вплив змащування на коефіцієнт тертя

Вид змазки	Середня величина коефіцієнта тертя f_y	k_M
Сухі валки (чисті)	0,086	1,55
Машинне масло	0,075	1,35
Веретенне масло	0,070	1,25
Вода	0,058	1,0
Емульсія (10%-на)	0,056	1,0
Керосин	0,053	1,0
Бавовняне масло	0,057	0,9
Касторове	0,050	0,9
Пальмове	0,048	0,9

Таблиця 1.7 – Вплив змащування і швидкості прокатки на коефіцієнт тертя при холодній прокатці

Мастило	Швидкість прокатування, м/с			
	< 3	< 10	< 20	> 20
Емульсія	0,14	0,12 - 0,10	-	-

Мінеральне масло	0,12 - 0,10	0,10 - 0,09	0,08	0,06
Пальмове масло	0,08	0,06	0,05	0,03

1.6 Контрольні питання до розділу 1

1) Що називається осередком деформації? У чому полягає різниця між геометричним та фізичним осередком деформації при прокатці?

2) Наведіть визначення основних параметрів осередку деформації при прокатці: кут захвату; дуга контакту; абсолютне та відносне обтиснення; коефіцієнт витяжки.

3) Що таке фактор форми осередку деформації і як його визначають?

4) Наведіть всі показники, що характеризують поперечну деформацію штаби і поясніть їх сенс.

5) В чому полягає сутність умови сталості об'єму металу при ОМТ?

6) Які коефіцієнти деформації розрізняють під час прокатки? Чим відрізняється коефіцієнт обтиску від коефіцієнтів розширення і витяжки?

7) За якими параметрами визначають коефіцієнт витяжки металу? Чи можлива прокатка при коефіцієнті витяжки, який дорівнює або менше 1?

8) Чому дорівнює сума трьох дійсних відносних деформацій при прокатці, узятих по трьом головним вісям (напрямам)? З допомогою якої умови доводиться це положення?

Література до розділу 1: [1, 2, 5, 12]

2 КІНЕМАТИКА ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ

2.1 Стадії процесу прокатки

Процес прокатки можна розділити на три стадії: *захоплення, усталений процес та викид*. На кожній з цих стадій закономірності деформації мають свої особливості.

Основна стадія прокатки - усталений процес. На цій стадії всі параметри прокатки не змінюються в часі. Деформація здійснюється при наявності передньої та задньої зовнішніх зон.

При усталеному процесі прокатки через будь-який поперечний переріз осередку деформації в одиницю часу проходить однакова кількість металу. Ця умова в теорії прокатки називається *умовою сталості секундних об'ємів*. Виразимо її в математичній формі.

Об'єм металу, що проходить через будь-який поперечний переріз осередку деформації в одиницю часу (секунду), становить $F_{\varphi} l_{\varphi t} / \tau = F_{\varphi} v_{\varphi}$, де F_{φ} - площа поперечного перерізу штаби під довільним кутом φ (рис. 2.1); $l_{\varphi t}$ -

поздовжнє переміщення штаби через обраний переріз за час t , v_φ – швидкість штаби в даному перерізі.

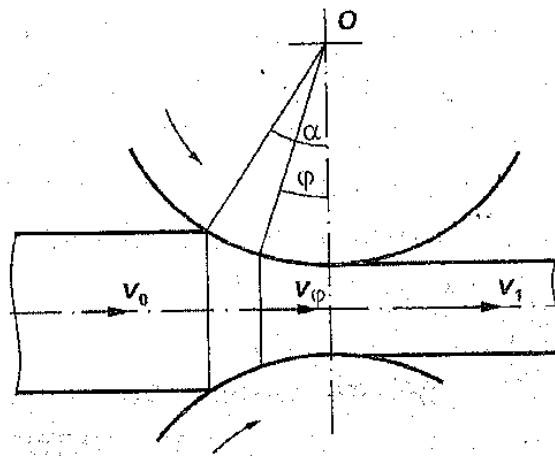


Рисунок 2.1 – До виведення умови сталості секундних об'ємів

Отже, умову сталості секундних об'ємів можна сформулювати у такому вигляді:

$$F_\varphi v_\varphi = \text{const.} \quad (2.1)$$

Для трьох перерізів - вхідного, будь-якого проміжного та вихідного можна написати:

$$F_0 v_0 = F_\varphi v_\varphi = F_1 v_1. \quad (2.2)$$

Формула (2.2) дозволяє визначити співвідношення швидкостей руху переднього та заднього кінців штаби при усталеному процесі прокатки:

$$v_1 = F_0 v_0 / F_1 = \lambda v_0. \quad (2.3)$$

Таким чином, відношення швидкості переднього кінця штаби до швидкості заднього кінця дорівнює коефіцієнту витяжки.

2.2 Випередження при прокатці

При обтисненні штаби по висоті частки металу змушені перемішуватися в поздовжньому напрямку. При цьому певна кількість металу видавлюється вперед за ходом прокатки; швидкість цих часток, одержана в результаті деформації, підсумовується з коловою швидкістю валків. Інша частина зміщеного об'єму металу відтискується назад, проти ходу прокатки; швидкість цих часток віднімається від колової швидкості валків. Таким чином, в осередку деформації утворюються дві області: *зона випередження*, де швидкість штаби є більшою за колову швидкість валків, та *зона відставання*, де співвідношення швидкостей є зворотним.

Між зонами випередження та відставання є переріз, де швидкості валків та штаби є однаковими. Це так званий *нейтральний* або *критичний переріз*. Його положення в осередку деформації характеризується величиною *нейтрального* або *критичного кута* γ .

Поздовжня течія металу в осередку деформації під час прокатки характеризується наявністю випередження і відставання. *Випередженням* називається величина, що показує, наскільки швидкість, виходу штаби з валків більше колової швидкості валків.

Випередження S розраховують за формулою:

$$S = \frac{v_1 - v_B}{v_b} . \quad (2.4)$$

Випередження частіше визначають у відсотках:

$$S = \frac{v_1 - v_B}{v_b} \cdot 100\% . \quad (2.5)$$

Якщо на валки нанести кернові позначки з відстанню поміж ними L_B , то на прокатаній штабі отримаємо відбитки цих позначок поміж ними – $L_{ш}$.

Вимірявши відстані L_B і $L_{ш}$ визначають випередження керновим методом (рис. 2.2):

$$S = \frac{L_{ш} - L_B}{L_B} \quad (2.6)$$

Якщо випередження S є величиною заданою, швидкість виходу штаби з валків визначають так:

$$v_1 = v_B (1 + S). \quad (2.7)$$

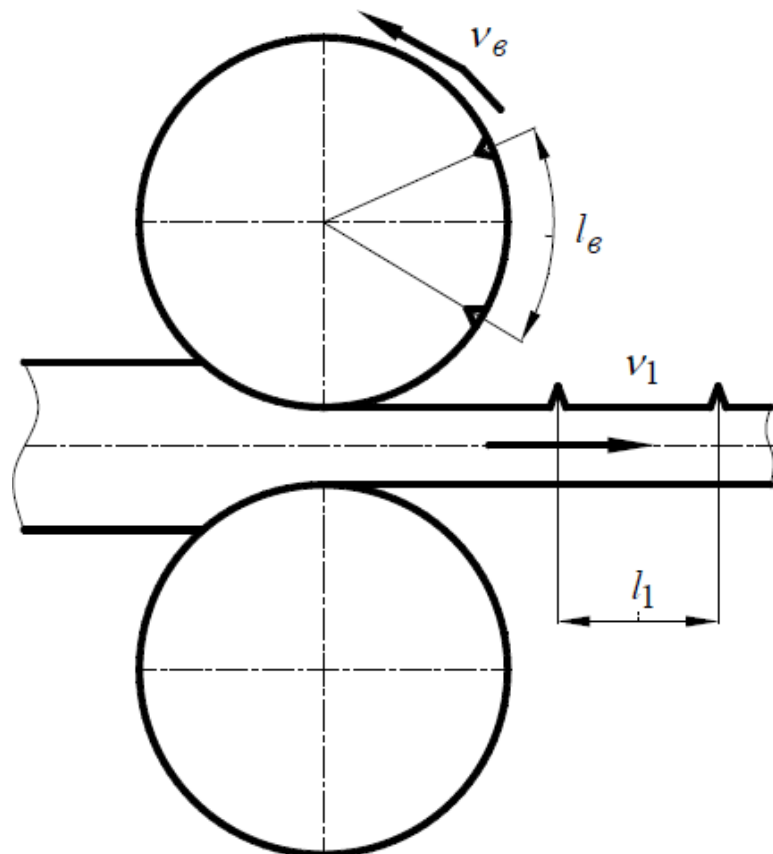


Рисунок 2.2 – Кернові відбитки на валку та штабі

Величина, названа *відставанням*, характеризує співвідношення швидкостей штаби та валків на вході в осередок деформації. Цей термін підкреслює, що швидкість руху заднього кінця штаби менша за колову швидкість валків (точніше, є меншою за горизонтальну проекцію швидкості валків у перерізі входу).

Відставання $S_{від}$ розраховують за формулою:

$$S_{від} = \frac{v_B \cos \alpha - v_0}{v_B} . \quad (2.8)$$

Випередження та відставання величини взаємозалежні. Знаючи одну з них, можна визначити іншу:

$$S_{від} = 1 - \frac{1+S}{\lambda \cos \alpha} . \quad (2.9)$$

Численні дослідження свідчать про те, що в більшості випадків прокатки випередження знаходиться в межах 1÷10%, тобто його чисельне значення невелике. Що ж стосується відставання, то воно може становити 20÷10% і більше.

Випередження можна знайти теоретично, розглянувши зміну швидкостей металу в осередку деформації, використовуючи закон сталості секундних об'ємів і прийнявши, що розширення відсутнє (формула С. Фінка):

$$S = (1 - \cos \gamma) \left(\frac{D}{h_1} \cos \gamma - 1 \right) . \quad (2.10)$$

Якщо прийняти $\cos \gamma \approx 1 - \gamma^2/2$, одержимо формулу С. Екелунда:

$$S = \frac{\gamma^2}{2} \left(\frac{D}{h_1} - 1 \right) . \quad (2.11)$$

У багатьох випадках, особливо при прокатці тонких штаб, $D/h \gg 1$. Тоді одержимо спрощену формулу Головіна-Дрездена:

$$S = \frac{\gamma^2 R}{h_1}. \quad (2.12)$$

де R – радіус валків, мм;

γ – кут нейтрального перерізу в осередку деформації, рад;

h_1 – товщина штаби після прокатки, мм

Кут γ визначають за формулою трьох кутів Екелунда-Павлова:

$$\gamma = \frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{2\beta} \right) \quad (2.13)$$

де α визначається за формулою (1.5), а кут тертя

$$\beta = \arctg f_y, \quad (2.14)$$

де f_y – коефіцієнт тертя.

2.3 Середня швидкість деформації

Швидкість деформації при прокатці, як і при інших способах обробки тиском, необхідно розраховувати для правильного визначення межі текучості металу. Як відомо з теорії пластичності, швидкість Інформації становить:

$$u = d\varepsilon/dt. \quad (2.15)$$

це $d\varepsilon$; елементарне відносне обтиснення за безкінечно малий проміжок часу dt .

Маємо $d\varepsilon = dh/h$, отже, можна написати:

$$u = (dh/dt)(1/h). \quad (2.16)$$

Зауважимо, що $dh/dt = v_h$, де v_h - швидкість переміщення деформуючого інструмента.

Враховуючи це, одержимо:

$$u = v_h / h. \quad (2.17)$$

При прокатці величини v_h та h змінюються протягом осередку деформації. Отже, швидкість деформації також є змінною величиною. Знайдемо закономірність зміни швидкості деформації уздовж дуги контакту.

У будь-якому поперечному перерізі осередку деформації, який знаходиться під кутом φ , швидкість деформації становить:

$$u_\varphi = 2v_{y\varphi}/h_{cp}. \quad (1.18)$$

де $v_{y\varphi}$ - швидкість стискання в обраному перерізі (з боку одного валка).

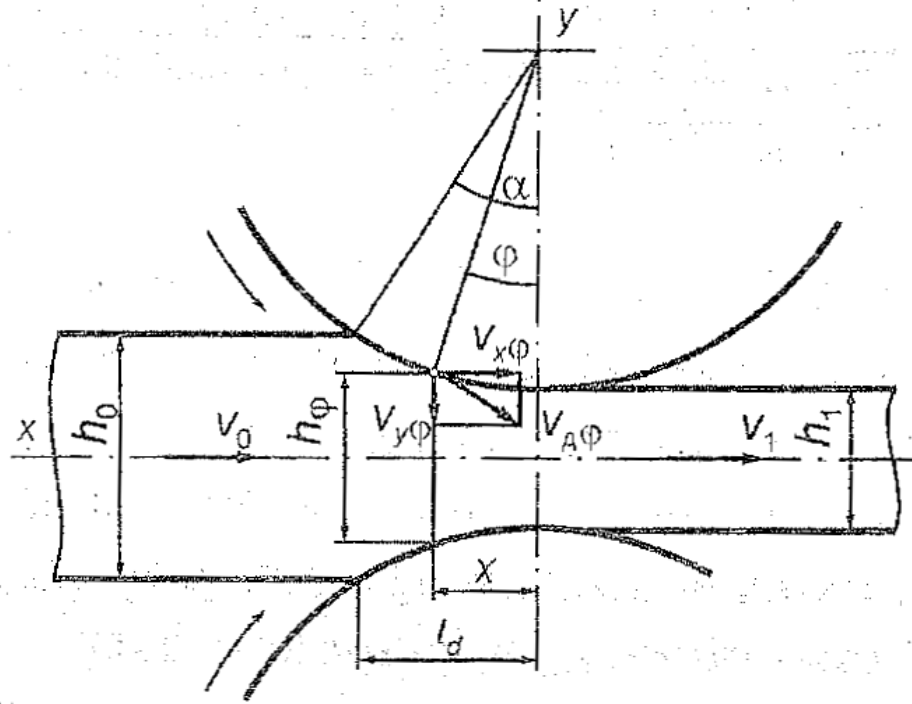


Рисунок 2.3 – До визначення середньої швидкості деформації

З рисунку 2.3 видно, що:

$$v_{y\phi} = v_{x\phi} \operatorname{tg} \phi. \quad (2.19)$$

де $v_{x\phi}$ - горизонтальна швидкість металу в даному перерізі (у попередніх параграфах цю величину позначили спрощено v_ϕ).

Швидкість $v_{x\phi}$ визначаємо з умови сталості секундних об'ємів

$$v_{x\phi} = v_1 h_1 / h_\phi$$

Таким чином, швидкість стискання у будь-якому поперечному перерізі становить:

$$v_{y\phi} = v_1 (h_1 / h_\phi) \operatorname{tg} \phi. \quad (2.20)$$

Підставляючи це значення $v_{y\phi}$ у вихідну формулу (2.18), одержимо:

$$u_{\varphi} = 2v_1 h_1 \operatorname{tg} \varphi / h_{\varphi}^2. \quad (2.21)$$

Формула (2.21) є законом зміни швидкості деформації уздовж контакту.

Визначимо середню швидкість деформації згідно з рішенням О.І. Целікова:

$$u_{\text{ср}} = \frac{1}{l_d} \int_0^{l_d} u_{\varphi} dx. \quad (2.22)$$

Введемо сюди значення u_{φ} з формули (2.21):

$$u_{\text{ср}} = \frac{2v_1 h_1}{l_d} \int_0^{l_d} \frac{\operatorname{tg} \varphi}{h_{\varphi}^2} dx. \quad (2.23)$$

Виберемо в якості основної змінної товщину штаби h_{φ} і відповідно проведемо інтегрування у межах від h_1 , до h_0 . Виділяючи елементарний прямокутний трикутник зі сторонами $dh_{\varphi}/2$ і dx , який примикає до контактної поверхні, знаходимо:

$$dx \operatorname{tg} \varphi = dh_{\varphi} / 2. \quad (2.24)$$

Враховуючи це, перепишемо інтеграл (2.23) у вигляді:

$$u_{\text{ср}} = \frac{v_1 h_1}{l_d} \int_0^{l_d} \frac{dh_{\varphi}}{h_{\varphi}^2} dx. \quad (2.25)$$

Інтегруємо:

$$u_{\text{ср}} = \frac{v_1 h_1}{l_d} \left| -h_{\varphi}^{-1} \right|_{h_1}^{h_0} = \frac{v_1 h_1}{l_d} \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_0} \right). \quad (2.26)$$

Після нескладних перетворень одержимо:

$$u_{\text{ср}} = \frac{v_1}{l_d} \cdot \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{v_1 \varepsilon}{l_d} = \frac{v_1 \alpha}{h_0}. \quad (2.27)$$

Також відома формула С. Екелунда:

$$u_{\text{ср}} = \frac{2v_B \sqrt{\Delta h/R}}{h_0 + h_1} = \frac{v_B \alpha}{h_{\text{ср}}}. \quad (2.28)$$

Характерні значення $u_{\text{ср}}$:

Заготовочні стани	$v_{\text{в.мак}} = 5 \div 7 \text{ м/с}$	$u_{\text{ср}} = 0,5 \div 30 \text{ с}^{-1}$
Дрібносортні стани	$v_{\text{в.мак}} = 25 \text{ м/с}$	$u_{\text{ср}} < 250 \text{ с}^{-1}$
Широкоштабові стани	$v_{\text{в.мак}} = 20 \text{ м/с}$	$u_{\text{ср}} < 500 \text{ с}^{-1}$
Дротові стани	$v_{\text{в.мак}} = 60 \div 100 \text{ м/с}$	$u_{\text{ср}} < 1000 \text{ с}^{-1}$

Детально кінематики осередку деформації розглянута в роботах [3, 4, 6, 7].

Для засвоєння аналітичних методів визначення кінематичних параметрів осередку деформації нижче приведені практичні задачі, в яких використані формули з таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Формули по кінематиці процесу прокатки

Назва формули	Формула	Позначення і застосування
1	2	3
Окружна швидкість	$v_s = \frac{\pi D_k n}{60}$	D_k - катаючий діаметр валка; n - число оборотів валків

валків		
Швидкість прокатки в критичному перетені	$v_{\gamma} = v_B \cdot \cos \gamma$	v_{γ} - горизонтальна проекція швидкості частинок металу в критичному перетині
Критичний кут	$\cos \gamma = \frac{D_{\kappa} + h_1}{2D_{\kappa}} \pm \sqrt{\frac{D_{\kappa} + h_1}{2D_{\kappa}} - \frac{v_{h1} h_1}{v_{\sigma} D}}$ <p>Це рівняння дає можливість розрахувати величину критичного кута γ по величині випередження S: $S = \frac{v_{h1}}{v_{\hat{a}}} - 1$</p>	γ - критичний кут; v_{h1} - швидкість штаби при виході з осередку деформації; h_1 - товщина штаби після прокатки.
	$\frac{v_{h1}}{v_{\sigma}} = \frac{F_{h0}}{F_{h1}} = \mu$	μ - коефіцієнт витяжки; F_{h0}, F_{h1} - площа перетину штаби до і після прокатки; v_{h1} і v_B - швидкість штаби при виході і вході з валків
	$v_x = \frac{v_{h1}}{D_{\hat{e}}} \frac{h_1}{(1 - \cos \delta) + h_1}$	v_x - швидкість течії металу в будь-якому перетині осередку деформації δ - вільний кут захоплення
Випередження	$S = \frac{v_{h1} - v_{\hat{a}}}{v_{\hat{a}}}$ $S = \frac{L_{h1} - L_{\hat{a}}}{L_{\hat{a}}}$ $L_h = L_x(1 + at)$	S - випередження; L_{h1}, L_B - відстань між відпечатками на штабі і на валку; $a = 13 \cdot 10^{-6}$ - коефіцієнт теплового розширення сталі
	$1 + S = \frac{v_{h1}}{v_{\hat{a}}}$ $1 + S_{h0} = \frac{\mu \cos}{1 + S}$	$1 + S$ - коефіцієнт випередження; $1 + S_{h0}$ - коефіцієнт відставання
1	2	3
	$\frac{v_i - v_{\hat{a}}}{v_{\hat{a}}} = \frac{v_{z\hat{a}} - v_{z\hat{a}}}{v_{z\hat{a}}} = \frac{v_{x\hat{a}} - v_{x\hat{a}}}{v_{x\hat{a}}}$	Вірно для зони випередження; v_z і v_x - складові швидкості валків і металу

	$\frac{v_{\theta} - v_M}{v_M} = \frac{v_{z\theta} - v_{zM}}{v_{zM}} = \frac{v_{x\theta} - v_M}{v_{xM}}$	Вірне для зони відставання
	$v_0 \cdot F_0 = v_{h1} \cdot F_{h1},$ де $v_h = v_B(1 + S)$	Використовують для визначення числа оборотів валків безперервних станів
	$S_{h0} = \frac{D}{h_0} (\cos \gamma - \cos \alpha) \cdot 100\%$	S_{h0} - ковзання в першій зоні деформації
	$S_{h0} = \frac{\mu \cos \alpha}{1 + S} - 1$	S_{h0} - відставання
Рівняння Фінка	$S = \frac{[D(1 - \cos \gamma) + h_1] \cos \gamma}{h_1} - 1$	
Рівняння О.І. Целікова	$S = \left(\frac{R}{h_1} - 0,5 \right) \gamma^2$	
Рівняння Дрездена, або спрощене рівняння Фінка.	$S = \gamma^2 \frac{R}{h_1} \cdot 100\%$	Використовується для прокатки тонких штаб, коли R значно більше h
Рівняння І.М. Павлова	$S = \frac{C_0 [D(1 - \cos \gamma) + h_1] \cos \gamma}{h_1} - 1$	де C_0 - коефіцієнт, залежний від γ / α и $\beta = b_1 / b_0$.
Рівняння Б.П. Бахтінова	$S_{\Delta b} = \frac{1}{3} \frac{\gamma}{\alpha} f \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} + \frac{1}{1 - \mu - 1/\mu(\gamma/\alpha)^2}$	Для визначення випередження з урахуванням потовщення
Формула Фінка, перетворення М.М. Штерновим	$S = \frac{(D_{\dot{\epsilon}} - h) \Delta h}{16 D_{\dot{\epsilon}} h_1} \cdot \left(2 - \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{2 \Delta h}{D_{\dot{\epsilon}}}} \right)^2$	
Рівняння швидкості деформації	$v_{cp} = \frac{v_{h1}}{l_x} \cdot \frac{\Delta h}{h_0}; \quad l_x \sim \sqrt{R \Delta h}$	
1	2	3
Закон сталості секундних	$v_1 F_1 = v_2 F_2 = v_n F_n = const$	

об'ємів		
	$F_1 D_1 n_1 (1 + S_1) = F_2 D_2 n_2 (1 + S_2)$ $= \dots F_n D_n n_n (1 + S_1) = C$	$C = F D_n (1 + S_1)$ - постійна калібрування
	$v_2 (1 + S_2) F_2 > v_1 (1 + S_1) F_1$	Прокатка з урахуванням натягнення штаб між клітьми
	$v_n = \frac{v_{n+1}}{\mu}$	

2.4 Практичні задачі до розділу 2

Задача № 15. Прокатка штаби у валках відбувається за наступних умов: кут захоплення $\alpha = 20^\circ$, окружна швидкість валків $v_B = 2$ м/с, горизонтальна швидкість штаби при вході в валки $v_{h0} = v_{xM} = 1,6$ м/с. Визначити ковзання у різних напрямках у момент захоплення металу валками. Ковзання прийняти однаковим у всіх трьох напрямках. Отже, для визначення ковзання достатньо знати величину швидкості в одному з трьох напрямків.

Задача №16. Визначити величину ковзання і випередження при прокатці штаби в один прохід при наступних даних: товщина штаби до проходу $h_0 = 100$ мм, після проходу $h_1 = 70$ мм. Катаючий діаметр валків $D_k = 650$ мм, коефіцієнт тертя $f = 0,2$.

Задача №17. Визначити максимальну довжину петлі (рис. 2.4) між клітьми № 2 і 3, розташованими в одну лінію, якщо відомі маса мотка $Q = 80$ кг і щільність сталі $\rho = 7800$ кг/м³. Час паузи для передачі штаби з кліті № 2 в кліть № 3 $t = 0,25$ сек. Діаметри валів $D_2 = 260$ мм і $D_3 = 265$ мм. Число оборотів валків $n_2 = n_3 = 600$ об/хв. Товщина штаби до проходу в кліті № 2 $H_2 = 7,5$ мм, після проходу $h_2 = 7$ мм, а до проходу в кліті № 3 $H_3 = 7$ мм, після проходу $h_3 = 6$ мм. Перетин дроту перед задачею в кліть № 3 $q = 40$ мм², коефіцієнт тертя $f_2 = f_3 = 0,25$. Визначають параметри прокатки: робочі діаметри в клітях № 2 і 3 з

урахуванням того, що $D'_2 = D_2 - h_2/2$ і $D'_3 = D_3 - h_3/2$, окружні швидкості валків v_2 і v_3 , кути захоплення α_2 і α_3 , кут тертя β , критичні кути γ_2 і γ_3 .

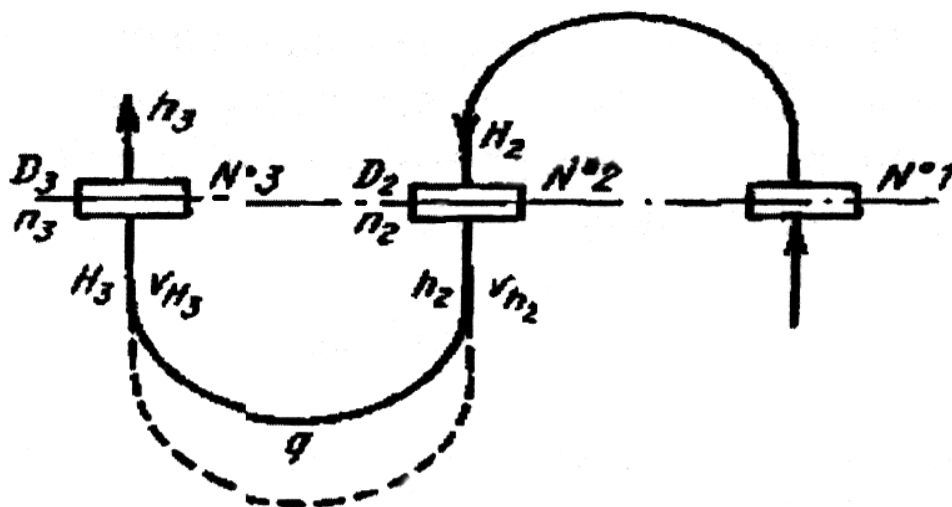


Рисунок 2.4 – До розрахунку довжини петлі при прокатуванні дроту

Потім визначити швидкості металу на виході з клітей № 2 і 3 v_{h2} і v_{h3} з урахуванням випередження:

$$v_{h1} = \frac{[D'_2(1 + \cos\gamma_2) + h_2] \cos\gamma_2}{h_2}$$

$$v_{h3} = \frac{[D'_3(1 - \cos\gamma_3) + h_3] \cos\gamma_3}{h_3}$$

Визначити довжину мотка після кліті № 2:

$$L_2 = \frac{Q}{\rho q} \quad (2.29)$$

Знайти максимальну довжину петлі:

$$L_{\max} = L_2 \left(1 - \frac{v_{h3}}{v_{h1}} \right) + tv_{h3} \quad (2.30)$$

Задача №18. Визначити відношення числа оборотів валків двох клітей безперервного стану при прокатуванні штаби. Дано: $H_2 = 200$ мм; $D_2 = 600$ мм, $H_3 = h_2 = 160$ мм, $D_3 = 620$ мм, $h_3 = 120$ мм, $f_2 = 0,42$, $f_3 = 0,47$. Робочі діаметри $D_2 = 440$ мм і $D_3 = 500$ мм.

Натяжіння металу між клітями і подовжнє обтиснення штаби при прокатці на безперервному стані не спостерігається, коли $v_{h2} = v_{h3}$.

З цієї умови, як доведено І. М. Павловим і Я. С. Галаєм витікає, що:

$$\frac{n_2}{n_3} = \frac{R_3 \cdot h_3 + R_3 \cdot \gamma_3^2}{R_2 \cdot h_2 + R_2 \cdot \gamma_2^2} \quad (2.31)$$

Задача № 19. При 1000 °С в сталевих валках з катаючим діаметром $D_k = 0,6$ м прокатали штабу із сталі марки Ст.5 розмірами $120 \times 150 \times 4000$ мм на штабу з $90 \times 160 \times 5000$ мм. Швидкість валків $v_b = 2,5$ м/с. Визначити кінематичні параметри прокатування: випередження S , відставання S_H швидкість входу v_{h0} і виходу v_{h1} металу з валів і швидкість деформації v_c .

Задача №20. Визначити швидкість прокатки в кліті № 9 безперервного чотирнадцятиклітьового стану 300, має чотири кліті з вертикальним розташуванням валків, якщо відомо, що з кліті № 10 з валками діаметром $D_{10} = 330$ мм при $n_{10} = 400$ об/хв виходить штаба з розмірами 81×6 мм при $t = 900$ °С. Товщина штаби по виході з кліті № 9 $h_9 = 8$ мм при $t_9 = 925$ °С. Матеріал валків - чавун. Матеріал штаби Ст.1.

Задача № 21. З валків кліті № 11 безперервного листового стану 1700 виходить лист із сталі маркою Ст.3 завтовшки $h_{11} = 1,5$ мм з швидкістю (з урахуванням випередження) $v_{11} = 12,5$ м/с. Визначити швидкість прокатки

металу в клітках № 10, 9, 8, 7 і 6 якщо відомі відповідні коефіцієнти витяжки:
 $\mu_{11} = 1,133$; $\mu_{10} = 1,35$; $\mu_9 = 1,44$; $\mu_8 = 1,58$ і $\mu_7 = 1,73$.

2.5 Контрольні питання до розділу 2

1) Пояснити суть випередження та відставання металу в процесі прокатки. Чому в осередку деформації виникають зони випередження та відставання?

2) Яким чином керновим методом визначається випередження?

3) Від яких факторів прокатки залежить випередження за формулою Головіна-Дрездена?

4) Яке співвідношення швидкостей металу відносно колової швидкості валків по зонам осередку деформації? Що таке критичний переріз осередку деформації?

Література до розділу 1: [1, 2, 4, 5, 12]

3 НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І ФОРМОЗМІНЕННЯ ШТАБИ

3.1 Напружено-деформований стан металу

Напружений стан при прокатці, що створюється під дією деформуючого інструмента - валків, характеризується об'ємною схемою із трьома стискаючими напруженнями (*основна схема напруження*) (рис.3.1).

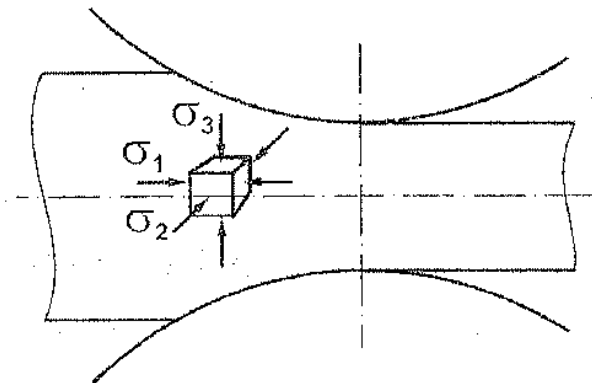


Рисунок 3.1 – Основна схема напруженого стану штаби осередку деформації

Напруження σ_3 створюється тиском з боку валків, σ_1 - підпираючою дією сил тертя в поздовжньому напрямку, σ_2 - підпираючою дією сил тертя в поперечному напрямку, які діють на метал, що прагне йти у розширення.

Схема напруження визначає схему деформацій (рис. 3.2). Причиною деформації є дія σ_3 з боку валків, яка виконує основну (максимальну)

деформацію - обтиснення. Отже, σ_3 максимальне напруження по абсолютній величині: $\sigma_3 = \alpha_{\max}$ і $\epsilon_3 = \epsilon_{\max}$.

Зміщений при обтисненні метал може плинути в поздовжньому напрямку (ϵ_1) - на витяжку та у поперечному напрямку (ϵ_2) - на розширення.

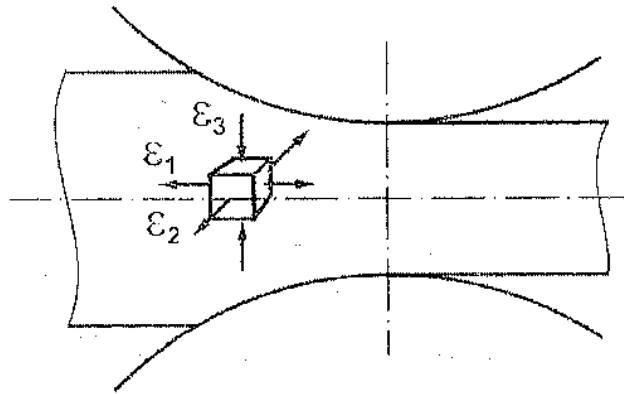


Рисунок 3.2 – Основна схема деформованого стану штаби при прокатці

Відповідно до *закону найменшого опору* метал тече в основному в тому напрямку, де він зустрічає мінімальний опір своєму переміщенню. При прокатці таким напрямком є поздовжній напрямок, тобто зміщений при обтисненні метал тече в основному у витяжку.

Звідси: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$; $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$.

З теорії пластичності відомо, що при $\sigma_2 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ одержуємо $\epsilon_2 = 0$ (плоский деформований стан), при якому $\epsilon_1 = \epsilon_3$. Така схема характерна для випадку прокатки широких штаб.

У реальних процесах *робочі напруження* $\sigma_{\text{роб}}$ у різних об'ємах мі імлу можуть бути також різними. Це пов'язано з тим, що на *основні напруження* $\sigma_{\text{осн}}$ накладаються *додаткові напруження* $\sigma_{\text{дод}}$:

$$\sigma_{\text{роб}} = \sigma_{\text{осн}} + \sigma_{\text{дод}} \quad (3.1)$$

Головна причина появи додаткових напружень - нерівномірність деформації.

Розглянемо прокатку плоскої штаби в фасонному калібрі (рис. 3.3). За рахунок більшого обтиснення в зоні I метал намагається набути більшої витяжки. Але за виходом із осередку деформації штаба є жорстким тілом, тому метал в зоні I і II має однакову витяжку. внаслідок цього в зоні II виникають розтягаючі напруження, в зоні I - стискаючі.

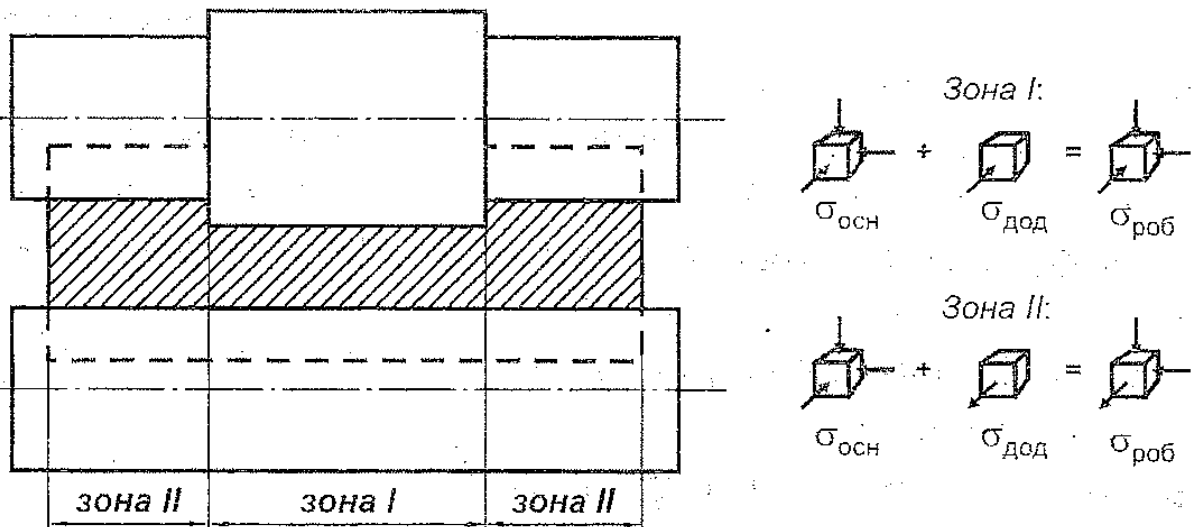


Рисунок 3.3 – Схеми напруженого стану при нерівномірному розподілі обтиску по ширині штаби

3.2 Розподіл деформацій по висоті штаби

Висотна деформація (обтиснення) пов'язана з поздовжньою деформацією (витяжкою) і поперечною деформацією (розширенням) умовою сталості об'єму.

Якщо прийняти, що витяжка всіх шарів штаби однакова (завдяки впливу зовнішніх зон), то доходимо висновку, що розподіл обтиснення по висоті штаби повинен відповідати розподілу розширення. Таким чином, про розподіл обтиснення по висоті можна судити за формою бічних граней. Наприклад, якщо

прокатана штаба має опуклі бічні грані, то це свідчить про те, що обтиснення в середніх шарах більше, ніж у приконтатних шарах.

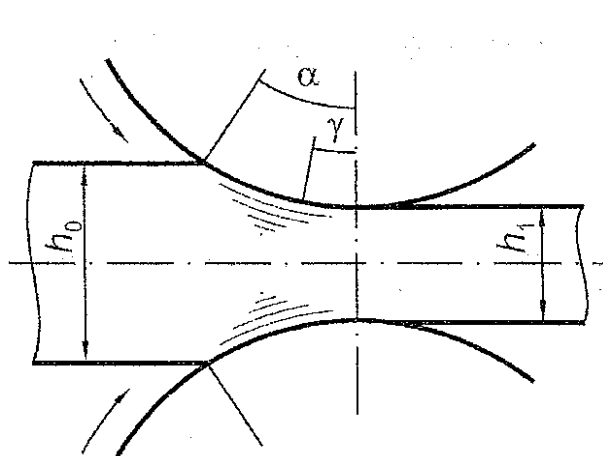


Рисунок 3.4 – Зони ускладненої деформації

Причинами нерівномірного обтиснення штаби є дія сил тертя, нерівномірність розподілу температури по перерізу, геометричні фактори l_d/h_{cp} і b_0/h_0 .

Дія сил тертя призводить до появи зон *утрудненої деформації* (на рис. 3.4 показані штрихуванням), де обтиснення менше, ніж у центральних шарах. Це призводить до переважної деформації центральних шарів (форма бічної поверхні на рис. 3.5, б).

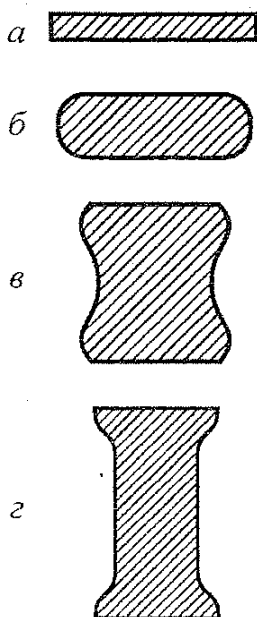


Рисунок 3.5 – Форма поперечного перерізу штаби після прокатки за різних величин параметрів l_d/h_{cp} : а – $l_d/h_{cp} > 3-4$; б – $3-4 > l_d/h_{cp} > 0,6-0,8$; в – $0,6-0,8 > l_d/h_{cp} > 0,1-0,2$; г – $l_d/h_{cp} < 0,1-0,2$.

Нерівномірність температури (зазвичай підвищена температура неохолоджених центральних шарів) призводить до аналогічної картини деформації.

З урахуванням суттєвого впливу фактора форми l_d/h_{cp} на розподіл деформацій по висоті штаби процеси прокатки класифікують за цим параметром таким чином.

Прокатка тонких штаб – $l_d/h_{cp} > 3 \div 4$.

У цьому випадку довжина дуги контакту в кілька разів перевищує середню товщину штаби в осередку деформації. Дія підпираючих сил тертя поширюється на всю товщину штаби. Відповідно до цього деформація розподіляється по висоті тіла майже рівномірно. Бічні крайки штаби після прокатки мають дуже малу опуклість (рис. 3.5, а).

Прокатка штаб середньої товщини – $3 \div 4 > l_d/h_{cp} > 0,6 \div 0,8$. У зв'язку з відносним збільшенням розміру h_{cp} дія сил тертя на середні (по висоті) шари металу слабшає; ці шари деформуються найбільш інтенсивно. У той же час у приконттактних шарах утворюються зони утрудненої деформації. Бічні крайки штаби набувають явно опуклої форми ("одинарної бочки") (рис. 3.5, б).

Прокатка товстих штаб – $0,6 \div 0,8 > l_d/h_{cp} > 0,1 \div 0,2$. За великої товщини штаби деформація стиснення слабо проникає в серединні шари металу. У результаті після прокатки поперечний переріз штаби набуває форми "подвійної бочки" (рис. 3.5, в). Такий розподіл деформацій є причиною виникнення поздовжніх розтягаючих напружень у центральних шарах штаби. Ті шари металу, які одержують найбільш інтенсивне обтиснення (зони А на рис. 3.5, в), впливають на центральні шари, примусово збільшуючи їх витяжку. Розтягаючі напруження навіть можуть викликати поперечні надриви усередині штаби. Внаслідок дії розтягаючих напружень іноді спостерігається також зменшення ширини штаби в середній частині, тобто відбувається поперечна утяжка.

Прокатка особливо товстих штаб $l_d/h_{cp} < 0,1 \div 0,2$. Такі малі значення фактора форми l_d/h_{cp} зустрічаються на практиці, наприклад, при прокатці на ребро плоских злитків (широких штаб). Характерною ознакою цього типу прокатки є відсутність витяжки штаби. Весь метал, що обтискується, зміщується в поперечному напрямку, утворюючи бічні напливи у приконтактній зоні (рис. 3.5, г). На середню (по висоті) частину штаби деформація не поширюється.

Вплив параметра b_0/h_0 на розподіл деформації пояснюється тим, що від його величини залежить інтенсивність поперечного плину металу (в розширення). Чим менше b_0/h_0 (тобто чим вузьчою є штаба), тим легше метал йде на розширення. Тому, при прокатці вузьких штаб нерівномірність деформації вище, ніж при прокатці широких.

3.3 Розширення металу під час прокатки

Для практики важливо знати повне розширення Δb , якого набуває штаба при проходженні через валки. Це має велике значення при прокатці в калібрах, тому що неправильне урахування розширення може призвести або до переповнення, або до незаповнення калібру. Якщо поперечному плину металу в осередку деформації перешкоджають тільки сили тертя на контактній поверхні, розширення називається *вільним*. Таке розширення має місце при прокатці в циліндричних некаліброваних валках. При прокатці в калібрах поперечному переміщенню металу перешкоджають тією чи іншою мірою бічні стінки калібру; у цьому випадку розширення є *обмеженим*. Існує також поняття про *вимушене* розширення, що спостерігається в тих випадках прокатки, коли обтиснення розподіляється нерівномірно по ширині штаби.

Співвідношення між поперечною та поздовжньою деформаціями залежить від опорів переміщенню металу в цих напрямках. При вільному розширенні опір створюється дією сил тертя. Якщо з якої-небудь причини в

осередку деформації зростають підпираючі поздовжні сили тертя, це призводить до зниження витяжки та збільшення розширення. І навпаки, якщо зростають поперечні сили тертя, розширення зменшується, а витяжка збільшується.

Проаналізуємо вплив окремих факторів прокатки на розширення.

Обтиснення. З ростом обтиснення розширення збільшується. Це пояснюється, по-перше, тим, що збільшується об'єм металу, який зміщується як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку. По-друге, зростає довжина осередку деформації, а це значить, що зростає сума поздовжніх підпираючих сил тертя, які утруднюють витяжку; останнє сприяє росту розширення.

Діаметр валків. При збільшенні діаметра розширення зростає за інших рівних умов. Це також пояснюється збільшенням довжини осередку деформації та відповідним зростанням суми поздовжніх підпираючих сил тертя.

Ширина штаби. Чим ширшою є штаба, яка прокатується, тим більшою є сума підпираючих поперечних сил тертя на контактній поверхні. Отже, зі збільшенням ширини штаби розширення зменшується. З практики добре відомо, що при прокатці широких штаб та листів розширення є незначним.

В галузі прокатки дуже вузьких штаб абсолютне розширення падає при зменшенні ширини штаби, але це пов'язано із різким скороченням об'єму металу, що зміщується. Якщо побудувати графік зміни відносного розширення, буде видно, що воно монотонно зменшується, починаючи з найменших значень b_0 .

Коефіцієнт тертя. Зі збільшенням коефіцієнта тертя зростають як поздовжні, так і поперечні підпираючі сили тертя. Однак треба враховувати, що метал тече головним чином у поздовжньому напрямку. Зростання гальмуючої дії сил тертя в поздовжньому напрямку впливає на розподіл деформацій більш суттєво, ніж зростанням поперечних сил тертя. У результаті зі збільшенням коефіцієнта тертя витяжка зменшується, а розширення зростає. Через коефіцієнт тертя на розширення впливають багато факторів: стан поверхні валків, температура металу, швидкість прокатки та ін.

Поздовжнє натяжіння на кінцях штаби. Якщо до кінців штаби прикладені розтягаючі сили, вони полегшують поздовжній плин металу, тобто сприяють витяжці. У першому наближенні можна вважати, що розширення зменшується пропорційно величині прикладеного натяжіння. Заднє натяжіння впливає на розширення набагато сильніше, ніж переднє натяжіння. Це пояснюється тим, що заднє натяжіння впливає на зону відставання, де відбувається основна деформація.

Форма калібрів. У більшості випадків при прокатці в калібрах розширення виходить меншим, ніж при прокатці в циліндричних валках (при тій самій висотній деформації), тому що бічні стінки калібру створюють додатковий опір поперечному плину металу. Ступінь обмеження розширення залежить від кута нахилу бічних стінок калібру та від співвідношення між шириною калібру і шириною штаби, яка задається до калібру.

В літературі по теорії прокатки рекомендується використання кількох десятків формул для визначення розширення. Шляхом обробки експериментальних даних (емпірично) отримано такі відомі формули для розрахунку розширення:

1) С.І. Губкіна:

$$\Delta b = (1 + \Delta h/h_0)(f_y \sqrt{R\Delta h} - \Delta h/2) \Delta h/h_0. \quad (3.2)$$

2) О.П. Чекмарьова:

$$\Delta b = \frac{2\Delta h b_{cp}}{(h_0 + h_1) \left[1 + (1 + \alpha) \left(\frac{b_{cp}}{R\alpha} \right)^n \frac{h_0 + h_1}{2h_1(1 + f_y R\alpha / b_{cp})} \right]}. \quad (3.3)$$

або

$$\Delta b = \frac{2\Delta h b_{cp}}{(h_0 + h_1) \left[1 + (1 + \alpha) (b_{cp}/R\alpha)^n \right]}. \quad (3.4)$$

де n - показник, який залежить від форми осередку деформації в плані.

Приймають $n=1$ при $b_{cp} < Ra$ та $n=2$ при $b_{cp} > Ra$.

Практично в розрахунках приймають $b_{cp} \approx b_0$ або $b_{cp} = b_1$ (останнє у випадку визначення розмірів штаби проти ходу прокатки).

Існує ряд формул для розрахунку розширення, одержаних теоретично:

3) Б.П. Бахтінова:

$$\Delta b = 1,15 \frac{\Delta h}{2h_0} \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f_y} \right). \quad (3.5)$$

4) О.І. Целікова та О.І. Гришкова:

$$\Delta b = 0,5C_b C_\sigma \left(\sqrt{R\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f_y} \right) \ln \frac{h_0}{h_1}. \quad (3.6)$$

Величина коефіцієнта C_b , який враховує ширину штаби, може бути знайдена за допомогою графіків, наведених у літературі. Величина коефіцієнта C_σ приблизно визначається за формулою:

$$C_\sigma = 1 - 2q_0/\sigma_T. \quad (3.7)$$

Усі вищенаведені формули належать до випадку прокатки прямокутної штаби в циліндричних валках. При розрахунку розширення в калібрах найчастіше використовують ті ж самі формули, але додають поправний коефіцієнт, який враховує особливості деформації в калібрах різної форми. За даними В.І. Зюзіна, поправочний коефіцієнт становить: для систем ромб-квадрат, ромб-ромб, овал-коло, овал-овал $k_\phi = 0,8 \div 0,85$; для системи квадрат-овал $k_\phi = 0,7 \div 0,74$; для системи ребровий овал-плоский овал $k_\phi = 1,2$.

Обчислення та інші геометричні параметри рекомендується розраховувати за методом приведеної штаби.

Детально природа всіх видів розширення (вільного, обмеженого і вимушеного) розглянута в роботах [3, 4, 6, 7].

Для засвоєння аналітичних методів визначення розширення нижче приведені рішення декількох прикладів, в яких використані формули з таблиці 3.1, 3.2 і 3.3.

Таблиця 3.1 – Формули для визначення розширення

Назва формули	Формули	Значення і примітка
Формула Жеза	$\Delta b = m\Delta h$	m - коефіцієнт, яки враховує вплив хімічного складу сталі на розширення (див. табл. 3.2)
Формула Зібеля	$\Delta b = (0,35 \dots 0,45)\Delta h / h_0 \cdot \sqrt{R\Delta h}$	
Формула Б.П. Бахтінова	$\Delta b = 1,15\Delta h / 2h_0 \cdot (\sqrt{R\Delta h} - \Delta h / 2f)$	
Формула С. Екуленда.	$\Delta b = b - b_0, \text{ де}$ $b = -A + \sqrt{A^2 + b_0^2 + 4ml_x(3h_0 - h_1)};$ $l_x = \sqrt{R\Delta h};$ $m = \frac{1,2ft_x - 1,2\Delta h}{h_0 + h_1};$ $A = 2m(h_0 + h_1)l_x/b_0$	b ₀ и b - ширина зон штаби після прокатки
Формула І.Я. Тарновського	$\Delta b = (\beta - 1)b_0, \text{ де}$ $\lg \beta = \eta \frac{\lg 1 \cdot k}{1 + A/k_1};$ $A = (b_0/l_x)^{4f}$	$\eta = h/h_0$; f ₁ коефіцієнт тертя; k ₁ коефіцієнт, яки враховує вплив зовнішніх недеформованих зон; k ₁ - $\psi(A)$ (див. табл. 3.3); k ₁ - коефіцієнт, який враховує вплив

		інструменту (див. рис.13)
--	--	---------------------------

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнту m , що враховує хімічний склад сталі на розширення

Сталь	m	Сталь	m	Сталь	m
Ст.1	1,0	38ХМЮА	1,35	X18H25C2	1,44
У7А	1,24	X10C2M	1,35	X23H13	1,52
ШХ15	1,29	X14H14B2M	1,36	1X17Ю5	1,55
20МА	1,29	X13H4Г9	1,42	X15H60	1,62
4Х13	1,33	1X18H9Т	1,44		

Таблиця 3.3 – Вплив жорстких кінців на розширення, виражені коефіцієнтом k_1 в функції від $A = (b)^{4fy}/l$ (з даних І.Я. Тарновського)

A	0,670	0,800	0,900	1,000	1,100	1,200	1,300	1,400
k_1	1,000	0,949	0,906	0,864	0,820	0,779	0,748	0,698
A	1,500	1,600	1,700	1,800	1,900	2,000	2,100	2,200
k_1	0,658	0,622	0,587	0,552	0,517	0,484	0,454	0,430
A	2,400	2,600	2,800	3,000	3,500	4,000	4,500	5,000
k_1	0,385	0,345	0,311	0,280	0,230	0,216	0,244	0,370

Примітка : При $A < 0,670$ коефіцієнт $k_1 = 1$

3.4 Практичні задачі до розділу 3

Задача №22. Визначити розширення металу за наступних умов прокатки: матеріал штаби - Ст.5, температура прокатки 1000 °С, розміри штаби до

прокатки $h_0 \times b_0 \times l_0 = 120 \times 150 \times 4000$ мм і $h_1 \times b_1 \times l_1 = 90 \times 60 \times 5000$ мм - після прокатки. Відомі $D_k = 600$ мм і $n_b = 80$ об/хв.

Задача №23. Визначити розширення при прокатці сталі 08кп на сталевих валках діаметром $D = 800$ мм

Поверхня валків зношена. Твердість поверхні 45 од. по Шору. Окружна швидкість валів $v = 3$ м/с. Температура металу $t_1 = 1100$ °С. Товщина штаби до обтиснення $h_0 = 60$ мм, обтиснення $\Delta h = 20$ мм. Ширина штаби $b_0 = 150$ мм. Коефіцієнт контактної тертя між металом і валком прийняти при розрахунках рівним $f = 0,356$.

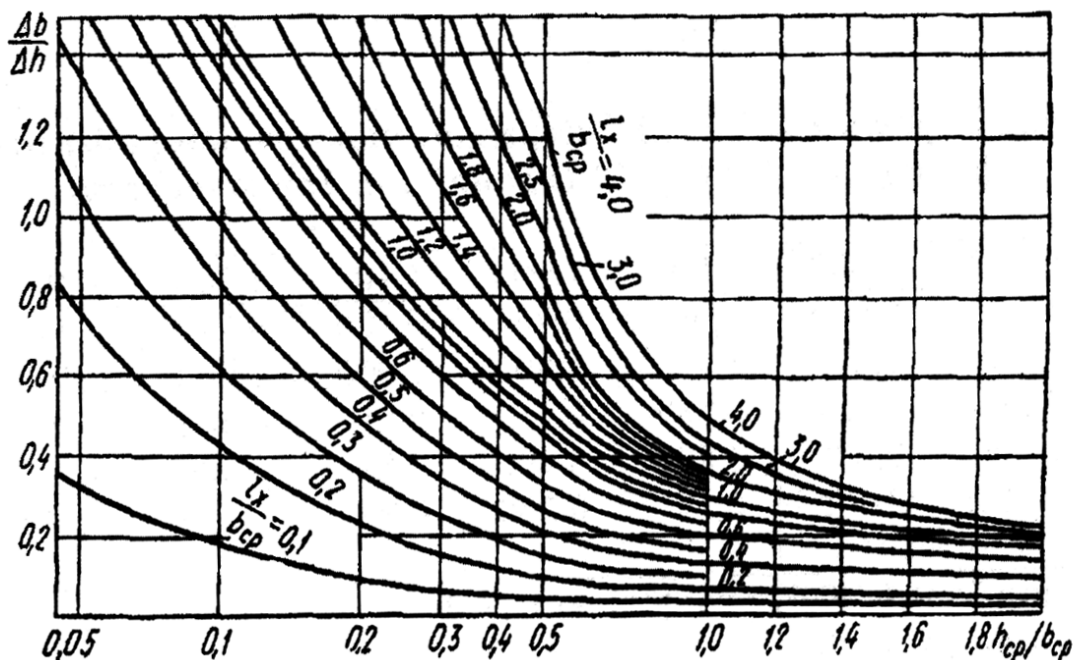


Рисунок 3.6 - Залежність показника розширення $\Delta b/\Delta h$ від l_x/b_{cp} (до задачі 22)

При проектуванні калібрувань валків, на підставі дослідних даних Н.В. Литовченко та ін. рекомендують проводити розрахунок розширення за формулами Б.П. Бахтинова і Зібеля, а Ю.М. Чижиков - по формулі С. Екелунда.

Формула Зібеля дає задовільні результати при середньому значенні показника розширення $k_{cp} = 0,35$.

За допомогою варіаційного методу І.Я. Тарновський вивів формули для визначення розширення не тільки при обтисненні на гладкій бочці, але і на валках, що калібруються. В результаті вийшли досить складні рівняння мало придатні для повсякденних практичних розрахунків.

Задача №24. Визначити витяжку, розширення і ширину штаби після прокатування за один прохід.

Дано: сторона початкової штаби квадратного перетину $a = 60$ мм, штабу прокатують в ромбічному калібрі з відношенням діагоналей $b/h = 1,44$; $D_k = 400$ мм і $f = 0,30$. Рішення по методу І.Я. Тарновського. Діагональ заготівлі $h_0 = b_0 = 60\sqrt{2} = 84,8$ мм. Якщо попередня ступень заповнення $0,95$, то із нерівності

$$\frac{h_0}{h} < \frac{b \cdot h_0 \cdot \delta}{h \cdot b_0}$$

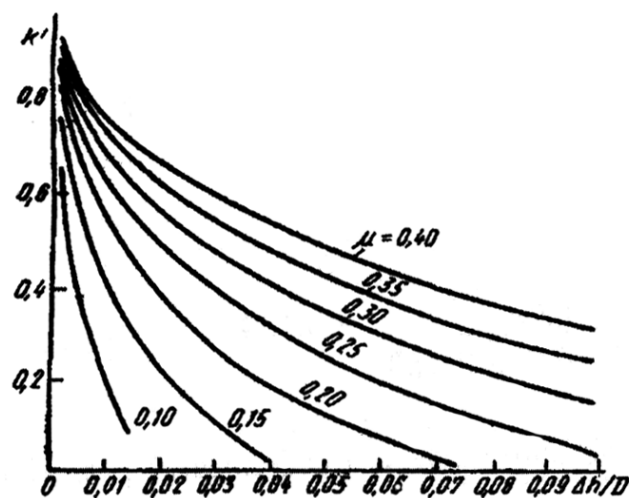


Рисунок 3.7 - Номограма для визначення коефіцієнта форми інструменту k в першій зоні осередку деформації (до задачі 23)

Таблиця 3.4 – Значення $1/\eta$ для ромбічних калібрів

δ	Значення $1/\eta$ привізних значеннях h_0/h									
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
1,00	1,100	1,200	1,300	1,400	1,500	1,600	1,700	1,800	1,900	2,000
0,95	1,088	1,173	1,265	1,348	1,440	1,532	1,620	1,702	1,800	1,890

0,90	1,078	1,160	1,250	1,332	1,410	1,500	1,580	1,667	1,750	1,830
0,85	1,072	1,154	1,238	1,312	1,390	1,472	1,550	1,630	1,710	1,787
0,80	1,068	1,148	1,228	1,298	1,375	1,450	1,525	1,600	1,675	1,750
0,75	1,066	1,144	1,220	1,287	1,363	1,430	1,500	1,572	1,642	1,718
0,70	1,064	1,140	1,212	1,277	1,354	1,415	1,475	1,552	1,618	1,687

$$\frac{\operatorname{tg}\beta'}{\operatorname{tg}1/\eta'} = \frac{k'_1}{1 + A'/k'} \quad (4.6)$$

Обчислення в кожній зоні осередку деформації.

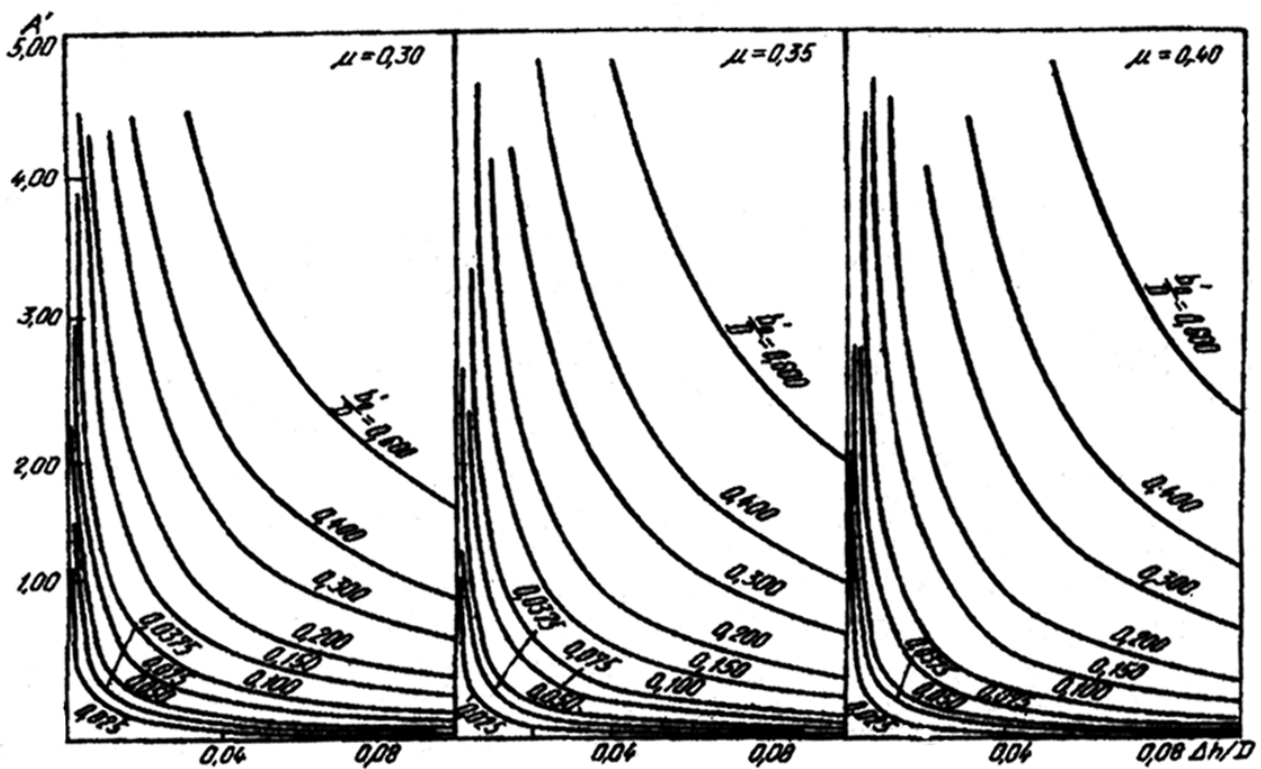


Рисунок 3.8 – Діаграма для визначення критерій A' в функції від $\Delta h/D$, $b'o/D$ і μ (до задачі № 24)

В другій зоні унаслідок її крихти поперечною деформацією можна знехтувати.

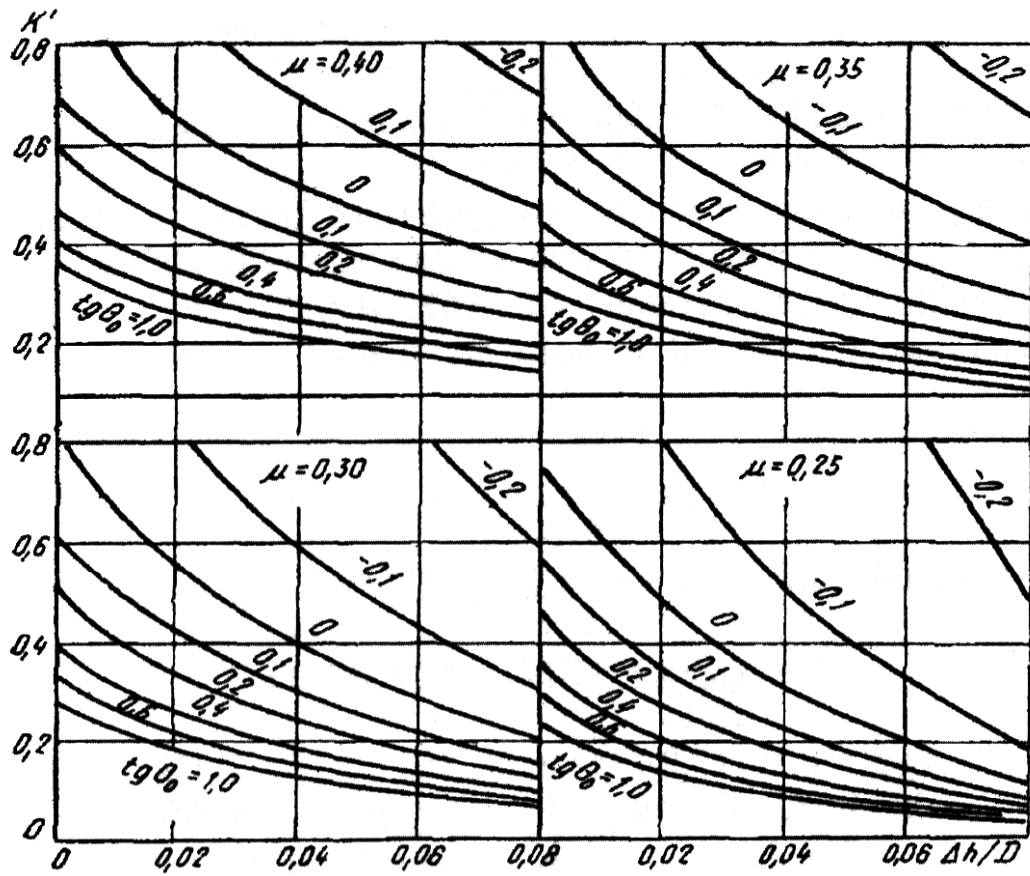


Рисунок 3.9 – Діаграми для визначення коефіцієнту форми інструмента k першій зоні при прокатці в калібрах (до задачі № 24)

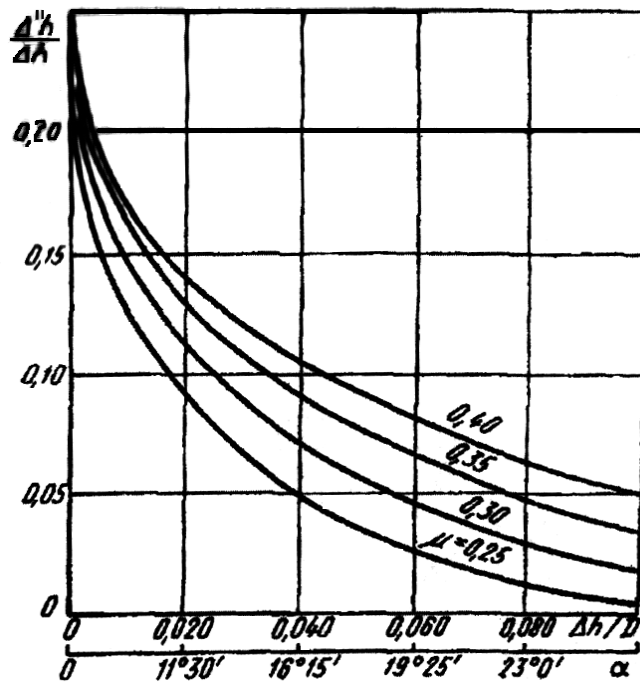


Рисунок 3.10 - Діаграма для визначення абсолютного обтиснення в другій зоні осередку деформації (до задачі № 24)

Задача №25. Визначити витяжку λ , заповнення калібру δ , розширення Δb і ширину штаби b при прокатці ромбічної штаби з відношенням діагоналей $h_0/b_0 = 1,3$ і стороною $a_0 = 60$ мм в ромбічному калібрі з відношенням діагоналей $b/h = 1,3$. Діаметр валків $D = 400$ мм і коефіцієнт тертя $f = 0,3$.

Метод розрахунку розширення при прокатці в калібрах, запропонований І.Я. Тарновським. Застосування номограм і таблиць і особливо ЕОМ значно спрощують розрахунки розширення по методу І. Я. Тарновського.

3.4 Контрольні питання до розділу 3

- 1) Якими показниками характеризується абсолютне і відносне розширення?
- 2) Яким параметром деформації головним чином визначається розширення?
- 3) Чому розширення зростає зі збільшенням обтиску? Пояснити співзалежність розширення і витяжки виходячи із закону найменшого опору.
- 4) Що таке розширення? Які із параметрів збільшують, а які зменшують розширення металу і саме завдяки чому?

Література до розділу 1: [1, 2, 4, 5, 12]

4 ЕНЕРГОСИЛОВІ ПАРАМЕТРИ ПРОКАТКИ

4.1 Тиск на контактї металу з валками

Розподіл тиску залежить від умов прокатки і, в першу чергу, від таких факторів, як фактор форми l_d/h_{cp} , коефіцієнт тертя f_y і кут контакту α .

При малих значеннях параметра l_d/h_{cp} (приблизно $l_d/h_{cp} < 0,7$) тиск має максимальну величину поблизу площини входу (рис. 4.1, а). Це пояснюється дією заднього жорсткого кінця штаби. При відсутності задньої зовнішньої зони пік тиску на вході зникає (пунктирна лінія на рис. 4.1, а).

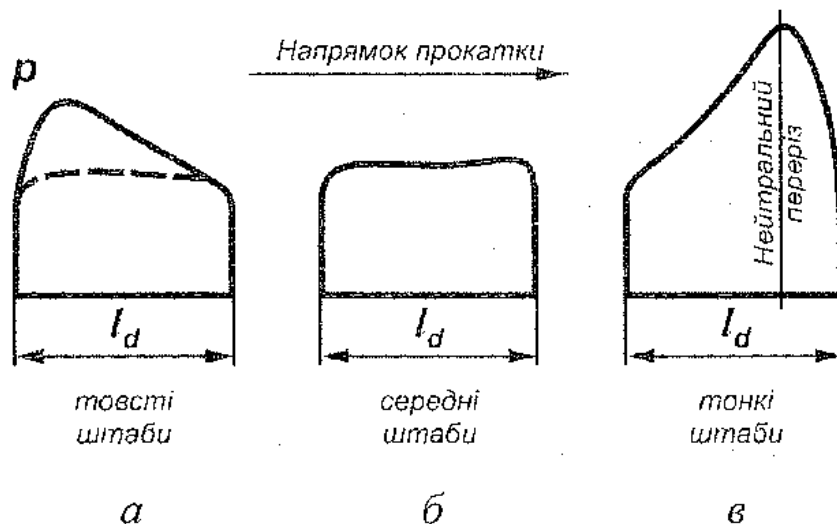


Рисунок 4.1 – Типові епюри розподілу тиску по дузі контакту при прокатці товстих (а), середніх (б) і тонких (в) штаб

В інтервалі $l_d/h_{cp} = 0,7 \div 1,5$ тиски розподіляються по дузі контакту приблизно рівномірно (рис. 4.1, б). У цьому випадку вплив зовнішніх зон на осередок деформації стає незначним, а сили тертя на контактї ще не мають

помітної підпиральної дії, тому що товщина ні між залишається відносно великою.

При більш високих значеннях параметра l_d/h_{cp} , особливо при $l_d/h_{cp} > 3 \div 4$ (тонкі штаби), на епюрах тиску з'являється чітко виражений пік, розташований у нейтральному перерізі (рис. 4.1, в). Такий характер розіпни ну тиску вздовж дуги контакту обумовлений дією сил тертя. В міру переміщення від границь осередку деформації до нейтрального перерізу зростає сума поздовжніх підпиральних сил тертя - відповідно зростає контактний тиск. Зі збільшенням коефіцієнта тертя, за інших рівних умов, пік на епюрах тиску зростає.

Типові епюри розподілу тисків по ширині штаби показані на рисунку 4.2.

У випадку прокатки відносно вузьких штаб ($b_0 < 5l_d$) максимальний тиск діє посередині штаби (рис. 4.2, а). Біля бічних крайок тиск падає, що є наслідком виникнення поздовжніх розтягаючих напружень на крайках. При прокатці широких штаб ($b_0 > 5l_d$) спостерігаються два максимуми тиску, що знаходяться на певній відстані від крайок (рис. 4.2, б).

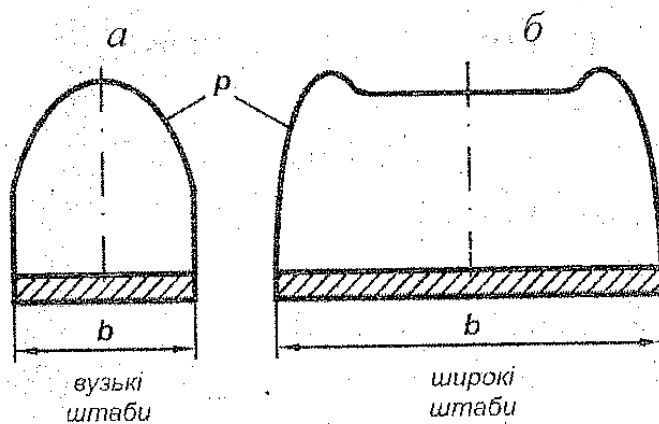


Рисунок 4.2 – Епюри розподілу тиску в поперечних перерізах осередку деформації при прокатці вузьких (а) та широких (б) штаб

Одним з найважливіших енергосилових показників процесу прокатки є середній тиск на контакті металу з валком - той тиск, який мав би місце за умови рівномірного розподілу його по контактній поверхні:

$$p_{cp} = P/F_K \quad (4.1)$$

де P - сила прокатки;

F_K - площа контактної поверхні.

Під *силою прокатки* розуміють рівнодіючу всіх елементарних сил нормального тиску і тертя, прикладених до металу з боку валків. Така ж, але протилежно спрямована сила діє з боку металу на валки. При усталеному процесі прокатки рівнодіюча P , незалежно від її величини, спрямована перпендикулярно до осі штаби. У протилежному випадку сила P давала б поздовжню складову, котра викликала б або гальмування, або прискорення штаби.

При теоретичному визначенні сили прокатки формула (4.1) має вигляд:

$$P = p_{cp} \cdot F_K. \quad (4.2)$$

Величина середнього контактного тиску залежить від міцності металу (його межі текучості) та від його напруженого стану:

$$p_{cp} = \sigma_T^* \cdot n_\sigma, \quad (4.3)$$

де n_σ - коефіцієнт напруженого стану.

Коефіцієнт n_σ називають також *коефіцієнтом підпору*.

$$n_\sigma = n'_\sigma n''_\sigma n'''_\sigma, \quad (4.4)$$

де $n'_\sigma, n''_\sigma, n'''_\sigma$ - коефіцієнти, що враховують вплив, відповідно, зовнішнього тертя, зовнішніх зон і натягіння кінців штаби.

Обтиснення. Зі збільшенням обтиснення зростає довжина осередку деформації, а отже, і сума поздовжніх підпираючих сил тертя. Переміщення

металу по контактній поверхні утруднюється. Внаслідок цього середній контактний тиск зростає. При збільшенні обтиснення не тільки підсилюється дія підпираючих сил тертя, тобто зростає коефіцієнт n'_o , але також підвищується межа текучості металу в зв'язку з деформаційним зміцненням.

Діаметр валків. Зі збільшенням діаметра валків, за інших рівних умов, зростає довжина осередку деформації і, отже, підсилюється дія підпираючих сил тертя. Це є причиною зростання середнього контактного тиску.

Тому у тих випадках прокатки, коли тиск па валки обмежує величину можливого обтиснення, доцільно застосовувати валки малого діаметра.

Товщина штаби. У випадку прокатки тонких штаб, чим меншою є товщина штаби, тим більше проявляється гальмуюча дія сил тертя в осередку деформації; тому зі зменшенням товщини штаби середній контактний тиск зростає. Розглянута залежність для товстих штаб має протилежний характер: тиск зростає зі збільшенням товщини штаби.

Характерний вид залежності $p_{cp} = \varphi(l_d/h_{cp})$ показаний на рисунку 4.3. При малих значеннях l_d/h_{cp} зміна тиску пов'язана із впливом зовнішніх зон, при великих l_d/h_{cp} – з дією сил тертя. Мінімум тиску найчастіше знаходиться в інтервалі $l_d/h_{cp} = 0,3 \div 0,7$.

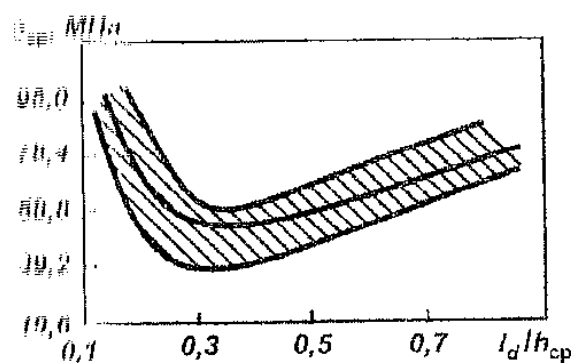


Рисунок 4.3 – Залежність середнього контактного тиску від фактору форми при прокатці слябів (за О.П. Чекмарьовим)

Ширина штаби. При прокатці відносно вузьких штаб (приблизно $b_0/l_d < 5$) середній контактний тиск знижується при зменшенні ширини штаби (рис. 4.4).

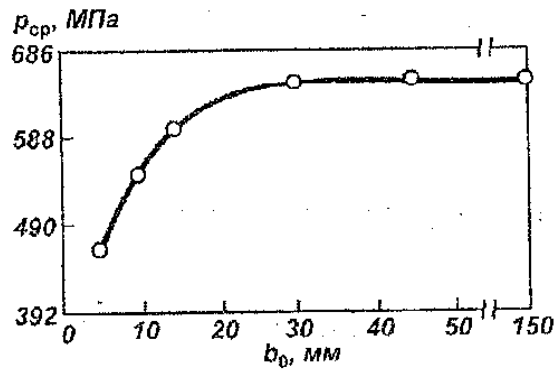


Рисунок 4.4 – Залежність середнього контактного тиску від ширини штаби при холодній прокатці зразків з низьковуглецевої сталі товщиною 2 мм, із обтиском 20% (за Люетом та Помпом)

Коефіцієнт тертя. Зі збільшенням коефіцієнта тертя тиск на міміки підвищується, тому що ростуть підпираючі сили тертя на контактній поверхні. Чим меншою є товщина штаби, тим більше проявляється вплив сил тертя на тиск.

Натяжіння кінців штаби. Сили натяжіння полегшують поздовжній плин металу і сприяють зниженню середнього контактного тиску (коефіцієнт n''_a менше одиниці). Натяжіння заднього кінця штаби впливає на тиск більше, ніж натяжіння переднього кінця (рис. 4.5). Це пояснюється тим, що заднє натяжіння впливає на зону відставання, яка становить основну частину осередку деформації. Підпір кінців штаби відповідно викликає підвищення середнього контактного тиску.

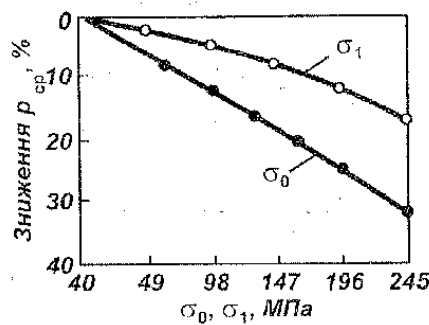


Рисунок 4.5 – Вплив заднього (σ_0) та переднього (σ_1) натяжіння на середній контактний тиск при холодній прокатці сталевих штаб з обтиском 30% (за Люєтом та Шульце)

4.2 Сила прокатки

За величиною сили прокатування та крутного моменту визначають найважливіші параметри процесу прокатування, що дозволяє експлуатувати механічне та електричне обладнання станів повністю використовуючи їх енергетичні можливості та міцність, і водночас не допускати їх перевантаження. Крім того, силу прокатування використовують як вихідний параметр в системах автоматичного регулювання та управління станами. Як буде показано пізніше сила прокатування – базовий параметр побудови математичних моделей станів та процесів прокатки. Це пов'язано з тим, що вимірювач сили прокатування найскоріше від вимірювачів інших параметрів реагує на коливання геометричних розмірів штаби, до того ж безпосередньо в осередку деформації.

Силу прокатування вимірюють месдозами або тензометрами. Безпосередньо силу прокатування можна виміряти гідравлічними месдозами, але вони мають велике запізнення (інерційність) під час виміру. Окрім того, точність виміру визначається точністю манометрів, яка в більшості випадків недостатня для систем автоматичного регулювання. На промислових станах з метою автоматичного регулювання силу прокатування вимірюють прямим методом безперервно. За прямого методу датчик, перетворюючий силу в електричний сигнал, виконаний так, щоб уся вимірювана сила була замкнута тільки на датчик тобто, щоб датчик деформувався половиною сили прокатування тобто силою, діючою на натискний гвинт. Цією силою датчик пружно деформується. Перетворення деформації в електричний сигнал можливо здійснити двома шляхами. По-перше, це методи, що ґрунтуються на вимірюванні деформації на запрограмованій довжині навантаженого

елемента. З цією метою на поверхні пружних елементів закріплюють перетворювачі деформації в електричний сигнал, наприклад, тензотристорні перетворювачі.

По-друге, це методи, що ґрунтуються на змінюванні тих чи інших властивостей навантаженого елемента: наприклад, до них відносяться магнітопружні та магнітоанізотропні перетворювачі, а також тензорезистори у випадку безпосередньої дії на них сили. Усі різновиди таких перетворювачів найчастіше розташовують поміж подушками верхнього валка і натискним гвинтами.

Відповідно до закону Гука пружна деформація елемента пропорційна діючій на нього силі. Очевидно, що за величиною деформації можливо визначити силу. Використовуючи цю залежність непрямым методом визначають силу прокатки за допомогою тензометрів, які розміщують на нейтральній лінії стійки станини кліті. Під час прокатування стійка по нейтральній смугі тільки розтягується, збільшуючи базову відстань l на величину пружної деформації Δl . Відповідно до закону Гука сила розтягування стійки буде визначатись рівнянням (4.5):

$$P_c = \frac{P_y}{2} = \frac{\Delta l/l}{EF} \quad (4.5)$$

де P_y - сила, діюча на натискний гвинт;

F - площа перерізу стійки;

E - модуль пружності матеріалу станини (для чавуну $E = (1,2 - 1,6) \cdot 10^5$) МПа; для литої вуглецевої сталі $E = 2,0 \cdot 10^5$ МПа; для кованої або штампованої легованої сталі $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа.

Знаючи, що $P_y = P/2$, сила прокатки P буде дорівнювати (4.6):

$$P = 4EF\Delta l/l \quad (4.6)$$

Теоретично сила прокатки за відомого середнього контактного тиску в осередку деформації обчислюється за формулою (4.7):

$$P = p_{cp} F_k, \quad (4.7)$$

де F_k - площа контакту металу з валками.

Для умов тонколистової прокатки p_{cp} визначається за формулою В.О. Ніколаєва (4.8):

$$p_{cp} = 1,15\sigma_{T_{cp}} \left(1 + 0,48f_{II} \frac{1}{h_{cp}} \right), \quad (4.8)$$

де $\sigma_{T_{cp}}$ – середня границя плинності металу в осередку деформації

f_n – показник тертя, який дорівнює:

$$f_{II} = 1,6f - 0,018,$$

де f – коефіцієнт тертя, який для умов прокатки зразків із алюмінію з мастилом можна приймати рівним 0,08.

За цієї умови $f_n = 0,11$; формула (4.8) буде мати вигляд:

$$p_{cp} = 1,15\sigma_{T_{cp}} \left(1 + 0,05 \frac{1}{h_{cp}} \right). \quad (4.9)$$

Із формул (4.7), (4.8), (4.9) очевидно, що контактний тиск і сила прокатки залежать від границі плинності σ_m , умов тертя і параметру l/h_{cp} , при збільшенні яких, сила прокатки зростає. Взагалі, усі фактори прокатки, які збільшують опір поздовжнього і поперечного плину металу в осередку деформації, призводять до зростання сили прокатки.

Середню границю плинності $\sigma_{T_{cp}}$ визначають за формулою (4.10):

$$\sigma_{T_{cp}} = (\sigma_{T_0} + \sigma_{T_1})/2, \quad (4.10)$$

де σ_{T_0} – границя плинності металу до проходу;

σ_{T_1} – те ж саме після проходу.

Для алюмінію марки А1 $\sigma_{T_1} = 58 \text{ Н/мм}^2$. За формулою О.В. Третьякова після прокатки:

$$\sigma_{T_1} = \sigma_{T_0} + 0,64\varepsilon_{\Sigma}^{0,62},$$

де ε_{Σ} - підсумковий відносний обтиск.

4.3 Крутний момент, робота та потужність прокатки

Крутний момент може бути визначений через відому силу прокатки або через напруження тертя. Розглянемо останній випадок. Напруження тертя має плече, що дорівнює радіусу валка R , а контактний тиск спрямований в кожній точці дуги контакту до центру валка, тому його плече та момент дорівнюють нулю.

Для елементарної площадки на бочці валка $bRd\varphi$ крутний момент становитиме:

$$dM_{pp} = \tau bR^2 d\varphi. \quad (4.11)$$

Повний крутний момент для одного валка з урахуванням різного напрямку сил тертя в зонах відставання і випередження:

$$M_{pp} = R^2 \int_{\gamma}^{\alpha} \tau b d\varphi - R^2 \int_0^{\gamma} \tau b d\varphi. \quad (4.12)$$

Якщо припустити, що напруження тертя τ і ширина штаби b в осередку деформації залишаються сталими, то після інтегрування одержимо:

$$M_{\text{пр}} = \tau b R^2 (\alpha - 2\gamma). \quad (4.13)$$

З використанням закону тертя Амонтона ($\tau = f_y p_{cp}$) одержуємо формулу крутного моменту, вперше запропоновану В.Ф. Баюковим:

$$M_{\text{пр}} = p_{cp} b R^2 f_y (\alpha - 2\gamma). \quad (4.14)$$

Формула (4.14) має обмежене застосування внаслідок припущення про рівномірний розподіл тиску і сили тертя по дузі контакту. Визначимо крутний момент за силою прокатки:

$$M_{\text{пр}} = P \alpha. \quad (4.15)$$

де α - плече рівнодіючої P щодо центра валка (рис. 2.42).

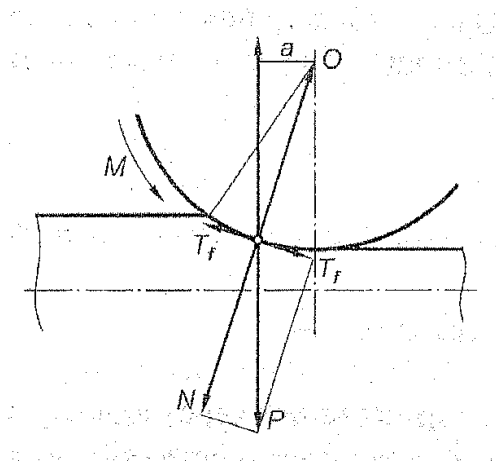


Рисунок 4.6 – До виведення формули крутного моменту за силою прокатки

Плече α прийнято визначати як певну частину довжини осередку деформації: $\alpha = \psi l_d$. Величину ψ називають коефіцієнтом плеча моменту або коефіцієнтом плеча сили прокатки.

Таким чином, для одного валка маємо:

$$M_{\text{пр}} = P\psi l_d = P\psi\sqrt{R\Delta h} = P\psi b l_d^2 = p_{\text{ср}}\psi b R\Delta h. \quad (4.16)$$

Лінія дії сили P проходить через центр ваги епюри контактного тиску.

У більшості випадків коефіцієнт плеча моменту визначають за експериментальними даними, наприклад, у залежності від фактора форми $l_d/h_{\text{ср}}$ (рис. 4.7).

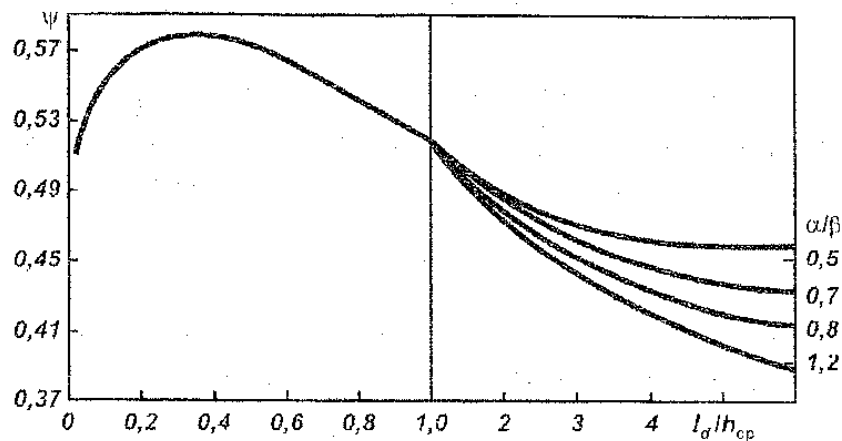


Рисунок 4.7 – Коефіцієнт плеча моменту за експериментальними даними П.Л. Клименка

Коефіцієнт плеча моменту також може бути визначений за допомогою емпіричної формули:

$$\psi = 0,79 - 0,89 \frac{l_d}{h_{\text{ср}}} + 0,44 \left(\frac{l_d}{h_{\text{ср}}} \right)^2. \quad (4.17)$$

При прокатці в калібрах використовують формулу:

$$\psi = 0,42 - 0,001 \left(10 - \frac{l_d}{h_{cp}} \right)^2 + k_{f\alpha}, \quad (4.18)$$

де $k_{f\alpha}=0$ при $f/\alpha=1 \div 1,6$; $k_{f\alpha} = -0,05$ при $f/\alpha=0,05$; $k_{f\alpha}=0,07$ при $f/\alpha=5,0$.

При прокатці з натяжінням формула крутного моменту набуває вигляду:

$$M_{\text{пр}} = P\psi l_d + \frac{Q_0 - Q_1}{2} R, \quad (4.19)$$

де Q_0 і Q_1 – сила заднього і переднього натяжіння.

В окремому випадку, коли $Q_0 = Q_1$ маємо $P_x = 0$, тобто рівнодіюча P спрямована вертикально, і формула (4.14) збігається з формулою крутного моменту (4.16) для вільної прокатки. Однак під впливом сил Q_0 і Q_1 змінюється величина рівнодіючої P , а отже, змінюється крутний момент.

Якщо відома величина крутного моменту на кожному з валків, то визначення роботи і потужності прокатки не викликає утруднень. *Робота деформування при прокатці* $A_{\text{пр}}$ становить:

$$A_{\text{пр}} = 2M_{\text{пр}}\varphi = 2M_{\text{пр}}l_1 / [(1 + S)R], \quad (4.20)$$

де φ - кут повороту валків за період прокатки штаби довжиною l_1 .
Величиною випередження можна зневажити:

$$A_{\text{пр}} = 2M_{\text{пр}}\varphi = 2M_{\text{пр}}l_1 / R, \quad (4.21)$$

Підставляючи у формулу (4.21) значення $M_{\text{пр}}$ із виразу (4.16), одержимо:

$$A_{\text{пр}} = 2p_{cp}\psi bR\Delta h, \quad (4.22)$$

Для визначення роботи прокатки може бути використана також формула С. Фінка:

$$A_{\text{пр}} = p_{\text{ср}} V \ln(h_0/h_1), \quad (4.23)$$

де V - об'єм штаби, що прокатується.

Між формулами (4.22) і (4.23) немає принципового розходження. Якщо прийняти $\ln(h_0/h_1) \approx \Delta h/h_1$ і $\psi = 0,5$, то ці формули будуть однаковими.

При прокатці профілів складного (не прямокутного) перерізу робота деформації визначається за формулою:

$$A_{\text{пр}} = p_{\text{ср}} V \ln \lambda, \quad (4.24)$$

Потужність прокатки (без урахування тертя у вузлах головної лінії стану) визначається за формулою:

$$N_{\text{пр}} = \frac{A_{\text{пр}}}{t} = \frac{M_{\text{пр}}}{\omega} = \frac{2M_{\text{пр}}l_1}{[(1+S)R]t} \approx \frac{2M_{\text{пр}}}{R} v_{\text{в}}, \quad (4.25)$$

де t - час прокатки штаби довжиною l_1 ; ω - кутова швидкість валків.

Енергія, затрачувана при прокатці металу, залежить від багатьох факторів. Тому О.І. Целіков при розрахунках загальної витрати енергії при прокатці рекомендує користуватися результатами експериментальних досліджень, представлених у вигляді графіків.

Наведемо приклад за визначенням загальної витрати роботи за допомогою графіка (рис. 4.8).

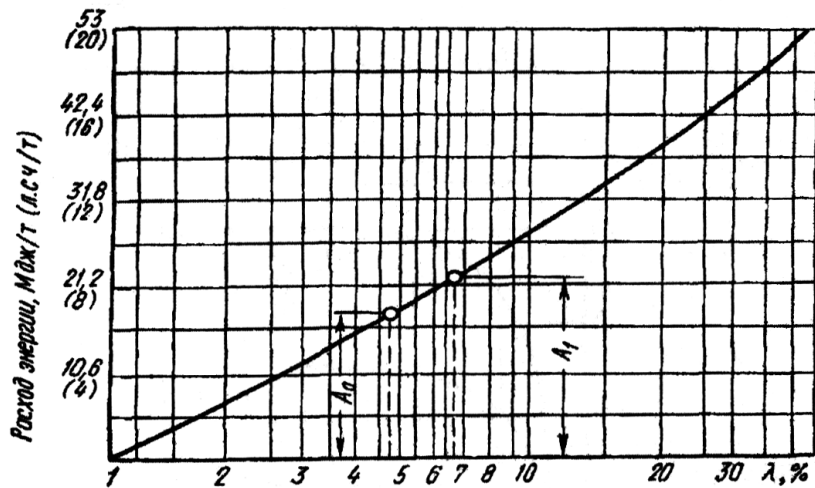


Рисунок 4.8 – Графік витрат енергії на 1 т металу при прокатці блюмів в залежності від загального розтягнення

Визначення енергії по моменту обертання валів

Знаючи момент двигуна $M_{дв}$ і кутову швидкість, можна визначити потужність двигуна по формулі:

$$N = 0,736 M_{дв} \omega \tag{4.26}$$

де $M_{дв} = M_{пр} + M_{тр} + M_{хх} + M_{дин}$;

$\omega = \pi n/30$ - кутова швидкість, рад/сек.

В рівнянні (4.27) момент прокатування $M_{пр}$ залежить від величини рівнодіючої P сили, діючих при прокатці, і розміру плеча a - відстані від лінії дії сили P до осі, що проходить через центри валків. По класифікації О.І. Целікова є дев'ять основних випадків прокатки, що характеризується напрямом дії сили P і розміром плеча a .

Нижче буде розглянутий тільки найпоширеніший випадок так званого простої прокатки. Особливості всієї решти випадків прокатки достатньо детально описані в роботах О.І. Целікова і О.О. Корольова.

В умовах простого процесу прокатки, коли на штабу діють тільки сили міжвалкового тиску, руху штаби на вході і виході із валків рівномірне. Обидва валки приводні і мають однакові діаметри і окружні швидкості. Метал по механічних властивостях однорідний. Рівнодіюча всіх сил, діючих при

прокатці, є напрямком паралельно лінії, що сполучають центри валків. В цьому випадку момент прокатки, який потрібен для деформації металу і подолання сил тертя між металом і валками, визначають по простій формулі:

$$M_{np} = 2Pa \quad (4.27)$$

У разі гарячої прокатки кут, що характеризує точку додатку рівнодіючої сили, рівний

$$\beta = 0,5\alpha$$

При холодній прокатці

$$\beta = (0,35/0,45)\alpha$$

Тоді

$$a = \frac{\beta}{\alpha} l_{\text{хорд}} = 0,5\sqrt{R\Delta h},$$

де $l_{\text{хорд}} = \sqrt{R\Delta h}$ - довжина хорди дуги захоплення. Після підстановки величини a у формулу (4.27) отримаємо

$$M_{np} = 2Pa = 2P0,5\sqrt{R\Delta h} = P\sqrt{R\Delta h}. \quad (4.28)$$

Для визначення повного моменту прокатки необхідно визначити момент сили тертя в підшипниках валків, підшипниках проміжних ланок кліті:

$$M_{np} = Pfd\eta \quad (4.29)$$

де f - коефіцієнт тертя в підшипниках валків;

d- діаметр шийки валків;

$\eta = 2$ - коефіцієнт, що враховує втрати на тертя в проміжних ланках кліті.

Суму моментів прокатки і тертя називають статичним моментом:

$$M_{ст} = M_{пр} + M_{тр} = P(\sqrt{R\Delta h} + fd\eta). \quad (4.30)$$

Детально енергосилові параметри прокатки (середній контактний тиск, сила прокатки, момент прокатки та отужність прокатки) розглянута в роботах [8-11].

Для засвоєння аналітичних методів визначення енергосилових параметрів прокатки нижче приведені практичні задачі, в яких використані формули з таблиці 4.1 і 4.2.

Таблиця 4.1 – Формули для визначення середнього питомого тиску металу на валки при гарячій прокатці

Назва формули	Формули в послідовності розрахунків	Позначення і примітки
1	2	3
Формула О.І. Целікова	$p_{cp} = \beta \sigma_{и} n''_{\sigma} (p_{cp}/k)$	$\beta = 1 \dots 1,15$ коефіцієнт, що враховує нерівномірність напруженого стану (коефіцієнт Лоде $\beta = 1$ для дуже вузьких штаб; $\beta = 1,15$ для широких штаб; $\sigma_{и} = \varphi(v, l_0, \varepsilon)$ - істинний опір деформації; v - швидкість деформації; n''_{σ} - коефіцієнт, що враховує вплив зовнішніх кінців, визначають по графіку; $(p_{cp}/k) = \varphi(\delta, \varepsilon)$ - коефіцієнт напруженого стану. $\Delta = 2f = \sqrt{R/\Delta h} \sim 2f/\alpha$; t - температура металу;

		$\varepsilon = \Delta h / H \cdot 100\%$ - ступінь деформації
Формула С.І. Губкіна	$p_{cp} = k_f p_0$ $P = k_v [1 + \beta(0,95t_{пл} - t) + \beta^2(0,95t_{пл} - t)^2/2] \sigma_B$	k_v - швидкісний коефіцієнт, при $v = 0,1 \dots 0,25$ м/с; $k_v = 1,2 \dots 1,6$, при $v = 0,25 \dots 0,75$ м/с; $k_v = 1,6 \dots 2$, при $v = 1$ м/с; $k_v = 2,5$; $\beta = 0,008 \dots 0,0120$ - температурний коефіцієнт (верхню границю приймають для твердих розчинів з великою концентрацією);
1	2	3
	$k_f = k_\sigma (1 + 1,3 \sqrt{R/h_0})$	$k_\sigma = 1 \dots 1,3$ - коефіцієнт нерівномірності розподілу температурних напруг; $\sigma_B = 4 \dots 6$ МН/м ² (0,4...0,6 кГ/мм ²) границя міцності, відповідна температурі $0,95t_{пл}$ і швидкість деформації 0,04...0,05 м/хв; f - коефіцієнт тертя.
Формула С. Екелунда	$p_{cp} = (1 + m) \cdot (2k + \eta u),$ де $m = \frac{1,6f\sqrt{R\Delta h} - 1,2\Delta h}{h_0 + h_1}$; $2k = 9,81 (14 - 0,2t) \cdot (1,4 + C + Mn + 0,3Cr)$; $\eta = 0,098 (14 - 0,01t)c$; $u = \frac{2v\sqrt{\Delta h/R}}{h_0 + h_1}$	m - коефіцієнт, що враховує зовнішній опір; $2k$ - статичний опір деформації; η - коефіцієнт в'язкості металу, МН·с/м ² ; c - коефіцієнт, залежний від швидкості деформації v рівному 6; 10; 15 і 20 м/с коефіцієнт відповідно рівний 1; 0,8; 0,65 і 0,6; u - відносна швидкість деформації.
Формула Ш. Гелеї	$p_{cp} = k_f \left(1 + C_f \frac{l_d}{h} \sqrt[4]{v} \right)$	k_f - опір лінійної деформації; C - див. рис. 4.13; v - окружна швидкість валків, м/с;
Формула А.Ф. Головина і В.А. Тягунова	$p_{cp} = k_f k_t \sigma_B,$ де $k_f = 1 + f(l_x/h_{cp} - l)$; $\frac{l_x}{h_{cp}} = \frac{2\sqrt{R\Delta h}}{h_0 + h_1}$	σ_B - границя міцності сталі в холодному, відпаленому стані (див. рис. 4.12); t - температура нагріву металу, $t \geq (t_{пл} - 575^\circ)$ $k_t = \frac{(t_{ге} - 75^\circ) - t_0}{1500}$ при

		$t < (t_{пл} - 575^\circ) k_t = (t_{пл} - t)^2/1000;$
Формула В.С. Смирнова	$p_{cp} = n_\sigma n_\beta n_3 k,$ де $k = n_v n_H \sigma_T;$ $n_v = 1 + \delta/\varepsilon(1 - \sqrt{1 - \varepsilon})^2;$ $n_3 = 2 - \sqrt{\frac{l_x}{h_{cp}}}$	n_σ - коефіцієнт, що враховує вплив контактного тертя і наявність заднього і переднього натягіння; n_β - коефіцієнт, що враховує вплив середньої головної напруги, тобто вплив ширини штаби; $n_\beta - 1 + \frac{f_{\delta n \delta}}{3}$ при $0 \leq \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \leq \frac{0,465}{f_{\delta n \delta}}$ та $n_\beta = 1,155$ при $\frac{b_{cp}}{h_{cp}} > \frac{0,465}{f_{\delta n \delta}};$ n_3 - коефіцієнт, що враховує вплив зовнішніх зон
1	2	3
	$k = n_v n_H \sigma_T$	n_v - коефіцієнт, що ураховує вплив швидкості деформації (див. рис. 4.16); n_H - коефіцієнт, що враховує вплив наклепу (при гарячій прокатці $n_H = 1$); σ_T - границя текучості при випробуванні на розтягування.
Формула О.П. Чекмарьова	$p_{cp} = \beta \sigma_H [1 + (p_{cp}/k - 1) n_\phi]$ де $n_\phi = \Pi/2b$	n_ϕ - коефіцієнт форми калібру (див. табл. 4.3); Π - периметр калібру; b - ширина калібру по роз'єму;

Таблиця 4.2 – Формули для розрахунку середнього тиску холодної прокатки

Назва формули	Формули і послідовність розрахунків	Позначення і примітки
1	2	3
Формула О.О. Корольова	$p_{cp} = \frac{2k}{\varepsilon \delta} \left[\left(\frac{1}{1 - \varepsilon} \right)^{\delta - 1/2} - \left(1 - \frac{\varepsilon}{2} \right) \right] \left(1 - \frac{\xi_0 + \xi_1}{2} \right),$ де $k = 1,15\sigma_T;$ $\varepsilon = \Delta h/h_0;$ $\xi_0 = \sigma_0/k_0;$ $\xi_1 = \sigma_1/k_1;$ $k_0 = 1,15\sigma_{T0};$ $k_1 = 1,15\sigma_{T1};$	σ_{T0} - границя текучості металу до його обтиснення у валках; σ_{T1} - границя текучості металу після його

		обтиснення у валках ; ζ_0, ζ_1 - коефіцієнт, що ураховує зміну заднього σ_0 і переднього σ_1 натяжіння; при $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$ - натяжіння відсутнє.
Формула О.І. Целікова	$p_{cp} = \frac{\xi_1 k_1}{m} \left[\left(\frac{\xi_0 k_0}{\xi_1 k_1} \right)^{h_0 / (h_0 + h_1)} e^m - \left(\frac{\xi_0 k_0}{\xi_1 k_1} \right) \frac{h_0}{h_0 + h_1} - \frac{h_0}{h_0 + h_1} \right]$ де $\zeta_0 = 1 - \sigma_0/k_0$; $\zeta_1 = 1 - \sigma_1/k_1$; $m = \frac{fl}{h_{cp}}$	Якщо $\zeta_0 = \zeta_1 = 1$, то натяжіння відсутнє.
1	2	3
Формула О.І. Целікова	$p_{cp} = \frac{k h_n}{fl 2} \left\{ \frac{1}{\delta - 1} (\xi_0 \delta - 1) \left[\left(\frac{h_0}{h_n} \right)^\delta - \frac{h_0}{h_n} \right] + \left[\frac{h_0}{h_n} + 1 \frac{1}{\delta + 1} (\xi_1 \delta + 1) \right] \left[\left(\frac{h_n}{h_1} \right)^\delta - \frac{h_1}{h_n} \right] - \left(1 - \frac{h_1}{h_n} \right) \right\}$ де $\frac{h_f}{h_1} \left[1 + \sqrt{\frac{1 + (\xi_0 \delta - 1) \cdot (\xi_0 \delta + 1) (h_0 / h_1)^\delta}{\xi_0 \delta + 1}} \right]^{1/\delta}$	Враховує натяжіння і наклеп. h_1/h_n - відношення товщини штаби в нейтральному перетині до товщини виробу.

Таблиця 4.3 – Значення коефіцієнта форми n_ϕ для різних калібрів

Калібри	n_ϕ
Квадратний	1,41
Ромбічний, з кутом при обертанні, град	
100	1,30
110	1,20
120	1,15
Круглий	1,40
Овальний однорадіусний:	
c b/h = 1,5	1,27

2	1,15
3	1,09
Овальний плоский	1,1 – 1,15
Шестигранний	1,41
Кутовий і зетовий:	
чистові	1,41
чорнові	1,2 – 1,25
Калібри двотаврові балки:	
№ 30	1,7 – 1,9
№ 16	2,1 – 2,2

4.4 Практичні задачі до розділу 4

Задача №30. Дано: сталь марки 08кп. Діаметр сталевих валків $D_k = 800$ мм. Окружна швидкість валків $v_b = 3$ м/с. Температура метала 1100 °С. Товщина штаби до прокатки $h_0 = 60$ мм, обтиск $\Delta h = 20$ мм. Ширина штаби $b_0 = 150$ мм. Коефіцієнт контактної тертя $f_y = 0,356$. Визначити середній контактний тиск.

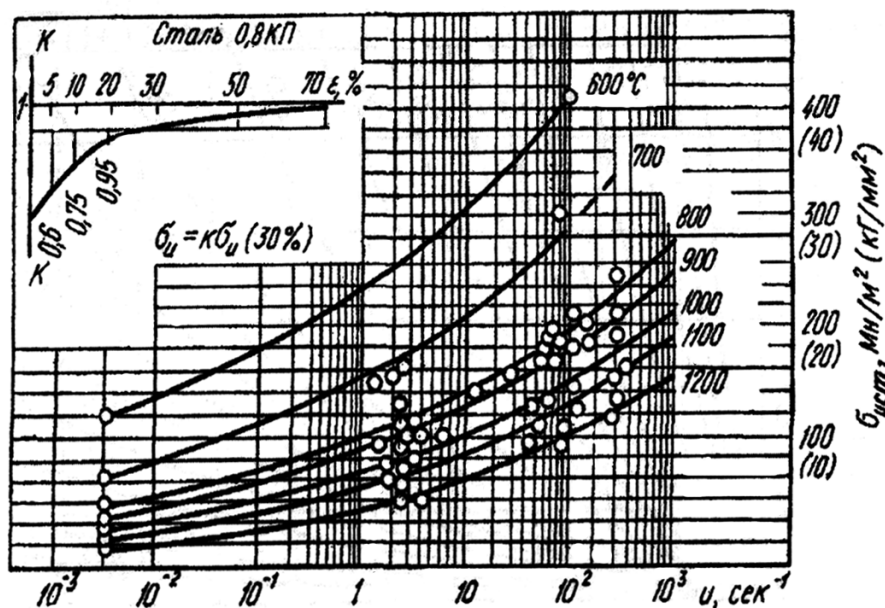


Рисунок 4.9 – Істинний опір деформації сталі 08кп (до задачі № 30)

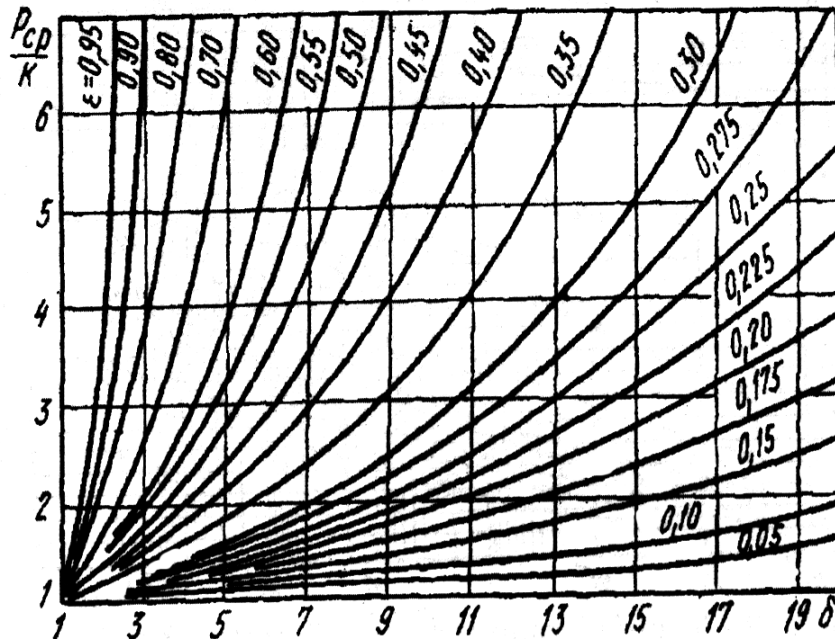


Рисунок 4.10 – Графік для визначення відношення p_{cp}/k по О.І. Целікову (до задачі № 30)

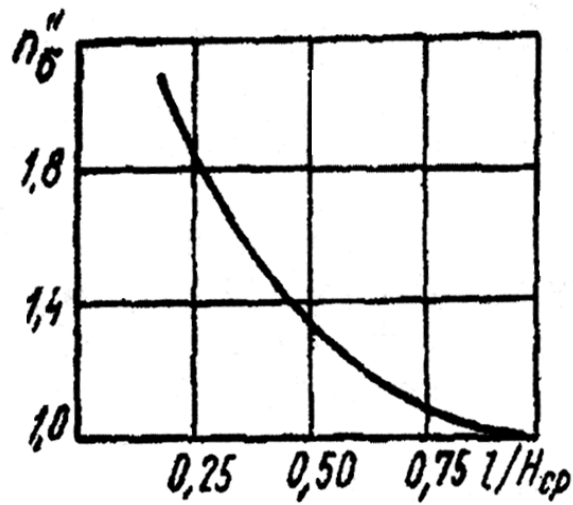


Рисунок 4.11 – Залежність n''_{σ} від параметру $1/H_{cp}$ (до задачі №30)

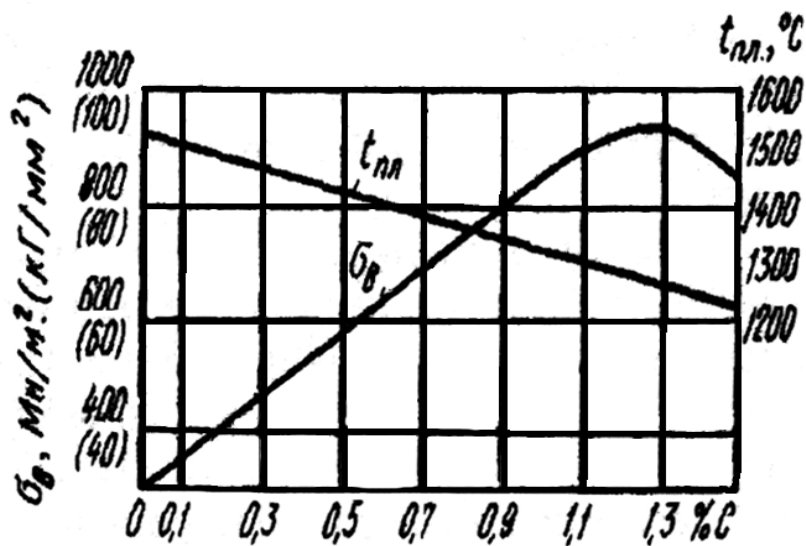


Рисунок 4.12 – Криві для визначення вуглецевих сталей (до задачі №30)

Задача №31. По формулі В.С. Смирнова визначити питомий тиск металу на валок r_{cp} при гарячій прокатці крупної заготовлі, якщо відомо, що $h_0 = 320$ мм, $h_1 = 270$ мм, $b_0 = 320$ мм і $b_1 = 325$ мм. Діаметр валків $D_k = 670$ мм, швидкість прокатки $v_B = 3$ м/с температура прокатування 1100 $^{\circ}\text{C}$, коефіцієнт тертя $f = 0,3$. Вміст вуглецю в сталі $0,3\%$; $\sigma_B \approx \sigma_T = 40$ MN/m^2 (4 kg/mm^2) при 1100 $^{\circ}\text{C}$.

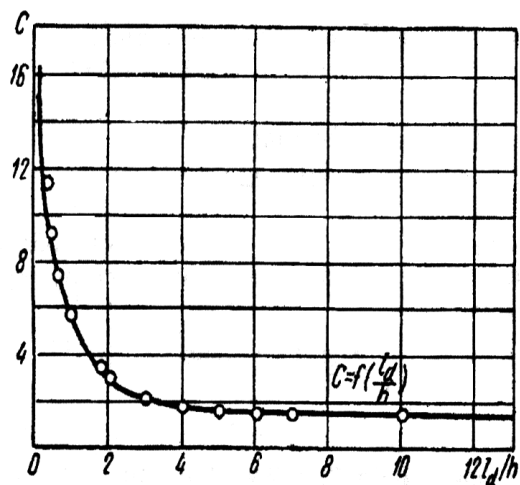


Рисунок 4.13 – Значення коефіцієнта C в залежності від l_d/h

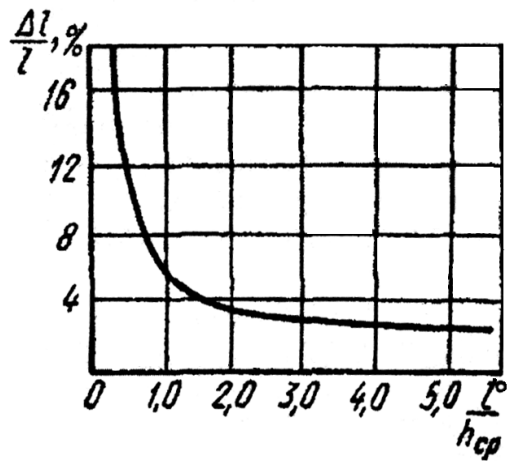


Рисунок 4.14 - Скорочення довжини контактної поверхні внаслідок висотного утягнення в залежності від параметру l/h_{cp}

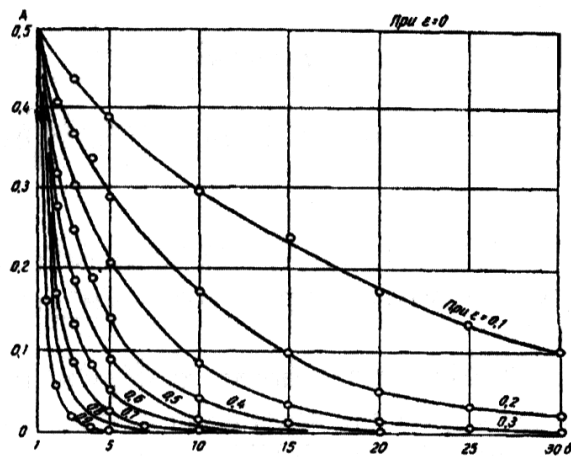


Рисунок 4.15 – Номограма критерію А, що характеризує наявність ділянок ковзання і прилипання (до задачі № 31)

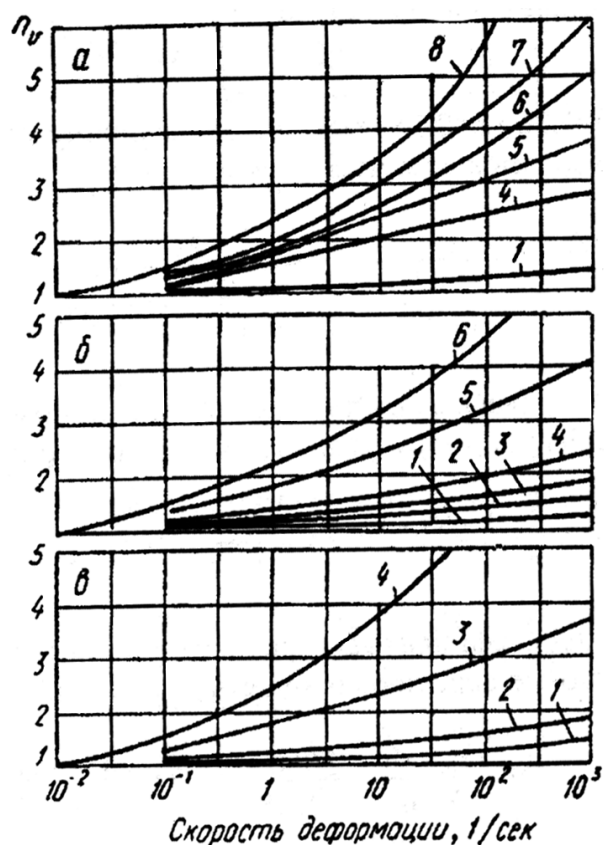


Рисунок 4.16 – Зміни коефіцієнту n_v , що враховує вплив швидкості (до задачі № 31): а - сталь; б - мідь; в - алюміній. Температура прокатки, °С: 1 - 20; 2 - 200; 3 - 400; 4 - 600; 5 - 700; 6 - 800; 7 - 1000; 8 – 1200

Задача № 32. По методу О.П. Чекмарьова визначати r_{cp} , для прокатки круга діаметром 20 мм із сталі 08кп при температурі швидкісних умов деформування задачі №30.

Задача № 33. По методу О.О. Корольова визначаємо середній питомий тиск p_{cp} металу на валки при холодній прокатці жерсті в третій кліті п'ятиклітьового стану.

Дано: $D_k = 400$ мм, $h_0 = 2,2$ мм; $h_1 = 1,35$ мм; $h_2 = 0,8$ мм; $h_3 = 0,5$ мм; $h_4 = 0,12$ мм; $h_5 = 0,24$ мм. Ширина штаби 1000 мм. Матеріал штаби - сталь 20.

Валки і штаба змащуються теплою водною емульсією, яка містить 5%-ве касторове або бавовняне масло. В цих умовах змащування коефіцієнт тертя приймаємо $f_y = 0,065$.

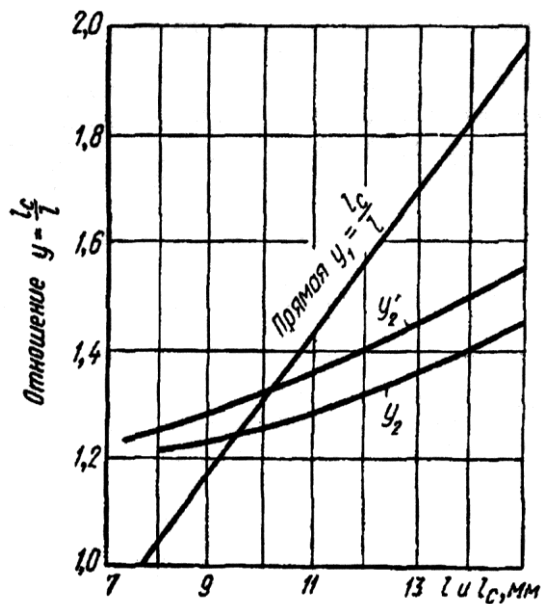


Рисунок 4.17 – Графічне визначення довжини контакту з урахуванням пружного стиснення валків ($r = 7,72$ мм)

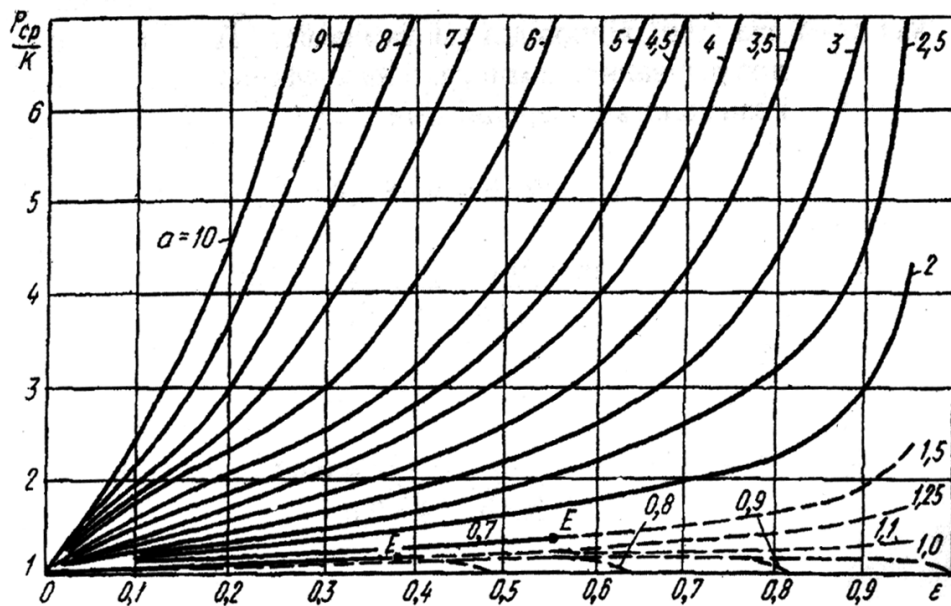


Рисунок 4.18 – Криві для графічного визначення середнього питомого тиску при прокатці без натягнення (крапка E- границя природного захоплення металу валками)

Задача №34. Визначити питомий тиск при холодній прокатці листа із сталі з вмістом в ній 0,1% С, якщо прокатка здійснюється з переднім натягненням $\zeta_1 = 0,4$, за наступних умов: $h_0 = 1,0$ мм, $\Delta h/h_0 = 0,4$; $D_k = 130$ мм і $f = 0,2$.

Таблиця 4.4 – Змінення механічних властивостей металів і сплавів при холодній прокатці

Сталь, сплав		Умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$ та границя міцності σ_B (МН/мм ² – у числівнику, кг/мм ² – в знаменнику при різних ступенях обкатки θ/λ)																	
		0		10		20		30		40		50		60		70		80	
		$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B
Ст. 1	26,3	400	32,5	500	37,5	564	420	600	46,2	630	48,2	660	52,5	670	55,2	685	56,5	700	
	26,3	40	32,5	50	37,5	56,4	42	60	46,2	63	48,2	66	52,5	67	55,2	68,5	56,5	70	
08сп	25,2	350	35,1	425	42,5	500	48,5	550	54,5	600	59	650	-	-	-	-	-	-	
	25,2	35	35,1	42,5	50	56,4	48,5	55	54,5	60	59	65	-	-	-	-	-	-	
У10	44	620	60	720	72	830	82	920	96,5	1000	100	1070	108	1150	115	1200	-	-	
	44	62	60	72	72	83	82	92	96,5	100	107	115	108	115	120	-	-	-	
1Х18Н9	25	603	43	680	62	780	81	920	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	25	60,3	43	68	62	78	81	92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Х23Н18 (ЭИ147)	35	-	85	-	105	-	118	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	35	-	85	105	105	-	118	-	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Трансформаторна	50	625	67,5	780	82	900	920	950	985	1020	1040	1060	1070	1090	-	-	-	-	
	50	62,5	67,5	78	82	92	92	95	98,5	102	104	106	107	109	-	-	-	-	
ЭИ435	45	800	77	880	90	980	100	1030	1100	1130	1180	1220	-	-	-	-	-	-	
	45	80	77	88	90	98	100	103	110	113	118	122	-	-	-	-	-	-	
ЭИ602	55	680	87	950	110	1140	1220	1250	1250	1270	-	-	-	-	-	-	-	-	
	55	68	87	95	110	114	122	125	125	127	-	-	-	-	-	-	-	-	
Х05	50	-	57	-	64	-	71	-	83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	50	-	57	64	64	-	71	-	83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Задача №35. Визначити середній тиск металу на валок за наступних умов: $D_k = 406$ мм; $h_0 = 1,6$ мм; $h_1 = 0,74$ мм; $\Delta h/h \cdot 100 \% = 54 \%$; $f = 0,04$. Переднє натяжіння $\sigma_1 = 77,3$ МН/м² (7,73 кГ/мм²), заднє натяжіння $\sigma_0 = 64,7$ МН/м² (6,47 кГ/мм²).

Опір деформації на виході $k_0 = 1,15\sigma_{T0} = 270$ МН/мм² (27 кГ/мм²), на виході $k_1 = 1,15\sigma_{T1} = 640$ МН/мм² (64 кГ/мм²).

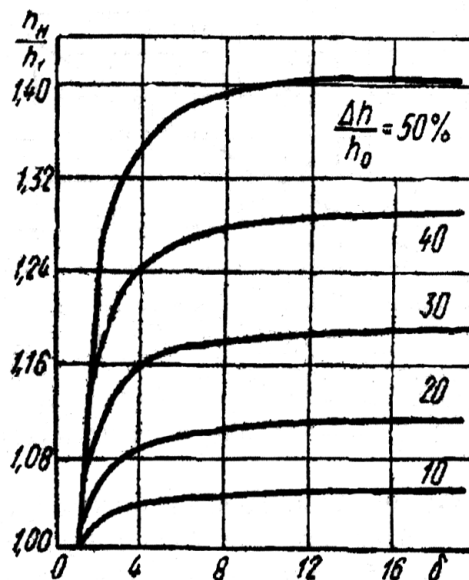


Рисунок 4.19 – Номограма для визначення висоти штаби в нейтральному перетині при наявності тільки зон ковзання

Задача №36. Визначити роботу, потужності і моменти прокатки на блюмінгу 1000 в шостому проході. Дано: $D_k = 900$ мм; $n = 60$ об/хв. Маса зливка $G = 5,5$ т, довжина зливка $L_0 = 1900$ мм; розміри перетину зливка 615×615 мм; площа перетину зливка $F_0 = 378200$ мм², перетин блюма після п'ятого проходу 455×505 мм, $F_5 = 229800$ мм². Перетин блюма після шостого проходу 400×510 мм, $F_6 = 20400$ мм².

Задача №37. Провести допустимість вибраного обтиснення по потужності двигуна для наступного випадку прокатки. Привід блюмінга, здійснений від електродвигуна потужністю 5152 кВт (7000 л.с.), $n = 40 \dots 80$ об/хв. Зливок з вуглецевої киплячої сталі масою 7 т має найбільший перетин 700×700 мм; діаметр валків 1200 мм; довжина бочки валків 2600 мм;

обтиснення в першому проході $\Delta h = 100$ мм; температура 1250 °С; середній питомий тиск $p_{cp} = 50,5$ МН/м² (5,05 кГ/мм²); діаметр шийки валка 600 мм; коефіцієнт тертя в текстолітових підшипниках $f = 0,006$.

Задача №38. Визначити обертовий момент необхідний для холодної прокатки жерсті (тонкої штаби) в третій кліті п'ятиклітьового стану.

Товщина штаби до і після прокатки відповідно $h_0 = 0,8$ мм, $h_1 = 0,5$ мм
Ширина штаби $b = 1$ м. Натягнення штаби $\sigma_0 = 150$ МН/м² (15 кГ/мм²) між другою і третьою клітями, і $\sigma_1 = 120$ МН/м² (12 кГ/мм²) - між третьою і четвертою клітями. Діаметр валів $D = 400$ мм. Повний тиск металу на валки $P = 9,6$ МН (960 Т).

4.5 Контрольні запитання до розділу 4

- 1) Як експериментальним шляхом визначити зусилля прокатки та середній контактний тиск?
- 2) Від яких параметрів залежить контактна площа? Залежність між зусиллям (тиском) прокатки та абсолютним обтиском?
- 3) Вплив товщини смуги після проходу на зусилля та контактний тиск при прокатці?
- 4) Завдяки чому збільшується зусилля та контактний тиск при холодній прокатці металів та сплавів при збільшенні сумарного обтиску?
- 5) Які експериментальні способи визначення крутного моменту вам відомі?
- 6) Наведіть формулу В.Ф. Баюкова для визначення крутного моменту в процесі прокатки.
- 7) Як визначається потужність, що витрачається на деформацію металу при прокатці?
- 8) Дайте визначення коефіцієнту плеча крутного моменту. Які значення він може приймати?

Література до розділу 1: [1, 2, 5, 10-12]

ЗАВДАННЯ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

I	2	3	4	5	6	7
1a	14a	16a	26a	27a	31a	37a
2a	15a	17a	25a	28a	32a	38a
3a	14б	18a	24a	29a	33a	39a
4a	15б	19a	23a	30a	34a	37б
5a	14в	20a	24б	29б	35a	38б
6a	15в	21a	25б	28б	36a	39б
7a	14г	22a	26б	27б	31б	37в
8a	15г	16б	25в	28в	32б	38в
9a	14д	17б	24в	29в	33б	39в
10a	15д	18б	23в	30б	34б	37г
11a	14е	19б	24г	29г	35б	38г
12a	15е	20б	25г	28г	36б	39г
11б	14ж	21б	26в	27в	31в	37д
10б	15ж	22б	25д	28д	32в	38д
9б	14з	21в	24д	29д	33в	39д
8б	15з	20в	23в	30в	34в	37е
7б	14и	19в	24е	30ж	35в	38е
6б	15и	18в	25е	28е	36в	39е
5б	14к	17в	26г	27г	31г	37ж
4б	15к	16в	25ж	28ж	32г	38ж
3б	14л	17г	24ж	29е	33г	39ж
2б	15л	18г	23г	30г	34г	37з
1б	14м	19г	24з	29ж	35г	38з
2в	15м	20г	25з	28з	36г	39з
3в	14н	21г	26д	27д	31д	37и
4в	15н	22г	26ж	30е	32д	38и
5в	14о	16д	23д	29з	33д	39и
6в	15о	17д	23е	30д	34д	37к
7в	14п	18д	23ж	27ж	35д	38к
8в	15п	19д	26е	27е	36д	39к

<i>Вар./№ зав</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
-------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Завдання №1

D, мм	b, мм	h, мм
60	54	83,2
80	60	86,4
100	70	88,7
<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №2

$h_0 \times b_0 \times l_0$	120 × 160 × 3000	100 × 140 × 4000	140 × 160 × 4000
$h_1 \times b_1 \times l_1$	90 × 170 × 4000	70 × 150 × 5000	110 × 170 × 5000
D _к	500	400	600
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №3

b ₀	300	350	400
Δh	30	35	40
b ₁	0,245	0,265	0,275
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №4

Заготівля	16 × 16	18 × 18	20 × 20
D _к	300	400	500
Калібр	8,2 × 21,5	8,4 × 22,2	8,6 × 22,6
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №5

d ₁	24	28	32
Овал 1	22,4 × 32,5	24,2 × 35,2	26,8 × 36,4
Квадрат 2	20 × 20	25 × 25	30 × 30
Овал 2	18,3 × 48,6	19,2 × 49,8	19,6 × 49,2
D ₁	400	500	600
D ₂	600	400	800
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №6

Ромб 1	160 × 188,6	170 × 190,4	180 × 199,4
Ромб 2	210,6 × 180,6	214,8 × 186,6	218,2 × 190,6
D_k	500	600	800
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №7

D	600	400	800
Δh	26	24	30
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №8

δ	500	400	600
D_k	950	1000	1050
f	0,4	0,35	0,38
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №9

D_k	450	500	550
Квадрат	80	100	120
$\Delta h/D_k$	1/14	1/12	1/16
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №10

h	120	140	160
D_k	600	800	1000
f	0,25	0,28	0,22
до h за прохід	110	130	150
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №11

D_k	600	610	620
Сталь	20	10Г2А	45
h	2,4	2,8	3,2
Відносне обтиснення, %	22	26	28
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Завдання №12

h_0	50	42	55
Δh	5,6	5,2	5,8
f	0,4	0,42	0,46
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Контактне тертя

Завдання №13

Ст.3	Ст.4	Ст.5	Р18	X12	ШХ15	X13Н4Г9	X18Н10Т	X17Ю5	X15Н60	Ст.3
600	700	800	600	700	800	600	700	800	600	700
нові з сіткою	3 сіткою	НОВИЙ ЧГУН	н з сіткою	ЧГУН ВІЛБ.	ЧГУН ВІЛБ.	ЧГУН ШЛ.	1	2	3	4
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1100	1150	1200	1100	1150	1200	1250	1250	1300	1350	1100
50	52	54	56	58	60	62	64	66	70	50
18	20	22	24	26	18	20	22	24	26	18
110	120	130	140	50	160	110	120	130	140	150
<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>	<i>и</i>	<i>к</i>	<i>л</i>

	Р18	X12	ШХ15	X13Н4Г9	X18Н10Т	X17Ю5	X15Н60	Ст.5
	800	600	700	800	600	700	т800	600
<i>т</i>	5	6	7	1	2	3	4	5
	4	5	6	7	8	4	10	12
	1200	1200	1250	1250	1250	1300	1300	1100
	52	54	56	58	60	62	64	66
	20	22	24	26	18	20	22	24
	160	110	120	130	140	150	160	110
	<i>м</i>	<i>н</i>	<i>о</i>	<i>п</i>	<i>р</i>	<i>с</i>	<i>т</i>	<i>у</i>

Сталь
D_k
Валки
V_B
t_{Me}
h_0
Δh
b_0

Завдання №17

Q	80	82	85	84	88
T	0,32	0,22	0,25	0,30	0,35
D₂	240	260	280	300	320
D₃	250	270	290	310	330
n₂	500	550	600	650	700
H₂	6,5	6,7	6,9	7,1	7,3
h₂	6	6,2	6,4	6,6	6,8
H₃	6	6,7	6,4	6,6	6,8
h₃	5	5,2	5,4	5,6	5,8
Q	32	34	36	38	40
f₂	0,22	0,24	0,25	0,26	0,27
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>

Завдання №18

H₂	200	250	300	220	270
D₂	600	620	640	660	680
H₃	160	170	180	160	170
D₃	620	640	660	680	700
h₃	120	130	140	120	130
f₂	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46
f₃	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51
D*2	440	460	480	500	520
D*3	500	520	540	560	580
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>

Завдання №19

Штаба	100×120×3000	120×140×4000	140×160×4000	110×140×3000	120×160×4000
Прокатана штаба	70×130×4000	90×150×5000	110×170×5000	80×150×4000	90×170×5000
D_к	0,6	0,8	0,7	0,9	1,0
V_в	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>

Завдання №20

D₁₀	330	320	340	350	360
h₁₀	350	370	390	400	410
Штаба	75×5	77×5	79×5	81×6	83×6
t₁₀	900	920	930	910	940
h₉	6	7	8	6	7
t₉	925	945	955	935	965
	<i>г</i>	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>

Завдання №21

H₁₁	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
v₁₁	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5
μ₁₁	1,129	1,130	1,131	1,132	1,133
μ₁₀	1,30	1,31	1,32	1,33	1,34
μ₉	1,40	1,41	1,42	1,43	1,44
μ₈	1,52	1,53	1,54	1,55	1,56
μ₇	1,69	1,68	1,70	1,71	1,72
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>

Поперечна течія металу в осередку деформації (розширення)

Завдання №22

$h_0 \times b_0 \times l_0$	100×130×300	110×140×400	120×150×500	130×160×3000	140×170×4000	10×130×5000	110×140×3000	120×150×400
$h_1 \times b_1 \times l_1$	70×140×4000	80×150×5000	90×160×6000	100×170×4000	110×180×5000	70×140×6000	80×150×4000	90×160×5000
D_k	600	650	700	800	600	650	700	800
n_b	50	60	70	80	50	60	70	80
	a	b	$в$	$г$	$д$	e	$ж$	$з$

Завдання №23

D	600	700	800	600	700	800	600	700
V	3	4	5	6	7	8	9	10
t_1	1050	1100	1150	1200	1050	1100	1150	1200
h_0	40	50	60	70	40	50	60	70
Δh	15	17	19	21	15	17	19	21
b_0	110	120	130	140	110	120	130	140
F	0,340	0,344	0,348	0,352	0,340	0,344	0,348	0,352
	a	b	$в$	$г$	$д$	e	$ж$	$з$

Завдання №24

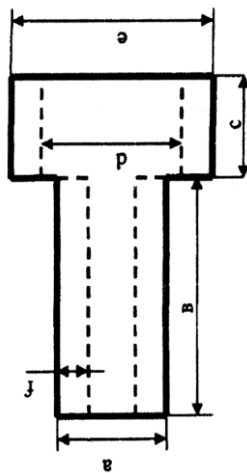
A	40	50	60	70	40	50	60	70
b/h	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,4	1,5
D_k	400	500	600	700	400	500	600	700
F	0,25	0,27	0,29	0,31	0,25	0,27	0,29	0,31
	a	b	$в$	$г$	$д$	e	$ж$	$з$

Завдання №25

h_0/b_0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,4	1,5
a_0	50	60	70	80	50	60	70	80
b/h	1,2	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,4	1,5
D	400	500	600	700	400	500	600	700
F	0,22	0,24	0,26	0,28	0,22	0,24	0,26	0,28
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>

Нерівномірна деформація

Завдання №26



A	40	42	46	48	50	40	42	46
B	60	62	64	66	68	60	62	64
C	40	42	44	46	48	50	42	44
D	10	8	6	12	6	8	10	12
E	70	72	74	76	70	72	74	76
F	5	6	7	8	4	5	6	7
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>

Завдання №27

Штаба	25×420×10·10 ³	26×440×11·10 ³	27×460×12·10 ³	28×480×9·10 ³	29×500×10·10 ³	30×420×11·10 ³	25×440×12·10 ³	26×440×11·10 ³
h'	20	21	22	23	20	21	22	23
h''	17,2	17,4	17,6	17,8	17,2	17,4	17,6	17,8
B	32	34	36	38	32	34	36	38
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>

Завдання №28

h₁	30	32	34	36	30	32	34	36
h₂	19,2	19,4	19,6	19,8	19,5	19,3	19,7	19,9
B	60	62	64	66	68	70	72	74
M	1,22	1,23	1,24	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>

Завдання №29

D_c	500	600	700	500	600	700	500	600
Δh_B	40	42	44	46	48	50	52	54
t_c	1200	1220	1240	1250	1200	1240	1250	1200
t_н	1100	1120	1140	1150	1100	1140	1150	1100
p₁	20	22	24	26	28	30	32	34
p₂	49	50	51	52	53	54	55	56
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>

Тиск металу на валки

Завдання №30

D_к	500	600	700	800	850
V_в	2,5	2,8	3,1	3,3	3,4
h₀	54	56	58	62	64
Δh	14	16	18	20	22
b₀	110	120	130	140	150
f_y	0,332	0,338	0,344	0,326	0,332
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>

Завдання №31

h₀	280	290	300	310	320
h₁	240	250	260	280	290
b₀	290	300	310	330	340
b₁	295	305	315	335	340
D_к	550	600	650	700	750
V_в	2,2	2,4	2,6	2,8	2,9
f	0,24	0,26	0,28	0,32	0,34
C %	0,2	0,4	0,5	0,6	0,7
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>

Завдання №32

d, мм	22	24	26	28	29
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>

Завдання №33

D_k	450	500	550	600	650
h_0	2,3	2,4	2,5	2,7	2,5
h_1	1,40	1,42	1,45	1,47	1,49
h_2	0,6	0,7	0,8	0,82	0,84
h_3	0,52	0,54	0,56	0,56	0,58
h_4	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38
h_5	0,21	0,22	0,23	0,24	0,26
Сталь	Ст.1	08сп	У10	трансформаторна	Ст.3
	a	b	e	z	d

Завдання №34

$C \%$	0,2	0,4	0,5	0,6	0,3
h_0	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9
$\Delta h/h_0$	0,32	0,34	0,36	0,38	0,41
D_k	120	140	160	180	170
f	0,18	0,22	0,24	0,26	0,25
	a	b	e	z	d

Завдання №35

D_к	410	420	430	440	450
h₀	1,54	1,56	1,58	1,62	1,64
h₁	0,68	0,72	0,74	0,76	0,78
$\Delta h/h_0 \cdot 100\%$	48	50	52	53	54
f	0,036	0,038	0,04	0,042	0,044
σ_1	76,6	76,8	77,2	77,4	77,6
σ_0	64,2	64,4	64,6	64,8	64,9
k₀	1,12	1,13	1,14	1,16	1,17
$\sigma_{т0}$	250	260	280	290	295
k₁	1,12	1,13	1,14	1,16	1,17
$\sigma_{т1}$	600	610	620	630	640
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>

Енергія, що затрачується на прокатку

Завдання №36

D_к	800	850	900	950	1000
n	40	50	60	70	80
G	5	5,2	5,4	5,6	5,8
L₀	1400	1500	1600	1700	1800
F₀	375200	376200	377200	379200	379400
перетин 5	410 × 500	415 × 505	420 × 510	425 × 515	430 × 520
F₅	228200	228400	228600	228800	229200
перетин 6	380 × 510	385 × 515	390 × 520	395 × 530	400 × 535
F₆	19200	19400	19600	19800	20000
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>
				<i>e</i>	<i>ж</i>
		<i>з</i>	<i>и</i>	<i>к</i>	<i>л</i>

Завдання №37

N_{л.с.}	7000	7500	7800	8000	8100	8200	8300	8400	8500	8600	8700
M	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
Перетин	400 × 400	420 × 420	440 × 440	460 × 460	480 × 480	500 × 500	520 × 520	540 × 540	560 × 560	580 × 580	600 × 600
Δh	80	85	90	95	100	85	90	95	100	85	90
p_{ср}	48,2	48,4	48,6	48,8	50,2	50,4	50,6	50,8	51	51,2	51,4
d_t	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590	600
f	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>	<i>и</i>	<i>к</i>	<i>л</i>

Завдання №38

h₀	0,5	0,52	0,54	0,56	0,58	0,6	0,62	0,64	0,66	0,68	0,7
h₁	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50	0,52
b	0,8	0,85	0,9	0,95	1	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
σ₀	140	142	144	146	148	150	152	154	156	158	160
σ₁	100	105	110	115	120	125	130	100	110	120	130
D	400	450	500	420	440	460	480	520	540	560	580
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>e</i>	<i>ж</i>	<i>з</i>	<i>и</i>	<i>к</i>	<i>л</i>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Данченко, В.М.* Теорія процесів обробки металів тиском: підручник [Текст] / В.М. Данченко, В.О. Гринкевич, О.М. Головка. – Дніпропетровськ: Пороги, 2008. – 370 с.
2. *Середа, Б.П.* Прокатне виробництво: навчально-методичний посібник [Текст] / Б.П. Середа. – Запоріжжя: ЗДІА, 2008. – 252 с.
3. *Грудев, А.П.* Теория прокатки [Текст] / А.П. Грудев. - М.: Интермет Инжиниринг, 2001. - 280 с.
4. *Василев, Я.Д.* Теорія поздовжньої прокатки: підручник [Текст] / Я.Д. Василев, О.А. Мінаєв. – Донецьк: УНІТЕХ, 2009. – 488 с.
5. Теория прокатки. справочник [Текст] / А.И. Целиков, А.Д. Томленов, В.И. Зюзин [и др.] – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
6. *Целиков, А.И.* Теория продольной прокатки [Текст] / А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. - М.: Металлургия, 1980. - 320 с.
7. *Грудев, А.П.* Внешнее трение при прокатке [Текст] / А.П. Грудев. - М.: Металлургия, 1973. - 288 с.
8. *Целиков, А.И.* Теория расчета усилий в прокатных станах [Текст] / А.И. Целиков. - М.: Металлургиздат, 1962. - 494 с.
9. *Смирнов, В.С.* Теория прокатки [Текст] / В.С. Смирнов. - М.: Металлургия, 1967. - 460 с.
10. *Третьяков, А.В.* Теория, расчет и исследования станов холодной прокатки [Текст] / А.В. Третьяков. - М.: Металлургия, 1966. - 255 с.
11. *Николаев, В.А.* Теория процессов прокатки [Текст] / В.А. Николаев. – Запорожье, ЗГИА, 2002. – 188 с.
12. *Середа, Б.П.* Теорія процесів прокатного та трубного виробництва: методичні вказівки до лабораторного практикуму [Текст] / Б.П. Середа, М.Г. Прищип. – Запоріжжя: ЗДІА, 2004. – 42 с.