

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА
ПОЛІТЕХНІКА»**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання розрахунково-графічного завдання
та технологічних розрахунків для курсового проєкта (роботи)
з дисципліни “Технологія листового прокатування”
для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка,
освітня програма – Обладнання та технології пластичного
формування конструкцій машинобудування
всіх форм навчання**

Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічного завдання та технологічних розрахунків для курсового проєкта (роботи) з дисципліни “Технологія листового прокатування” для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка, освітня програма – Обладнання та технології пластичного формування конструкцій машинобудування всіх форм навчання /Укл.: В. Д. Обдул, А.А. Ленок. – Запоріжжя: НУ “Запорізька політехніка”, 2021. – 70 с.

Укладачі:

В. Д. Обдул, доцент, к.т.н.
А.А. Ленок, ст. викладач

Рецензент:

В.В. Широкобоков, доцент, к.т.н.

Відповідальний
за випуск:

А.А. Ленок, ст. викладач

Затверджено
на засіданні кафедри
“Обробка металів тиском”
Протокол № 7 від 03 березня 2021 р.

Рекомендовано до видання НМК МФ
Протокол № 4 від 16 березня 2021 р.

ЗМІСТ

1 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ	4
2 ПРОКАТУВАННЯ ВІДЛИВКІВ НА СЛЯБ	5
3 ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОКАТУВАННЯ	7
СЛЯБІВ І ТОНКОГО ЛИСТА	7
3.1 Обладнання для холодного прокатування.....	8
4 МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ РЕЖИМІВ ОБТИСКУВАННЯ ПРИ ПРОКАТУВАННІ СЛЯБІВ, ТОВСТИХ І ТОНКИХ ЛИСТІВ	9
5 ПІДГОТОВКА ЗАГОТОВОК ДО ПРОКАТУВАННЯ	14
6 ОБЧИСЛЕННЯ РЕЖИМІВ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ХОЛОДНОМУ ПРОКАТУВАННІ	16
7 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ	19
7.1 Розробка режимів прокатування відливки	19
7.2 Розробка режимів прокатування гарячекатаної смуги	31
7.3 Розробка режимів прокатування холоднокатаної смуги	39
ЛІТЕРАТУРА	49
Додаток А Технічні характеристики деяких станів	50
Додаток Б Рисунки до виконання завдань	59
Додаток В Розрахунково-графічне завдання з дисципліни “Технологія листового прокатування”	69

1 ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ

Метою виконання вказаних розрахунків є випробування, та закріплення знань, придбаних на лекційному курсі, а також допомога у виконанні розрахунків у відповідних розділах дипломних проєктів, теми яких присвячені листовому прокатуванню, та у контрольних завданнях.

Вихідними даними для виконання вказаних розрахунків є наступні дані:

1. Спосіб прокатування – в гарячому чи холодному стані, тобто це може бути або гаряче прокатування відливків на сляби заданого розміру, або гаряче прокатування слябу на тонкий лист. Завдання може мати і зворотній характер – відомі розміри слябу чи тонкого листа.

2. Марка прокатуваного металу.

3. Вагові чи геометричні параметри прокату, або розкату.

4. Тип посадки в нагрівальні пристрої – холодний, гарячий, чи транзитний прокат.

5. У випадку холодного прокатування заданими величинами, як правило, є геометричні та вагові параметри прокату.

Завдання для виконання РГЗ, курсових робіт приведені нижче у додатках.

2 ПРОКАТУВАННЯ ВІДЛИВКІВ НА СЛЯБ

В залежності від марки матеріалу необхідно вибрати режими нагрівання відливків.

Нагрівання відливків, як правило, здійснюється в нагрівальних колодязях, а нагрівання слябів – у методичних три-, або чотиризонних печах з використанням в якості палива суміші газів: коксо-доменного газу, чи доменно-природного газу. Нагрівальні пристрої можуть бути рекуперативними, регенеративними або з електронагріванням відливків чи слябів, [1,11]. В перших двох окислення складає **2 – 2,5%**, а в останніх – **0,1 – 0,3%**.

Рекомендовані режими нагрівання в залежності від хімічного складу приведені в [2,3,10]. Там же розглянуто і можливі види браку, які виникають при порушенні режимів нагрівання.

Посадка металу в нагрівальні пристрої може бути холодним (температура поверхні відливка умовно приймається *нижче 400 °C*), або гарячим, коли температура на поверхні відливка лежить в межах **500 – 1000 °C** (при прокатуванні конструкційних марок сталей, коли вміст вуглецю *менше 0,4%* , температура посадки може бути **1100 – 1200 °C**, відливок при цьому має, як правило, рідку серцевину).

Нагрівання перед прокатуванням повинне забезпечити найменший опір деформуванню і високу пластичність. Отже, чим вища температура заготовки, тим менші витрати енергії при прокатуванні, більші величини абсолютного обтискування по проходах, вища продуктивність станів. Одночасно різко знижується кількість поломок механізмів станів. Найбільш важливим є нагрівання, яке забезпечує рівномірне прогрівання металу по всьому перерізу заготовки (перепад температур на поверхні і всередині заготовки не повинен перевищувати **10±20 °C**. В той же час висока температура і неправильні режими нагрівання можуть викликати більше окалиноутворення, зменшення вмісту вуглецю, перегрівання, перепалювання, які погіршують якість металу, або приводять до браку.

На утворення окалини впливає тривалість нагрівання, яке визначається хімічним складом металу. Тривалість нагрівання

визначається також температурою посадки і відношенням поверхні заготовки до її маси.

Режими нагрівання металів і їх сплавів можна знайти у відповідних джерелах [1,2,4,5,10,11].

Брак гарячекатаної листової сталі

До основних недоліків гарячекатаної листової сталі слід віднести незадовільні механічні властивості, неточність розмірів, хвилястість та поверхневі дефекти.

Незадовільні механічні властивості листової сталі виникають внаслідок зміни режимів нагрівання, прокатування, охолодження і термічної обробки.

Неправильні розміри прокату отримуються внаслідок прокатування відливків або слябів, маса яких не відповідає заданим розмірам; при значному зношуванні валків посередині форма буде лінзоподібною і т. д. [1,2,11].

Холодне прокатування тонких стрічок, смуг, листів

Холодне прокатування в порівнянні з гарячим має наступні переваги:

- виробництво смуг, листів товщиною від декількох мікронів до **0,8–1 мм**;
- висока якість продукції як за геометрією, так і за фізико-механічними властивостями.

Основна маса продукції виготовляється товщиною **0,5–2,5 мм** і шириною до **2300 мм**, а жерсть виготовляється товщиною **0,07–0,3 мм**, шириною до **1300 мм**.

Переважну більшість прокатної продукції в кольоровій металургії у вигляді тонких стрічок і листів також отримують холодним прокатуванням. Наприклад, фольга з алюмінію випускається у вигляді смуг товщиною **0,005 мм** шириною до **1000–1500 мм**.

З ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОКАТУВАННЯ СЛЯБІВ І ТОНКОГО ЛИСТА

Нагріті відливки подають для прокатування на слябінги, блюмінги, або блюмінги-слябінги.

За діаметром робочих валків обтискувальні стани ділять на стани з малим діаметром бочки валка (**880 – 900 мм**), середнім діаметром бочки валка (**950 – 1150 мм**), і з великим діаметром бочки валка (**1200 – 1300 мм**).

Відомо, що ступінь пророблюваності металу залежить від співвідношення висоти розкату – ***H*** та діаметра бочки валка – ***D***. Повна пророблюваність по висоті досягається при **$H/D \leq 0,5$** і сприяє однорідності властивостей розкату по перерізу і підвищенню якості металу [11,2]. Для отримання слябів більше всього використовують спеціальні стани – слябінги, які внаслідок оснащення кліті вертикальними валками мають певні переваги перед блюмінгами, або блюмінгами-слябінгами.

Сучасні **слябінги 1150 конструкції НКМЗ** прокатують сляби товщиною **80 ÷ 300 мм**, шириною **900 – 1550 мм** з відливоків вагою до **28 т** при швидкості прокатування до **5 м/с** і продуктивності **5 – 5,5 млн/рік**.

Дані по обтискувальних станах, які необхідні для розрахунків наведені в додатках.

Гаряче прокатування товстого та тонкого листа (стрічки, смуги) здійснюють на станах реверсивних, напівбезперервних та безперервних. Ці стани можна класифікувати за наступними ознаками: кількість клітей і їх конструкції та призначення, тип нагрівальних пристроїв, довжина бочки валків – сортамент листового прокату, склад допоміжних печей. За кількістю клітей стани для прокатування товстого листа бувають одно-, дво-, три- і чотириклітеві. Довжина бочки валка може сягати **2000 – 2300 мм, 3000 – 3500 мм, 5000 – 5500 мм**.

Стани для гарячого прокатування тонкого листа можуть бути одноклітевими (з печевими моталками), напівбезперервні та безперервні стани.

На цих станах отримують стрічку (смугу) товщиною від **1,0 – 1,2 мм** до **12 – 16 мм** і шириною до **2150 мм** вагою до **50 – 60 т** і швидкістю прокатування до **25 – 30 м/с**. Крім того на сьогодні широко застосовуються (особливо за кордоном) планетарні стани.

Дані по станах гарячого прокатування товстих і тонких смуг наведені в додатках.

Особливості будови широкосмугових станів і технології прокатування на них в деталях розглянуто в [2,3,10,11].

3.1 Обладнання для холодного прокатування

Всі стани за технологічним призначенням можна розділити на прокатні, дресирувальні і прокатно-дресирувальні.

Найпродуктивнішими є безперервні стани дво-, три-, чотири-п'яти і шестиклітеві. Але більше за всіх використовуються чотири- або п'ятиклітеві стани.

За конструкцією клітей вони можуть бути дуо, кварто, шести-, дванадцяти, або двадцятивалковими.

Одноклітеві стани – реверсивні, мають меншу продуктивність, але вони більш гнучкі в технологічному плані.

4 МЕТОДИ РОЗРАХУНКІВ РЕЖИМІВ ОБТИСКУВАННЯ ПРИ ПРОКАТУВАННІ СЛЯБІВ, ТОВСТИХ І ТОНКИХ ЛИСТІВ

На сьогодні існує біля одинадцяти методів обчислення режимів обтискування, які мають теоретичне обґрунтування [14]. Розглянемо деякі з них:

I Метод, заснований на граничних умовах захвату металу, який характеризується рівністю коефіцієнта тертя тангенсу кута захвату:

$$f = \operatorname{tg} \alpha = C \alpha,$$

де C – коефіцієнт пропорційності.

Якщо прирівняти дугу захвату її хорді, отримаємо

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}.$$

Таким чином будемо мати

$$\Delta h_{\max} = \frac{1}{C_2} f^2 R,$$

при $\alpha = 1 \div 30^\circ \frac{1}{C_{\text{сеп}}} = 0,95$, тоді:

$$\Delta h_{\max} = 0,95^2 f^2 R \approx 0,9 f^2 R,$$

на практиці:

$$\Delta h_{\max} = 0,9 K_a f^2 R,$$

де $K_n = 0,9$ – коефіцієнт, що враховує переточення валків;
 $K_a = 0,95$ – коефіцієнт надійності захвату смуги валками.

Тоді:

$$\Delta h_{\max} = 0,77 f^2 R.$$

Для сталених валків:

$$f = 1,05 - 0,005t,$$

де t – температура прокатуваного металу.

Для чавунних валків:

$$f = 0,8 f_{cm}.$$

II Метод заснований на використанні повної потужності двигуна, яка визначається за формулою:

$$N = (1,05 - 1,1) \cdot p \cdot B \cdot \Delta h \cdot v,$$

де P – питомий тиск на валки, Н/м²;

B – ширина розкату, м;

Δh – обтискування, абсолютне, м;

v – швидкість прокатування, м/с²;

A – величина обтискування буде дорівнювати:

$$\Delta h_t = \frac{N}{(1,05 - 1,1) p \cdot B \cdot v}, \text{ або}$$

$$\Delta h_t = \frac{N}{(1,1 - 1,2) p \cdot B \cdot v}.$$

Значення питомого тиску приймається на базі літературних даних [16], а потім перевіряється.

III Метод, розрахований на рівності повного тиску металу на валки в кожному проході (кліті).

Якщо розрахунок режимів прокатування ведуть від попереднього (по ходу прокатування):

$$\Delta h_n = \left(\frac{P_{n-1}}{P_n} \cdot \frac{B_{n-1}}{B_n} \right)^2 \cdot \frac{R_{n-1}}{R_n} \cdot \Delta h_{n-1}.$$

Для слябінгів, блюмінгів, одноклітєвих станів $B_{n-1} \approx B_n i$,

$$\Delta h_n = \left(\frac{P_{n-1}}{P_n} \right)^2 \Delta h_{n-1}.$$

Значення P_n і P_{n-1} приймають по літературним даним. Якщо ці дані відсутні, то приблизні дані знаходяться по найбільш слабкому місцю на стані (міцність деталей приводу чи прокатних валків).

IV Метод, який використовує міцність прокатних валків.

Допустиме зусилля зумовлене міцністю валка:

$$P_{son} = \frac{0,4 D^2 \sigma_{32}}{L + \ell - 0,5 B},$$

де D – діаметр бочки валка, м;

σ_{32} – допустиме напруження на згин, МПа;

L – довжина бочки валка, м;

ℓ – довжина шийки валка, м;

B – ширина розкату, м.

Допустимий повний тиск металу на валки:

$$P_{don} = P \cdot B \sqrt{R \cdot \Delta h_{max}}.$$

Прирівнюючи ці залежності отримаємо:

$$\Delta h_{max} = \frac{0,32 \cdot D^5 \cdot \sigma_{32}^2}{[(L + \ell - 0,5B)P \cdot B]^2}$$

Виходячи з міцності шийки валка:

$$P_{don.} = \frac{W_m \cdot \sigma_{32}}{C - \tau},$$

де $W_m = 0,1d^3$ – момент опору шийки валка на згин;

$C \approx 0,55d$ – відстань від краю бочки валка до вісі натискувального гвинта;

$\tau \approx 0,1d$ – радіус галтелі;

d – діаметр шийки валка.

Якщо прийняти $d = 0,6D$, то

$$\Delta h_{max} = \frac{0,232d^3 \sigma_{32}^2}{(P \cdot B)^2}.$$

У Метод розрахунків за рушійним моментом, використовують тоді, коли обмежуючим фактором є привід головної лінії кліті.

Момент прокатування:

$$M_{\kappa.} = 2P\psi\sqrt{R\Delta h},$$

де ψ – коефіцієнт, враховує плече рівнодіючої тиску металу на валки відносно вертикальної вісі, що проходить по центрах валків.

Якщо вважати, що витрати на тертя складають близько 10%, то

$$M_{\partial u.} = \frac{1,1P\sqrt{R\Delta h + 1,32 f_{ni\partial} P \cdot R}}{i},$$

$$\Delta h_{\text{vax}} = \frac{1}{R} \left(\frac{M_{\partial u.}}{1,1P} - 1,2 f_{ni\partial} \cdot R \right)^2,$$

де i – передавальний коефіцієнт.

З іншими методами можна ознайомитись в [3,14].

5 ПІДГОТОВКА ЗАГОТОВОК ДО ПРОКАТУВАННЯ

Заготовкою для виробництва холоднокатаних смуг і стрічок є гарячекатані смуги і стрічки товщиною, здебільшого, **від 1,8 до 6,0 мм**, які надходять на переробку у вигляді рулонів. Поверхня цих заготовок покрита окисною плівкою, яка вдавлюється в основний метал, погіршуючи його якість і сприяє швидкому зношуванню валків. Тому першою операцією при холодному прокатуванні є видалення окалини з поверхні заготовки.

Існують декілька способів видалення окалини, однак найбільш широке застосування отримали механічний і хімічний.

На сьогодні ці методи використовують як окремо так і в комбінації.

Для хімічного видалення (травлення) використовують розчини соляної або сірчаної кислот.

Після травлення смуги подаються на промивання і сушіння гарячим повітрям. Ці операції як правило виконуються на одному агрегаті – травильному. Швидкість проходження смуги через травильний агрегат досягає **3–6 м/с**.

Після видалення окалини і сушіння метал подається на прокатування.

Холодне прокатування завжди ведеться з натягом, як переднім, так і заднім. Це дозволяє знизити тиск металу на валки і покращити геометрію смуги. Передній натяг лежить в межах **(0,2–0,5) σ_m** , причому межа текучості повинна враховувати наклеп. Задній натяг вибирають меншим **0,1 σ_m** [10,11], щоб не було зварювання витків при наступному відпалюванні.

Велику роль при холодному прокатуванні відіграє мастило. Воно виносить тепло з осередку деформації, абразивні частки з контактних поверхонь і сприяє зменшенню зусиль прокатування. Типи мастил, які використовуються при холодному прокатуванні і коефіцієнти тертя наведені в таблиці IV.5, IV.7 [17].

Для виробництва найбільш тонких смуг конструкційних марок сталей відносно обтискування вибирають **$E_\Sigma \approx 0,8$** , а при прокатуванні більш товстих смуг **$E_\Sigma = 0,5–0,6$** .

Товщину заготовки вибирають виходячи з товщини готової продукції і вибраного сумарного відносного обтискування:

$$h_{noc.} = \frac{h\kappa}{1 - E_{\Sigma}}.$$

Розподіл обтискування по клітям (проходам) розподіляють згідно з [10,11,1], перевіряючи при цьому на відповідність можливості захоплення стрічки валками:

$$tq\alpha_{max} \leq f_{mp}.$$

Якщо необхідно визначити середнє значення межі текучості, то її визначають як середнє арифметичне:

$$\sigma_{ap} = 0,5(\sigma_{\tau_o} + \sigma_{\tau_i}),$$

де σ_{τ_o} – межа текучості перед входом металу в осередку деформації,

σ_{τ_i} – межа текучості металу після виходу з осередку деформації.

6 ОБЧИСЛЕННЯ РЕЖИМІВ ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ХОЛОДНОМУ ПРОКАТУВАННІ

Вибір режимів деформування багато в чому визначає якість та продуктивність технологічного процесу, а тому при розробці технологічного процесу прокатування він займає значне місце.

Розрахунок режимів холодного прокатування включає:

- визначення величини сумарного обтискування;
- визначення раціональної товщини підкату;
- вибір режимів натягу;
- вибір швидкісних параметрів;
- розрахунок зусилля прокатування, рушійного моменту і потужності.

Величину сумарного обтискування вибирають в залежності від прокатуваного матеріалу. В літературі є багато відомостей по зміцненню металів при холодному прокатуванні, представлені у вигляді кривих зміцнення, або апроксимуючих формул [1,2,7,14,17].

При холодному прокатуванні необхідно також враховувати сплюснутість валків, яке збільшує довжину осередку деформації:

$$\ell_{dc} = \sqrt{R\Delta h + \ell_1^2} + \ell_1,$$

де ℓ_1 – довжина частини дуги контакту, що знаходиться за лінією валків.

Хічкок пропонує наступну залежність для визначення ℓ_1 :

$$\ell_1 = \frac{8(1 - \mu^2)}{3,14E} RP_{cp} = mRP_{cp},$$

де μ – коефіцієнт який залежить тільки від механічних властивостей валків;

E – модуль пружності валків;

P_{cp} – середнє значення питомого тиску на валки.

Для сталених валків $m = 1,12 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{МПа}}$;

Для чавунних, відбілених $m = 1,9 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{МПа}}$;

Для карбідовольфрамів $m = 0,36 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{МПа}}$;

Питомий тиск знаходять наближенням. Спочатку обчислюють p_{cp} без врахування сплюснення, потім його значення підставляють в вище наведену формулу. Якщо різниця між обчисленим і заданим значенням складає $\leq 5\%$, розрахунки вважають задовільними.

Зусилля прокатування буде дорівнювати:

$$P = P_{cp} B_l \cdot \ell_{dc}.$$

Рушійний момент:

$$M_{np} = 2 P_{\psi} \ell_{dc},$$

де B – ширина смуги (стрічки, листа);

ℓ_{dc} – довжина осередку деформації

ψ – коефіцієнт плеча моменту;

$$\psi = 0,294 - 0,525 \frac{\ell_1}{\ell_{dc}}.$$

Ширина площі пружного сплюснення валків B_k можна визначити за залежністю Герца–Беляєва:

$$B_k = 3.04 \sqrt{\frac{P_\epsilon}{L_\phi \cdot E} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}},$$

де P_ϵ – зусилля прокатування;

E – модуль пружності (для сталених валків $E=2,06 \cdot 10^5$ МПа, чавунних – $E=1,26 \cdot 10^5$ МПа, карбідовольфрамівих – $E=6,51 \cdot 10^5$ МПа);

L_ϕ – довжина бочки валка;

R_1 і R_2 – радіуси робочих валків.

Крім того проводять перевірку валків на згинання, можливість передавання рушійного моменту і, крім того, на контактну міцність.

Якщо розрахунки ведуться для станів безперервного прокатування, необхідно провести розрахунок швидкісних параметрів на основі незмінності секундних об'ємів:

$$v_i \cdot B_i \cdot h_i = \text{const.}$$

7 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ

Розробити режими прокатування відливки (720*1370/780*1600) 2300 мм масою 17,7 т на сляб перерізом 140-1400 мм. Матеріал – Ст 3кп ($C \approx 0,20\%$; $Si = 0,03\%$; $Mn = 0,6\%$; $S = 0,015\%$; $P = 0,01\%$; $N = 0,03\%$; $Al = 0,08\%$).

7.1 Розробка режимів прокатування відливки

Визначаємо максимально можливу величину обтискування, виходячи з граничних умов захвату металу:

$$\Sigma h_n = h_o - h_k + k(b_o - b_k),$$

$$\Sigma h_e = b_o - b_k + \kappa(h_o - h_k),$$

де $K = 0,15$ – коефіцієнт умовного показника збільшення ширини [11,4];

h_o, h_k – товщина розкату до і після переробки; $h_o = 780 \text{ мм}$; $h_k = 140 \text{ мм}$

b_o, b_k – ширина розкату до і після переробки, $b_o = 1600 \text{ мм}$, $b_k = 1400 \text{ мм}$.

Приймаємо $t_k = 1050^\circ\text{C}$, тоді

$$f = 1,05 - 0,0005 \cdot 900 = 0,6.$$

Вважаємо, що сляб товарний і температуру в кінці прокатування можна прийняти $t_k = 900^\circ\text{C}$.

$$f = 0,6 \text{ і } \alpha = \arctg 0,6 = 0,54 \text{ рад.}$$

Отже:

$$\Delta h_{H_{\max}} = 0,54 \cdot 575 = 167,6 \text{ мм},$$

$$\Delta h_{B_{\max}} = 0,54 \cdot 450 = 131,2 \text{ мм}.$$

Кількість проходів буде складати

$$n_{Hp} = \frac{\sum h_H}{\Delta h_{H \max}} = \frac{670}{167,5} \approx 3,9,$$

$$n_{Bp} = \frac{\sum h_B}{\Delta h_{B \max}} = \frac{296}{131,2} = 2,2.$$

Приймаємо $n_{Hp}=4$; $n_{Bp}=3$. Тоді

$$\sum h_H = 7800 - 140 + 0,15(1600 - 1400) = 670 \text{ мм},$$

$$\sum h_B = 1600 - 1400 + 0,15(780 - 140) = 296 \text{ мм}.$$

Визначаємо максимально можливий кут захвату із залежності:

$$\Delta h_{H \max} = \alpha_{\max} R_H,$$

$$\Delta h_{B \max} = \alpha_{\max} R_B,$$

де R_H , R_B – радіуси валків стану слябінг (попередньо зупиняємось на використанні *слябінгу 1150* у якого: $D_{\delta n} = 1150 \text{ мм}$; $D_{\delta B} = 900 \text{ мм}$; $L_{\delta n} = 1150 \text{ мм}$, $L_{\delta B} = 2100 \text{ мм}$; $N_{\delta n} = 7200 \text{ кВт}$; $n = 0-53-80 \text{ об/хв}$; $N_{\delta B} = 2300 \text{ кВт}$; $n = 0-75-120 \text{ об/хв}$; висота максимальна підйому верхнього валка 1750 мм ; відстань між вертикальними валками регульована в межах $720-2150 \text{ мм}$).

$$\alpha_{\max} = \arctg f,$$

де α – коефіцієнт тертя між металом і валками і дорівнює [1,8]:

$$f = 1,05 \div 0,0005 t_K,$$

де t_K – температура кінця прокатування.

Для слябінга кількість проходів повинна бути непарною, отже

$$n_n = 5; n_e = 3.$$

З іншого боку абсолютна величина обтискування обмежується міцністю валків і встановленою потужністю електродвигуна головної лінії:

$$\Delta h = N(1,09 \cdot p \cdot B \cdot V),$$

де N – потужність електродвигуна головної лінії, кВт;

P – питомий тиск металу на валки, МПа;

B – ширина розкату, мм;

V – швидкість прокатування, м/с.

Для розрахунків приймаємо

$$B = 1600 \text{ мм}; H = 780 \text{ мм}.$$

Питомий тиск металу на валки:

$$P = \sigma_T 0,5 \left(\frac{l_\delta}{h} + \frac{l_\delta}{h} \right),$$

де $l_\delta = \sqrt{R \cdot \Delta h}$ – довжина осередку деформації;

σ_T – середнє значення межі текучості:

$$\sigma_T = 1,15 \sigma_o \cdot k_v \cdot k_t \cdot k_l,$$

де $\sigma_o = 86 \text{ МПа}$ – базове значення межі текучості;

$k_v = 1,35$; $k_t = 0,6$; $k_l = 0,9$ – коефіцієнти, які враховують швидкість, температуру прокатування і ступінь деформування [11].

$$\sigma_T = 1,15 \cdot 86 \cdot 1,35 \cdot 0,6 \cdot 0,9 = 72 \text{ МПа},$$

$$l_{\text{дн}} = \sqrt{575 \cdot 167,6} = 310 \text{ мм},$$

$$l_{\text{де}} = \sqrt{450 \cdot 131,2} = 242 \text{ мм}.$$

Середні значення висоти і ширини відливки:

$$h_{\text{сп}} = 704,2 \text{ мм}; h_{\text{сп}_6} = 1574,8 \text{ мм},$$

Отже:

$$l_{\text{дн}}/h_{\text{сп}_n} = \frac{310}{704,2} = 0,44,$$

$$l_{\text{де}}/h_{\text{сп}_6} = \frac{242}{1574,8} = 0,15.$$

Середнє значення питомого тиску:

$$P_{\text{сп}_n} = 72 \cdot 0,5 \left(0,44 + \frac{1}{0,44} \right) = 97,6 \text{ МПа};$$

$$P_{\text{сп}_B} = 72 \cdot 0,5 \left(0,15 + \frac{1}{0,15} \right) = 245 \text{ МПа};$$

Максимально можлива величина обтискування, обмежена потужністю електродвигуна:

$$\Delta h_H = \frac{14400}{(1,09 \cdot 97,6 \cdot 1000 \cdot 2)} = 56 \text{ мм},$$

$$\Delta h_B = \frac{4600}{(1,09 \cdot 245 \cdot 780 \cdot 2)} = 53 \text{ мм}.$$

Скориставшись рекомендаціями [1,2;11] вибираємо відповідну схему прокатування, беручи до уваги наступне: перші проходи у

вертикальних і горизонтальних валках здійснюють для ламання окалини і для вирівнювання розмірів відливки:

$$\Delta h_1 = (10-15\%) \Delta h_{max} \text{ іноді } \Delta h_1 = 25\% h_{max}.$$

Прийmemo $\Delta h_1 = 50 \text{ мм}$.

Дані розрахунків зводимо в таблицю 7.1.

Таблиця 7.1 – Геометричні параметри розкату в процесі обтискування по проходам

№ проходу	Горизонтальні валки			Вертикальні валки			Довжина розкату l , мм
	h	Δh	$\Delta \epsilon$	$l_{1\epsilon}$	Δh_{ϵ}		
1	730	50	10	1550	50		2300
2	680	50	10				
3	630	50	10	1530	40		2400
15	140			1400	40		14200

Розрахунок температурних режимів прокатування

Для розрахунку температурних режимів скористаємось формулою Тягунова:

$$t_i = t_n - \frac{(t_n - t_k) \cdot h_k}{h_n - h_k} \cdot \left(\frac{h_n}{h_{n-1}} - 1 \right),$$

де t_n – температура на початку прокатування, $t_n = 1200^\circ\text{C}$;

t_k – температура в кінці прокатування, $t_k = 900^\circ\text{C}$;

h_n – початкова товщина розкату, $h_n = 780 \text{ мм}$;

h_k – кінцева товщина розкату, $h_k = 140 \text{ мм}$;

h_{ni} – товщина розкату перед i -тим проходом.

Отже

$$t_2 = 1200 - \frac{(1200 - 900) \cdot 140}{780 - 140} \cdot \left(\frac{780}{730} - 1 \right) = 1195,5^\circ \text{C}.$$

Аналогічні розрахунки проводимо і для наступних проходів (таблиця 7.2).

Можна скористатись і іншими методами [1,11,14].

Таблиця 7.2 – Температура розкату по проходам

№ проходу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t, ^\circ\text{C}$ по проходам	1200	1195,5	1190,3	1184,4	1177,3	1169	1130	1146,5	1130	1110,3	1082,8	1043	981	945,6	899,9

Таблиця 7.3 – Коефіцієнт тертя по проходам

№ проходу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Коеф. Тертя Г.В	0,3174	0,3480	0,3480	0,3989	0,3989	0,3502	0,3572	0,3424	0,3424	0,3943	0,3943	0,4043	0,4053	0,4809	0,5191
Коеф. тертя В.В	0,3174		0,3500		0,3471		0,3502	0,3424		0,4052		0,4043		0,4212	0,3424

Розрахунок коефіцієнтів тертя

Скористаємося формулою Грудєва [11, стр.119]:

$$f_i = k_u \cdot k_t \cdot k_l (1,05 - 0,0005 t_i),$$

де k_u , k_t , k_l – коефіцієнти, які залежать від швидкості, температури прокатування і ступеню деформування, $k_u=1,35$; $k_t=0,55$; $t_i=0,095$ (див. вище).

$$f_i = 1,35 \cdot 0,55 \cdot 0,95 (1,05 - 0,0005 \cdot 1200) = 0,3174.$$

Значення результатів розрахунків наведено в таблиці 7.3.

Розрахунок максимальних кута захвату і величини абсолютного обтискування

Кут захвату:

$$\alpha_{\max} = \arctg f.$$

абсолютна величина обтискування:

$$\Delta h = \alpha_{\max}^2 \cdot R.$$

Результати розрахунків зведені в таблицю 7.4.

Таблиця 7.4 – Значення кута захвату і обтискувань по проходам

№ проходу	1	2	3	4	5	6	7	8
$\alpha_{\max}$	0,3351 0,3073	0,3348	0,3366 0,3348	0,3795	0,3333 0,3795	0,3368	0,3436 0,3368	0,3298
Δh_n	54,3		65,1		63,8		71,9	
Δh_l	41,5		50,4		64,8		51	

Продовження таблиці 7.4

№ проходу	9	10	11	12	13	14	15
α_{max}	0,3351	0,3755	0,3849	0,3842	0,3850	0,3639	0,3986
	0,3073		0,3755		0,3842		
Δh_i	64,5	81	85,1	84,8	85,2	76,1	
Δh_i	48,9		63,4		67,8		71,5

Аналіз табличних даних свідчить, що призначені нами величини абсолютного обтискування не перевищують максимально можливих і процес прокатування буде стійким.

Розрахунок кінематичних параметрів процесу прокатування

Кут захвату буде дорівнювати:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}.$$

Величину нейтрального кута визначаємо за формулою Екелунда–Павлова [17]:

$$\gamma = \frac{0,5\alpha}{\frac{1-\alpha}{2f}}.$$

Випередження, яке має місце при прокатуванні:

$$S = \gamma \cdot \frac{R}{h_i}.$$

Середня товщина підкату:

$$h_{epi} = \sqrt{h_i \cdot h_{i-1}}.$$

Величина відносного обтискування:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_{epi}}.$$

Довжина осередку деформації:

$$l_{\partial} = \sqrt{R \cdot \Delta h}.$$

Визначаємо параметр, який характеризує геометричні умови проходу в зоні деформації $1/h_{cp}$.

Обчислимо швидкість прокатування:

$$V = V_s (1 + S).$$

Обчислюємо швидкість деформації по формулі Целікова [17]:

$$U = \frac{V}{\ell_{\partial} \cdot \varepsilon}.$$

Дані розрахунків зводимо в таблицю 7.5.

Розрахунок енергосилових параметрів прокатування

Середнє значення межі текучості в зоні деформування залежить від конкретних умов прокатування:

$$\sigma_m = 1,15 \cdot \sigma_o \cdot \kappa_t \cdot \kappa_u \cdot \kappa_l,$$

де σ_o – базисне значення межі текучості; $\sigma_o = 86 \text{ МПа}$;

κ_t , κ_u , κ_l – термомеханічні коефіцієнти, які враховують, відповідно, t° , ступінь деформації і швидкість деформації [16,17], $\kappa_t = 1,35$; $\kappa_u = 0,55$; $\kappa_l = 0,95$.

Таблиця 7.5 – Геометричні параметри осередку деформації

№ проходу	α_H	γ_H	S_H	h_{epH}	ε_H	$\ell_{\partial H}$	$\ell_{\partial H}$	V_H	U_B
	α_B	γ_B	S_B	h_{epB}	ε_B	$\ell_{\partial B}$	$\ell_{\partial B}$	V_B	U_H
1	16,8	0,078	0,0047	754,5	0,066	169,5	0,22	2,009	0,77
	19	0,079	0,0081	1574,8	0,031	150	0,095	2,0036	0,41
2	16,8	0,085	0,0061	704,2	0,07	169,5	0,24	2,012	0,82
3	16,8	0,085	0,0065	654,2	0,076	169,5	0,26	2,013	0,89
	17	0,085	0,002	1549,8	0,025	134,1	0,086	2,004	0,371
4	16,8	0,092	0,0083	604,4	0,082	169,5	0,28	2,016	0,96
5	16,8	0,084	0,0076	554,4	0,09	169,5	0,30	2,015	1,06
	17	0,093	0,0025	1529,8	0,026	134,1	0,087	2,005	0,38
6	16,8	0,085	0,0086	504,3	0,099	169,5	0,33	2,017	1,16
7	16,8	0,086	0,0098	454,2	0,110	169,5	0,37	2,019	1,29
	17	0,085	0,0021	1509,8	0,026	134,1	0,088	2,004	0,38
8	16,8	0,083	0,0104	404,2	0,123	169,5	0,41	2,02	1,45
9	16,8	0,085	0,0125	354,1	0,141	169,5	0,47	2,025	1,65
	17	0,084	0,0021	1469,8	0,026	134,1	0,09	2,005	0,38
10	16,8	0,092	0,0173	303,9	0,164	169,5	0,55	2,034	1,53
11	16,8	0,147	0,054	253,7	0,197	169,5	0,66	2,108	2,32
	17	0,092	0,0025	1449,8	0,027	134,5	0,091	2,005	0,4
12	16,8	0,147	0,069	203,4	0,245	169,5	0,83	2,138	2,89
13	10,6	0,186	0,124	169,7	0,117	107,2	0,63	2,248	2,18
	17	0,094	0,0027	1449,8	0,027	134,1	0,092	2,005	0,4
14	10,6	0,14	0,08	149,6	0,133	107,2	0,71	2,16	2,48
15									
	17	0,096	0,0028	1419,8	0,028	134,1	0,094	2,005	0,41

Середнє значення контактного тиску:

$$P_{ep} = \sigma_{\tau} \cdot 0,5 \left(\frac{\ell_{\partial i}}{h_{cpi}} + \frac{\ell_{\partial i}}{\ell_{cpi}} \right),$$

де ℓ_{∂} – довжина осередку деформації;

h_{cpi} – середнє значення товщини розкату (таблиця 7.5).

Зусилля прокатування

$$P = P_{cp} \cdot \ell_{\partial} \cdot \sigma_i,$$

де P_{cp} – середнє значення контактного тиску, МПа;

$\ell_{\partial i}$ – довжина зони деформації, м;

σ_i – ширина розкату, м.

Момент прокатування визначаємо за формулою:

$$M_{np} = 2 \cdot P \cdot \psi \cdot \ell_{\partial i},$$

де ψ – коефіцієнт плеча прикладання зусилля прокатування.

Приймаємо ($\psi \approx 0,43 \div 0,5$); $\psi = 0,5$ [1,2,10].

Дані розрахунків зведені в таблицю 7.6.

Наведені результати розрахунків свідчать про те, що електродвигуни не перевантажуються:

Таблиця 7.6 – Енергосилові параметри прокатування

№ проходу	$\sigma_{ти}$ МПа	$\sigma_{те}$ МПа	$P_{сри}$ МПа	$P_{сre}$ МПа	$P_{и}$ МПа	$P_{е}$ МПа	$M_{ри}$ кНм	$M_{ре}$ кНм
1	69,7	69,7	166	370,1	43,6	43,3	7,39	6,4
2	76,1		167,6		44,3		7,5	
3	76,1	76,1	156,2	445,7	41,5	40,6	7,03	5,44
4	74,4		143,2		37,3		6,32	
5	74,4	74,4	135,1	430,8	35,4	33,5	6,00	4,49
6	70,4		118,2		30,4		5,15	
7	75,2	75,2	115,1	430,5	29,9	27,7	5,06	3,71
8	71		101,1		25,7		4,35	
9	71	71	92,2	397,6	23,5	20,2	3,98	2,7
10	78,8		93,3		23,4		3,96	
11	74,1	74,1	80,5	410,1	23,4	15,3	3,44	2,05
12	75,6		76,9		20,3		3,22	
13	71,6	75,6	79,3	414,3	19	10	1,32	1,34
14	65,2		69		12,4		1,13	
15		69,4		372,4	10,6	6,9		0,92

Перевірка валків на міцність

Перевірочний розрахунок полягає у визначенні максимально діючого зусилля у валках (таблиця 7.6) і порівнянні його з можливим, яке визначається матеріалом валка та його геометричними параметрами, тобто

$$P_d < [P],$$

де

$$[P] = \frac{0,4 \cdot D^3 [\sigma_{32}]}{L_\phi + l_{ш} - 0,5 \cdot B},$$

де D – діаметр бочки валка, мінімальний, м; $D = 1100$ мм;

$[\sigma_{32}]$ – допустима межа на згинання, для сталі **50XH** (матеріал валків) $[\sigma_{32}] = 140$ МПа;

L_ϕ – довжина робочої зони валка, м; $L_\phi = 1900$ мм;

$l_{ш}$ – довжина шийки валка, м;

$l_{ш} = (1,0 \div 1,5)D$; приймаємо $l_{ш} = 1100$ мм;

B – ширина сляба, м; $B = 1400$ мм.

$$[P]_n = \frac{0,4 \cdot 1,1^3 \cdot 140}{1,9 + 1,1 - 0,5 \cdot 1,4} = 50 \text{ МН}.$$

Для вертикальних валків

$$D = 810 \text{ мм}; L_\phi = 1900 \text{ мм}; l_{ш} = 900 \text{ мм}; B = 780 \text{ мм}.$$

$$[p]_e = 0,4 \cdot 0,81^3 \cdot 140 / 1,9 + 0,9 - 0,5 \cdot 0,78 = 49 \text{ МН}.$$

Перевірка міцності валків по шийкам

$$P_{ш} = \frac{0,4 d_{ш}^3 \cdot \sigma}{\sqrt{\ell_{ш} + R \cdot \Delta h}},$$

де $d_{ш} = (0,6 \div 0,75)D_\phi$ – діаметр шийки валка.

Приймаємо $d_{\text{ин}}=0,6 \text{ м}$; $d_{\text{инв}}=0,54 \text{ м}$. Тоді

$$[P_n]_{\text{ин}} = \frac{0,4 \cdot 0,6^3 \cdot 140}{\sqrt{1,1 + 0,575 \cdot 167,6}} = 117,8 \text{ МН},$$

$$[P_{\text{с}}]_{\text{ин}} = \frac{0,4 \cdot 0,54^3 \cdot 140}{\sqrt{1,1 + 0,45 \cdot 131,2}} = 83,8 \text{ МН}.$$

Порівняння вказаних даних і табличних значень (таблиця 7.6), показують, що технологічні зусилля менші допустимих. Отже, режими вибрані правильно.

7.2 Розробка режимів прокатування гарячекатаної смуги

Розрахувати режими прокатування гарячекатаної смуги перерізом $1,8 \cdot 1400 \text{ мм}$, масою $7,5 \text{ т}$ зі сталі $1X13$ ($C=0,1\%$, $Si=0,6\%$; $Mg=0,6\%$; $Gr=12\%$) на стані *ГПТЛ 1700*.

Стан складається з двох груп клітей – чорнової в складі Дуо – окалиноломач, чотирьох робочих кварто, і трьох вертикальних, розташованих між робочими. Чистова група складається з чистового окалиноломача (дуо) і шести клітей кварто [2,10,13].

Згідно з [1,11,14] технологією прокатування на безперервних станах ГПТЛ розробляють окремо для чорнової і чистової груп клітей, виходячи з того, що підкат для чистової групи повинен, з метою спрощення налагодження стану і керованості процесом, мати товщину $20 \div 30 \text{ мм}$.

Оскільки задана маса готового рулону, то маса слябу буде дорівнювати

$$G_{\text{сл}} = G_{\text{рул}} \cdot m,$$

де m – коефіцієнт фабрикації, $m=1,08$ [11], отже

$$G_{\text{сл}} = 7,5 \cdot 1,08 = 8,1 \text{ т}.$$

Об'єм слябу:

$$V_{cl} = G_{cl} / \rho,$$

де ρ – питома вага сталі 1Х13 $\rho=7,9\text{т/м}^3$:

$$V_{cl} = 8,1/7,9 = 1,02\text{ м}^3.$$

Якщо прийняти товщину підкату перед чистовою групою 20 мм і рекомендації в [11] абсолютних обтискувань в чорнових клітках за схемою 22–40–22–21–12, то товщина слябу, буде дорівнювати

$$H_{cl}=117+20=137\text{ мм}, \text{ приймаємо } H_{cl}=140\text{ мм}.$$

Довжина слябу буде дорівнювати:

$$L_{cl} = \frac{V_{cl}}{H_{cl} \cdot B_{cp}} = \frac{1,02}{0,14 \cdot 1,4} = 5,2\text{ м}.$$

Таким чином сляб має наступні параметри:

$$G_{cl}=8,1\text{ т}, L_{cl}=5,2\text{ м}, B_{cl}=1,4\text{ м}, H_{cl}=0,14\text{ м}.$$

Можливі і інші варіанти розподілу обтискувань в чорновій групі клітей.

Вище розглянута чорнова група з послідовним режимом прокатування, тому методи розрахунків можуть бути аналогічними тим, які наведені в додатку 1.

Розділимо чорнову групу на дві безперервні групи:

$$1 - \text{Дуго-окалиноломач, № 1, 2} - \text{кліті 2, 3, 4.}$$

Температурний режим прокатування в чорновій групі беремо в межах

$$1060^{\circ} < t^{\circ} < 1220^{\circ}\text{C}.$$

Температуру розкату в кожній з клітей беремо опосередковано:

Дуо - 1195°C; №1 - 1190°C; №2 - 1180°C; №3 - 1150°C; №4 - 1120°C.

Коефіцієнт тертя визначаємо у відповідності з формулою Целікова

$$f=1,05 - 0,005t - 0,056V,$$

де V – швидкість прокатування, м/с.

Середні значення швидкостей прокатування в м/с, згідно з характеристикою стана дорівнюють (див. додатки):

Дуо – 0,67; №1 – 1,02; №2 – 1,04; №3 – 1,72; №4 – 2,75.

Обчислені значення коефіцієнта тертя наведені в таблиці 7.7.

Максимальне значення кута захоплення, обумовлене коефіцієнтом тертя буде дорівнювати

$$\alpha = \arctg f.$$

Максимально допустиме значення обтискування, обумовлене кутом захвату, дорівнює:

$$\Delta h_{\max} = \alpha^2 \cdot R_p.$$

Якщо врахувати рекомендації [10,11,14] то відносні величини деформування можуть бути такими (максимально можливі):

0,25 – 0,37 – 0,4 – 0,4 – 0,4,

а абсолютні значення можуть бути обчислені:

$$\Delta h_{ip} = \Delta h_{\Sigma} \cdot \varepsilon_i.$$

Обчислені значення наведені в таблиці 7.7.

В чорновому окалиноломачі рекомендується $\varepsilon \approx 5\text{--}20\%$.
Приймаємо $\varepsilon_{до} = 16\%$, $\Delta h_0 = 22\text{ мм} < \Delta h_{max} < \Delta h_{ip}$.

В клітках зробимо такий розподіл обтискувань:

$$\varepsilon_1 = 34\%; \varepsilon_2 = 19\%; \varepsilon_3 = 18\%;$$

Тоді $\Delta h_1 = 40\text{ мм}$; $\Delta h_2 = 22\text{ мм}$; $\Delta h_3 = 21\text{ мм}$;

$$\Delta h_4 = \Delta h_{\Sigma} - \Delta h_1 - \Delta h_2 - \Delta h_3 = 137 - 22 - 40 - 22 - 21 = 12\text{ мм}.$$

Звідки:

$$\varepsilon_4 = \frac{\Delta h_4}{\Delta h_{\Sigma}} = \frac{12}{137} \approx 10\%.$$

Довжина розкату після кожної кліті:

$$L_i = \frac{V}{h_i B}.$$

Враховуючи постійність секундних об'ємів:

$$v_i b_i h_i = \text{const.}$$

Обчислимо швидкість по клітям.

Швидкість в кліті Дуо підстроюємо в залежності від кліті № 1, а кліті 3,4 – від кліті № 2.

Швидкість в кліті №1:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot R \cdot n}{30},$$

де R – радіус бочки валка, $R=405\text{ мм}$ [13];

n – кутова швидкість валка, $n=22,2\text{ об/хв}$ [13].

$$V_1 = \frac{3,14 \cdot 0,440 \cdot 22,2}{30} = 1,02 \text{ м/с.}$$

В кліті Дуо $v_3=0,67 \text{ м/с.}$

Аналогічно ведемо розрахунки і для другої підгрупи, зводячи розрахунки в таблиці 7.7. Скорегуємо знайдені значення швидкостей з врахуванням упередження за формулою Екелунда [1,5,11].

$$S = \frac{\gamma^2 \cdot d_i}{2 \cdot h_i} - 1,$$

де γ – нейтральний кут;

h_i – товщина розкату в проході.

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha_3}{2} - \frac{1 - \cos \alpha_q}{2f},$$

де α_θ – дійсний кут захвату метала валками,

$$\alpha_\theta = \sqrt{\frac{\Delta h_i}{R}}.$$

Радіуси валків: $R_0=405 \text{ мм}; R_1=440 \text{ мм}; R_2=390 \text{ мм}, R_3=290 \text{ мм}; R_4=290 \text{ мм.}$

Для підгрупи клітей Дуо - №1:

$$\alpha_\theta = \sqrt{\frac{22}{405}} = 0,233; \sin \gamma = \frac{\sin(0,233)}{2} - \frac{1 - \cos(0,233)}{2 \cdot 0,415} = 0,083;$$

$$S_1 = \frac{0,083 \cdot 0,810}{2 \cdot 0,115} - 1 = 0,02;$$

$$V = 0,67(1 + 0,02) = 0,69 \text{ м/с.}$$

У другій підгрупі

$$\alpha_3 = \sqrt{\frac{\Delta h i}{R_3}} = \sqrt{\frac{21}{290}} = 0,286 \text{ рад};$$

$$\alpha_4 = \sqrt{\frac{12}{290}} = 0,255 \text{ рад};$$

$$\sin \gamma_3 = 0,066; \sin \gamma_4 = 0,056;$$

$$S_3 = \frac{0,66^2 \cdot 0,58}{2 \cdot 0,032} - 1 = 0,04;$$

$$S_4 = \frac{0,56^2 \cdot 0,58}{2 \cdot 0,02} - 1 = 0,04;$$

$$v_3 = 1,72(1 + 0,04) = 1,79 \text{ м/с};$$

$$v_4 = 2,75(1 + 0,04) = 2,86 \text{ м/с}.$$

Розрахунок енергосилових параметрів режиму прокатування, як у чорновій групі клітей, так і в чистовій проводиться аналогічно прикладу 1.

Розрахунок температурного режиму прокатування проводимо тільки з врахуванням витрат тепла на випромінювання, або випромінювання і конвекцію, скориставшись формулою Іванцова [2].

$$\Delta t = T_o - \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{1000}{\left(\frac{T_o}{100}\right)^3 + 0,055 \frac{\tau}{h}}}},$$

де T_o – температура початку охолодження в градусах, К°;

τ – тривалість охолодження, С°;

h – товщина розкату.

Тривалість знаходження розкату в кліті:

$$\tau_i = \frac{L_i}{v_i}$$

Підставляючи отримані дані обчислюємо падіння температури по проходам.

Розрахунок абсолютних значень обтискування в чистовій групі клітей проводимо з врахуванням наступного:

- температура підкату не нижче 1050°C;
- температура кінця прокатування –950°C;
- потужність, що витрачається на прокатування у перших чотирьох клітях однакова, а в останніх двох складає 0,75N і 0,68N.

Величина абсолютної товщини підкату по клітям визначається за формулою Екелунда:

$$h_i = \frac{h_n \cdot h_k}{\left(v_i \cdot h_n^m + (1 - v_i) h_k^m\right)^{1/m}},$$

де h_i – товщина смуги на виході з i -тої кліті, мм;

h_n – товщина підкату перед чистовою групою, мм;

h_k – кінцева товщина смуги, мм;

v_1 – коефіцієнт завантаження клітей;

m – коефіцієнт, поправочний

$$m = 0,3 + \frac{0,21}{h_k} = 0,3 + \frac{0,21}{1,8} = 0,41.$$

Приймаємо

$$v_5=0,149; v_6=0,331; v_7=0,555; v_8=0,736; v_9=0,874; v_{10}=1.$$

Тоді будемо мати для кожної кліті, підставляючи дані у вище наведену залежність:

$$h_5=12,08 \text{ мм}; h_6=7,5 \text{ мм}; h_7=3,84 \text{ мм};$$

$$h_8=2,24 \text{ мм}; h_9=2,08 \text{ мм}; h_{10}=1,8 \text{ мм}.$$

Інші параметри режимів прокатування у чистовій групі обчислюємо аналогічно з вище наведеними розрахунками.

При обчисленні середнього значення контактного тиску у чистовій групі для врахування натягу смуги можна скористатись наступною залежністю:

$$P_{cpi} = P_{cp} \left(1 - \frac{q_o + q_i}{2P_{cp}} \right),$$

де q_o – передній натяг смуги, МПа;

q_i – задній натяг смуги, МПа;

P_{cp} – середнє значення контактного тиску, обчислене без врахування натягу, МПа.

В чистовій групі в 5-й кліті задній натяг відсутній, а передній незначний і ним можна знехтувати, а в інших клітках воно підлягає обчисленню. Згідно з рекомендаціями [1,11] приймемо наступні величини переднього і заднього натягів.

<i>Кліть</i>	6	7	8	9	10
$q_o, \text{МПа}$	1,7	4,3	5,2	9,4	4,6
$q_i, \text{МПа}$	4,3	5,2	9,4	4,6	0

Вибрані значення не перевищують рекомендованих значень

$$q = (0,2 \div 0,5) \sigma_T.$$

Параметри для прокатування, розраховані для чистової групи слід зводимо в таблицю 7.7 і аналізуємо отримані дані.

Таблиця 7.7 – Параметри прокатування по чорновим кліткам

№ кліті	Дуо	1	2	3	4
f	0,415	0,398	0,402	0,268	0,226
$\alpha_{max}, \text{рад}$	0,393	0,379	0,382	0,262	0,222
$\Delta h_{max}, \text{мм}$	62,55	63,20	56,91	22	14
$\Delta h'_{ip}, \text{мм}$	34,25	50,69	54,80	54,8	54,8
$\Delta h, \text{мм}$	22	40	22	21	12
$L_i, \text{м}$	6,11	9,4	13,2	21,85	35
$v_p, \text{м/с}$	0,67	1,02	1,04	1,72	2,75
τ_c	9,16	9,2	12,69	12,67	12,7
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	5,7	8,9	16,9	25,5	37,3

7.3 Розробка режимів прокатування холоднокатаної смуги

Обчислити режими прокатування смуги перерізом **1,0x1500** зі сталі **08Ю**, рулоном масою **10 т**.

Прокатування можна вести на п'ятиклітовому стані **1700**, у якого всі кліті кварто, з діаметром робочих валків $D_p = 600$ мм, опорних, $D_{on} = 1500$ мм, максимальна швидкість прокатування – **25 м/с**, довжина бочки валка – **1700 мм**, режим роботи – безперервний.

Сталь **08Ю** має наступний хімічний склад:

**$C - 0,17\%$; $Mn - 0,3\%$; $S - 0,05\%$; $Si - 0,17\%$; $Al - 0,05\%$;
 $P - 0,01\%$; $As - 0,08\%$.**

Товщину прокату обчислюємо згідно з залежністю:

$$h_n = \frac{h_k}{1 - \varepsilon_\Sigma},$$

де h_k – товщина готового прокату;

ε_Σ – сумарне значення величини відносного обтискування.

Згідно з [11] найкращі механічні властивості холоднокатаної сталі можна отримати при сумарному відносному обтискуванні $\approx 70\%$, тоді

$$h_n = \frac{1,0}{1 - 0,7} = 3,3 \text{ мм}.$$

При виборі схеми обтискувань по проходам будемо орієнтуватись на схему з послідовним зменшення відносного обтискування від першої до останньої клітей [11, ст.46]. Це забезпечить майже рівномірне завантаження клітей по зусиллю і витраченій потужності, оскільки зменшення обтискування, компенсує зростання контактного тиску в зв'язку із загартовуванням металу та зменшенням його товщини.

У відповідності з [1,10] приймаємо наступну схему прокатування:

$$3,30 - 2,55 - 1,90 - 1,40 - 1,09 - 1,00$$

Маючи ці дані неважко підрахувати значення абсолютних і відносних величин обтискування по клітям:

$$\Delta h_i = h_0 - h_i; \varepsilon_i = \frac{\Delta h_i}{h_0}.$$

Максимально можливий кут захоплення металу буде дорівнювати

$$\alpha_i = \arccos \left(1 - \frac{\Delta h_i}{D_{\min}} \right),$$

де $D_{\min}$ – мінімальний діаметр валка після переточення.

При холодному прокатуванні важливе значення має вибір мастила. Його використовують у суміші з водою (водна емульсія). Це дозволяє проводити змащування поверхонь контакту, вимивати механічні частки з зони деформування, виносити тепло, яке утворюється в осередку деформації. Одночасно це призводить до зменшення коефіцієнта тертя в межах від **0,04 до 0,08**, тобто максимально можливе значення кута тертя буде дорівнювати:

$$\alpha = \arctg \mu = 2,3^\circ \div 4,6^\circ.$$

Таким чином обчислені кути захвату не перевищують максимально можливих значень, які мають місце у випадку використання мастила – захват полоси буде здійснюватись стійко і без пробуксовування.

Оскільки швидкість прокатування регулюється, приймемо її **8,5 м/с**.

Отже, виходячи з рівності секундних об'ємів по клітям, обчислюємо швидкість в 1–4 клітях:

$$V_{cp} = \frac{V_{\kappa} - h_{\kappa}}{h_i}.$$

Дійсну швидкість обчислюємо по залежності [14]:

$$V_{\epsilon} = \frac{V_{ip}}{1,05}.$$

Визначимо коефіцієнт тертя при усталеному процесі прокатування згідно з залежністю [17,8]:

$$f_y = \frac{K_{cm} \cdot [1 + (0,4 + 0,01\epsilon) \cdot R_z]}{1 + 0,25 \cdot \sqrt{W_n} + 0,005 \cdot W_m} \cdot \left[0,007 - \frac{0,01V_i^2}{2 \cdot (1 + V_i) + 3 \cdot V^2} \right],$$

де K_{cm} – коефіцієнт, що враховує тип мастила (для емульсії $K_{cm}=1,4$);

ϵ – відносне обтискування

$R_z = 1,25 \text{ мм}$ – висота нерівностей на поверхні валків

W_m – кінематична в'язкість мастила, при 50°C $w_m=20 \text{ мм/с}$;

v_i – швидкість лінійна валка, м/с.

Підставляючи ці значення у формулу обчислюємо усталені коефіцієнти тертя і заносимо в таблицю 7.8.

Кут захвату металу валками при усталеному коефіцієнті тертя:

$$\alpha_{max} = 2 \cdot \arctg f_y.$$

Результати обчислень представлені в таблиці 7.8.

Збільшення ширини смуги по проходах обчислюємо за формулою Губкіна [2,8]:

$$\Delta b = \left(\frac{1 + \Delta h}{h} \right) \cdot \left(f_y \cdot \sqrt{R} \cdot \Delta h - \frac{\Delta h}{2} \right) \cdot \frac{\Delta h}{h},$$

де R – мінімальний радіус вала кліті, мм;

Δh – абсолютне значення обтискування, мм;

h – товщина підкату, м.

Обчислюємо для кожної з клітей і заносимо в таблицю 7.8.
Сумарне значення збільшення ширини смуги буде складати:

$$\Delta \epsilon_{\Sigma} = \sum \Delta \epsilon_i = 0,19 + 0,17 + 0,14 + 0,11 + 0,01 = 0,61 \text{ мм.}$$

Оскільки ця величина незначна, то в подальших розрахунках її можна не враховувати.

Середні значення відносного обтискування обчислюємо за формулою

$$\epsilon_{cp} = 0,4 \cdot \epsilon_{i-1} + 0,6 \epsilon_i.$$

Розрахунок енергосилових параметрів для холодного прокатування

Знаходимо середнє значення межі текучості з врахуванням загартування:

$$\sigma_{\tau_{cpi}} = \sigma_{тек} + A \cdot \sqrt{\epsilon_{cpi}},$$

де $\sigma_{тек}$ – початкове значення межі текучості для сталі **08Ю**,
 $\sigma_{тек} = 250 \text{ МПа}$;

A – емпіричний коефіцієнт, для сталі **08Ю** $A = 50$ [11].

Таблиця 7.8 - Кінематичні параметри холодного прокатування

№ кліті	1	2	3	4	5
$\Delta h_i, \text{мм}$	0,75	0,65	0,5	0,31	0,09
ϵ_i	22	25	26	22	8
$\alpha, \text{град}$	3°25'	3°02'	2°65'	2°09'	1°12'
$v_{ip}, \text{м/с}$	3,34	4,48	6,05	7,8	8,5
v_b	3,18	4,26	5,78	7,4	8
f_y	0,072	0,076	0,07	0,072	0,04
$\alpha_{y\max}$	8°23'	8°69'	8°	8°23'	4°34'
ΔB_i	0,19	0,17	0,14	0,11	0,01
$\epsilon_{cpi}, \%$	13,2	23,8	25,6	23,6	13,6

Підставляємо необхідні значення і результати обчислень заносимо у таблицю 7.9.

Обчислюємо межу текучості в осередку деформації з врахуванням схеми та швидкості деформації

$$\sigma_{mi}^* = \sigma_{mcp} k_{\ell} \cdot k_u,$$

де k_{ℓ} – коефіцієнт, який враховує схему навантаження, $k_{\ell}=1,2$ [16,17];

k_u – температурно-швидкісний поправочний коефіцієнт, $k_u=1,1-1,2$.

Обчислюємо межу текучості осередку деформації.

За формулою Зикова обчислюємо довжину (сплющену) осередку деформації:

$$\ell_{qi} = C_1 + \sqrt{\frac{R - \Delta h \cdot A_i}{A_i - B_i + C_1^2}},$$

де R – радіус валка;

A, B, C , - умовні параметри:

$$A_i = \frac{9500}{1,5\sigma_{\Sigma_i}},$$

$$B_i = \frac{2}{3} \cdot f_y \cdot \frac{D}{h_i}; \text{ тут } D=510 \text{ мм.}$$

$$C_i = \frac{R}{A_i} - B_i \cdot \left(1 - \frac{\Delta h_i}{3h_i}\right);$$

Обчислюючи допоміжні величини A, B, C і підставляючи їх у формулу для визначення ℓ_{∂} , знаходимо останню.

Обчислюємо значення середнього контактного тиску:

$$P'_{cp} = 1,15 \cdot \sigma_{\tau} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot f_y \cdot \ell_{di} - \Delta h i}{3 \cdot h i} \right).$$

Враховуємо натяг, який штучно створюємо для якісного прокатування:

$$P_{cp} = P'_{cp} \cdot \left(1 - \frac{q_o + q_i}{2 \cdot P_{cp}} \right),$$

де $(q_o + q_i)$ – величина натягу між клітями [11].

Натяг перед першою і після останньої кліті утворюється за рахунок моталок. Маємо по клітям:

$$1 \ (q_o + q_i)_1 = 200 \text{ МПа};$$

$$2 \ (q_o + q_i)_2 = 180 \text{ МПа};$$

$$3 \ (q_o + q_i)_3 = 160 \text{ МПа};$$

$$4 \ (q_o + q_i)_4 = 140 \text{ МПа};$$

$$5 \ (q_o + q_i)_5 = 100 \text{ Мпа}.$$

Маючи всі необхідні величини обчислюємо діючий середній питомий тиск на валках.

За вищенаведеними залежностями обчислюємо зусилля прокатування.

При обчисленні моменту прокатування скористаємось залежністю для обчислення коефіцієнта плеча

$$\psi = 0,294 - 0,525 \cdot \frac{\ell_{зк}}{\ell_{\partial i}},$$

де $\ell_{зк}$ – частина дуги, яка знаходиться за вісевою лінією валків:

$$\ell_{зк} = m \cdot R \cdot P_{ср},$$

де $m=1,12 \cdot 10^5 \cdot \text{МПа}$ – коефіцієнт механічних властивостей валків;

$R=255 \text{ мм}$ – радіус бочки валка.

Обчислюємо цю величину і коефіцієнт плеча.

Обчислюємо момент прокатування в кожній кліті, за вищенаведеною залежністю.

Момент сил тертя в підшипниках опорних валків приведений до робочого обчислюємо за формулою

$$M_{мрор} = P_i \cdot f_i \cdot d_{он} \cdot \frac{D}{D_{он}},$$

де f – коефіцієнт тертя в опорах, $f=0,03$;

$d_{он}$ – діаметр шийки опорного валка,

$D, D_{он}$ – діаметр бочки, робочого і опорного валків, відповідно характеристики стану (див. додаток А).

Обчислюємо момент додаткових сил тертя в передавальних механізмах головних ліній клітей та моменти холостого ходу механізмів головної лінії:

$$M_{мрq} = \left[\frac{1}{\eta_{\Sigma}} - 1 \right] \cdot (M_{кр} + M_{крl}),$$

де η_{Σ} – сумарний к.к.д. головної лінії.

Кожен з робочих валків має індивідуальний привод від двигуна через шестеренну кліть і універсальний шпindel. Тоді

$$\eta_{\Sigma} = \eta_{шк} \cdot \eta_{шп},$$

де $\eta_{шк} = 0,92 \div 0,95$;

$\eta_{шп} = 0,99$.

$$\eta \Sigma = 0,95 \cdot 0,99 = 0,941.$$

Підставляємо відповідні дані у вищенаведену залежність для визначення додаткового моменту тертя.

Обчислюємо значення моменту холостого ходу по клітям:

$$M_{x\kappa i} = 0,05 M_x,$$

тут, згідно з [1,2]:

$$M_{x1} = 290 \text{ кНм}; M_{x2} = 250 \text{ кНм}; M_{x3} = 200 \text{ кНм},$$

$$M_{x4} = 150 \text{ кНм}; M_{x5} = 160 \text{ кНм}.$$

Обчислюємо момент на валу двигуна:

$$M_{da} = \frac{\Sigma M_i}{i},$$

де i – передавальне число від двигуна до валків ($i = 1$);

Обчислюємо споживну потужність двигунів з врахуванням *к.к.д.*

$$N_q = \frac{M_q \cdot V}{\eta_\Sigma \cdot R},$$

де M_q – момент двигуна;

V – лінійна швидкість;

R – радіус валка.

Номінальне значення потужності електродвигунів для всіх клітей:

$$N_{n1} = N_{n2} = N_{n5} = 4420 \text{ кВт}.$$

Коефіцієнт перевантаження дорівнює:

$$K_{nep} = \frac{N_q}{N_n}.$$

Результати обчислень зводимо у таблицю 7.9.

Таблиця 7.9 – Енергосилові параметри холодного прокатування

№ кліті	2	3	4	5	6
$\sigma_{т\text{ср}i} \text{ МПа}$	431,65	493,92	502,98	492,89	434,39
$\sigma_{\tau c}^* \text{ МПа}$	621,6	711,2	724,2	709,2	625,5
$\ell_{\delta i} \text{ мм}$	16,01	15,58	14,21	12,04	7,04
$p'_{ср} \text{ МПа}$	860,1	1064,4	1128,1	1171,5	832,7
$p_{ср} \text{ МПа}$	760,1	974,4	1048,1	1101,5	787,7
$P \text{ МН}$	18,254	22,772	24,472	19,893	8,265
$\ell_{зс.мм}$	2,1	2,8	2,9	3,2	2,2
Ψ_i	0,22	0,19	0,18	0,15	0,12
$M_{тр} \text{ кНм}$	128,5	141,1	125,1	75,6	15,0
$M_{трон} \text{ кНм}$	13,9	17,4	18,7	15,2	6,3
$M_{тс\delta} \text{ кНм}$	8,82	9,2	8,91	5,6	1,32
$M_{x1} \text{ кНм}$	14,5	12,5	10	7,5	8
$M_{\delta i} \text{ кНм}$	165,72	180,8	162,7	103,9	30,6
$N, \text{ кВт}$	240,74	3519,9	4512,7	3513,3	1118,6
$K_{нер}$	0,544	0,79	1,02	0,79	0,25

Аналіз результатів розрахунків, зведених у таблиці 7.9, показує, що прийняті режими обтискування, швидкостей обумовлюють нормальний режим роботи головних ліній клітей у випадку прокатування смуги перерізом **1,0x1500** з підкату товщиною **3,3 мм**, шириною **1500мм**.

Розрахунки валків на міцність проводимо так як і в додатку А, з врахуванням того, що робочі валки працюють на скручування, а опорні – на згинання.

Крім того робочі валки слід перевірити на контактну міцність:

$$p_{\text{конт}} \leq [\sigma_{\text{конт}}].$$

Матеріал робочих валків – сталь **9ХФ**.

У відповідності з [15, табл. 51] найбільші контактні напруження можна визначити за видозміненою формулою Беляєва–Герца:

при $R_1 = R_2 = R$	$\sigma_{max} = 0,792 \sqrt{\frac{\frac{p}{lR}}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}}}$
при $E_1 = E_2 = E; \mu_1 = \mu_2 = 0,3$	$\sigma_{max} = 0,412 \sqrt{\frac{PE}{\ell} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2}}$
при $R_1 = R_2 = R$	$\sigma_{max} = 0,591 \sqrt{\frac{PE}{\ell R}}$

де P – максимальне зусилля прокатування;

E – модуль пружності;

ℓ – ширина розкату;

R – радіус робочого валка.

ЛІТЕРАТУРА

1. Беняковский М.А., Богоявленский К.Н., Виткин А.И. и др. Технология прокатного производства. В 2-х книгах. Справочник: М., "Металургия". 1991г. – 863 с.
2. Коновалов Ю.В., Налча Г.И., Савранский К.Н. Справочник прокатчика. М., "Металургия". 1977г. – 312 с.
3. Литовченко Н.В. Станы и технология прокатки листовой стали М. "Металургия", 1979г. – 272 с.
4. Нагрев слэбов и прокатка полос на непрерывном тонколистовом стане горячей прокатки 2000. Технологическая инструкция ТИ. 226 – П.Г.Л – 01 – 94.
5. Технология прокатного производства . Под ред. В.И.Зюзина, А.В.Третьякова. М., «Металургия», 1991г. – 432 с
6. Целиков А.И., Ленков А.В., Теория прокатки. Справочник М., «Металургия», 1962г. – 324 с.
7. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. М. "Металургия", 1964г. – 542 с.
8. Целиков А.И., Никитина Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. М. "Металургия", 1980г. – 320 с., Учебник для студентов машиностроительных и металлургических вузов.
9. Целиков А.И. Механизмы прокатных станов. М. "Металургия", 1953г. – 460 с.
10. Сафьян М.М. Прокатка широкополосной стали. М. "Металургия", 1969г. – 460 с.
11. Грудев А.П., Машкин Л.Ф., Ханин М.И., Технология прокатного производства. М. "Металургия", 1994г. – 651 с.
12. Динник А.А. Теория прокатки М., "Металургия", 1982г. – 466 с.
13. Кричевский Я.М. Прокатные станы. Номенклатурный справочник М., "Металургия", 1973г. – 346 с.
14. Диомидов Б.Б., Литовченко Н.В. Технология прокатного производства. М., "Металургия", 1979г. – 432 с.
15. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев, "Наукова думка", 1975. – 704 с.
16. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И., Третьяков А.В., Никитин Г.С., Теория прокатки. Справочник. М., "Металургия", 1982г. – 335 с.

Додаток А

Технічні характеристики деяких станів

Стани для гарячого прокатування

Стан 2800

№ кліті	1	2	3
Діаметр валків в мм: робочих опорних	1000 -	1150 -	800 1400
Довжина бочки валків, мм	600	2800	2800
Потужність двигуна, кВт	883	2574	5516
Частота обертання, об/хв.	150-350	0-30-60	0-60-120
Швидкість прокатування, м/с	1,21-3,0	2,35-4,7	2,51-5,02

Стан 3600

№ кліті	1 (реверс)	2 (реверс)	3 (вертик)
Діаметр валків в мм: робочих опорних	1130 1800	1030 1800	900 -
Довжина бочки валка, мм	3600	3600	400
Потужність двигуна, кВт	2x6920	2x8800	-
Частота обертання, об/хв.	0-40-80	0-70-140	-
Швидкість прокатування, м/с	4,4	6,0	-

Тонколистовий стан 2500

Параметри	Діаметр валків, мм	Частота обертання двигуна, об/хв.	Потужність двигуна, кВт	Частота обертання валка, об/хв.
№ кліті				
1	1100	428	4600	17,4
2	900	428	4600	36,3
3	900	428	4600	45
4	900	428	4600	45
5	900	500÷1000	5000	65-150
6	700	500÷1000	5000	125-200
7	700	500÷1000	5000	200-245
8	700	500÷1000	5000	250-275
9	700	500÷1000	5000	250-385
10	700	500÷1000	5000	250-410

Слябінг 1150

Діаметр бочки горизонтальних валків, мм	1150
Довжина бочки горизонтальних валків, мм	2300
Діаметр бочки вертикальних валків, мм	700
Довжина бочки вертикальних валків, мм	1950
Потужність двигунів горизонтальних валків, кВт	2x5000
Потужність двигунів вертикальних валків, кВт	2x2000
Швидкість прокатування, м/с (максимальна)	4.8

Широкосмуговий стан 1700**Чорнова група**

Діаметр валків вертикального окалиноломача, мм	1000
Діаметр валків горизонтального окалиноломача, мм	1000
Довжина валків вертикального окалиноломача, мм	700
Довжина валків горизонтального окалиноломача, мм	1700
Потужність електродвигунів в кожній чорновій кліті	4600
Кількість клітей в чорновій групі	4

Чистова група

Число клітей	7
Діаметр валків: робочих валків, мм	7x700
опорних валків, мм	7x1400
Потужність двигунів, кВт	7x6000
Максимальна швидкість прокатування стана, м/с	15

Широкосмуговий стан 2000**Чорнова група**

Кількість клітей	6
Діаметр валків вертикального окалиноломача, мм	1200
Довжина валків горизонтального окалиноломача, мм	3000
Діаметр валка розширювальної кліті, мм	1200
Довжина бочки розширювального валка, мм	2000
Кількість універсальних клітей	4
Діаметр валків універсальних клітей в мм:	
робочих	1200
опорних	1600
Довжина валків робочих клітей, мм	2000

Чистова група

Кількість клітей	8
Діаметр бочки валка горизонтального окапиноломача, мм	800
Довжина бочки валка горизонтального окапиноломача, мм	2000
Довжина бочки робочих валків чистової групи, мм	2000
Діаметр валків чистової групи в мм:	
робочих	800
опорних	1600

Технічні характеристики 20-ти валкового стану 1700

Назва валків і їх кількість	Розміри валків, мм			
	Діаметр бочки max/min	Довжина бочки	Довжина валків	Довжина шийки
Робочі-2	140 або 130/108	1728	1728	-
Перші проміжні-4	162 або 145/128	1792	1818	-
Другі проміжні неприводні-2	247/231	1714	2204	110
Другі проміжні приводні-4*	241/225	1714	2017	110
Опорні підшипники-48	406,7	227,08	-	-

* - матеріал приводних валків сталь 9Х2МФ.

Електродвигуни валків N = 2 x 2250 к.с. (6120 кВт) з обертами 275/550 об/хв.

Сортамент стану: гарячекатані рулони $H_0 \times B_0 = 3,0...4,0 \times 900...1250$ мм,
холоднокатані штаби $h \times b = 0,7...2,5 \times 900...1250$ мм.

Технічні характеристики реверсивного стану 1200

Валки	Розміри валків, мм			
	Бочка		Шийка	
	Діаметр max/min	Довжина	Діаметр	Довжина
Робочі	430/400	1220	220	480
Опорні	1300/1220	1220	Конус 800x658	1040

Електродвигун валків: N = 3900 кВт; n * 320/570 об/хв;

швидкість прокатування: 0,5...4,0 м/с;

Сортамент стану: гарячекатані рулони $H_0 \times B_0 = 2,0...3,5 \times 850...1030$ мм,
холоднокатані штаби $h \times b = 0,5...2,0 \times 850...1030$ мм.

Матеріал валків: робочих - сталь 9ХФ; опорних - сталь 9Х2МФ.

Технічна характеристика стану 2800

Валки	Розміри валків				Матеріал сталь
	Бочка		Шийка		
	Діаметр max/min	Довжина	Діаметр	Довжина	
Робочі	570/534	2800	300	525	9Х2МФ
Опорні	1600/1500	2800	1050 конус 1:5	1100	9ХФ

Електродвигун валків: $N = 2940$ кВт; $n = 40...80$ об/хв;

Швидкість прокатування: $0,5...2,0$ м/с;

Мкртах (1^{10} шпинделя) = 350 кНм.

Сортамент стану: багато леговані сталі.

Заготівка: $H_0 \times B_0 \times L_0 = 2,7...10 \times 1500...2550 \times 2550$ мм,

листи $h \times b \times l = 1,5...5,0 \times 1500...2550 \times 4500$ мм.

Технічна характеристика реверсивного стану 1680

Валки	Розміри валків, мм				Матеріал валків
	Бочка		Шийка		
	Діаметр max/min	Довжина	Діаметр	Довжина	
Робочі	510/460	1680	260	250	9Х2МФ
Опорні	1420/1370	1760	Конус 890/734	760	9ХФ

Електродвигун валків: $N = 2250$ к.с. (3060 кВт); $n = 300...600$ об/хв;

Передавальне число редуктора комбінованого з шестерінчастою кліттю $i=3,21$;

Оберти валків $n = 93,5...187$ об/хв;

Швидкість прокатування: $0,5...4,75$ м/с;

Сортамент стану: леговані сталі.

гарячекатані рулони: $H_0 \times B_0 = 2,0...3,8 \times 1000...1500$ мм.

холоднокатані штаби: $h \times b = 0,5...2,0 \times 1000...1500$ мм.

**Технічна характеристика та головні параметри
гарячого прокатування на БШШС 1700
Маріупольського заводу (без віпсоламачів)**

№ клітей і їх тип	Діаметри бочок валків, мм робочих	Швидкість прокатув., м/с	Відстань поміж клітями м	Макс. допустимий обтиск, [ε]	Допустимі зусилля, мН моменти, кМ м	Потужність двигунів, кВт
	опорних					
1Кb*	950...900	1,25	10,5	30	25 150	4000
	1350... 1250					
2кв	950...900	1,25	18,6	35	25 150	4000
	1350... 1250					
3кв	850. 800	2,27	22,98	30	25 110	400
	1250... 1170					
4кв	850 .800	2,27	35,42	35	25 110	4000
	1250. 1170					
5кв	850... 800	2,8	53,0	40	25 90	4000
	1250... 1170					
6 кв**	650...615	1,32...2,5	105,72	50	20 85	5000
	1300... 1280					
7кв	650. 615	1,9... 3,6	5,8	50	20 70	5000
	1300... 1280					
8кв	650...615	3,75... 8,15	5,8	45	20 70	7000
	1300... 1280					
9кв	650...615	3,75... 8,15	5,8	40	20 70	500
	1300... 1280					
10кв	650... 615	5,95... 9,5	5,8	30	20 70	7000
	1300... 1280					
11 кв	650, .6, J5	5,95... 9,5	5,8	20	20 70	5000
	1300... 1280					

*- 1... 5 - кліті чорнової групи;

** - 6... 11 - кліті чистової групи.

Технічна характеристика та деякі параметри гарячого прокатування на БШС 1680 заводу “Запоріжсталь”

№ клітей і їх тип	$\frac{D_0 \times L_0}{D_0 \times L_0}$ мм	$\frac{d_0}{d_0}$ мм	$[\varepsilon]$	%	Передаточне число редуктора	Номинальна потужність, кВт	Відстань між клітьми, м	Швидкість прокатування, м/с	Оберти ЄЛ, ДВ. об/хв
			$B \leq 1200 \text{ мм}$	$B = 1250 \dots 1500 \text{ мм}$					
1Д*	900x1680	620			23,99	1840		0,99	500
2КВУ	940x2440	660	37	35	19,26	5400	6,25	1,09	428
	1320x244	750							
3КВУ	850x1680	480	40	37	19,58	3700	21,0	1,13	500
	1240x168	650							
4КВУ	620x1680	395	40	37	10,15	3700	10,1	1,57	500
	1240x168	650							
5КВУ	620x1680	395	40	37	7,36	3700	25,49	2,17	500
	1240x168	650							
6КВ**	620x1680	395	50	45	7,24	5000	58,77	2,2	500
	1240x168	650							
7КВ	620x1680	395	50	45	4,67	5000	5,84	3,42	500
	1240x168	650							
8КВ	620x1680	395	40	35	2,75	5000	5,84	5,78	500
	1240x168	650							
9КВ	620x1680	395	40	35	2,0	5000	5,84	7,93	500
	1240x168	650							
10КВ	620x1680	395	25	25	1,56	5000	5,84	10,14	500
	1240x168	650							
11КВ	620x1680	395	15	15	1,41	5000	5,84	11,25	500
	1240x168	650							

*- 1...5 - чорнові кліті;

** - 6... 11 - кліті чистової групи.

В табл. ДІ, ДІА, ДІБ прийняті скорочення:

ВПЛГ і ВПЛВ - віпсаламач відповідно горизонтальний чи вертикальний;

D - дуо; KB - кварто; P - реверсивна; Y - універсальна;

D_p і L_p - діаметр і довжина бочок відповідно робочих (р) і опорних (о) валків;

d і l - діаметр і довжина шийок валків;

ε - відносний обтиск; B - ширина штаб.

**Розміри шийок листових валків станів Дуо та Кварто
на підшипниках кочення (циліндричні шийки) і ПРТ
(конічні шийки)**

D*	Циліндричні шийки					Конічні шийки			
	d ₁	l ₁	r	d ₂	l ₂	d	l	l	l
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
250	170 190	190 210	20 20	140 150	200 280				
300	21 230	230 250	20 25	150 160 170	280 320 320	170	160	45	10
350	250 270	270 290	25 30	180 200	350 370	190 220	190 210	45 50	10 10
400	290	320	30	200 220	370 400	240	230	55	10
450	310 330	340 360	35 35	240 260	430 460	260 280	240 250	60 65	12 12
500	350	380	40	250 280	460 460	310	270	70	12
550	380 400	420 440	40 40	300 320	460 460	350	300	80	16
600	430 460	470 510	45 50	320 340	460 460	350	300	80	16
650	460 500	510 550	50 50	340 360	460 500	390	340	90	16
700	500 530	550 590	50 55	360 380	500 500	430	380	100	16
750	530 560	590 620	55 55	380 400 420	500 530 530	430 480	380 420	100 110	16 16
800	560 600	620 660	55 60	420 440 460	530 530 530	480	420	110	16
850	600 640	660 700	60 65	460 480 500	530 530 530	530	450	110	16
900	640	700	65	500 530	530 530	570	490	110	16
950	690	760	75	530 560	530 560	570	490	110	16

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1000	690	760	75	530 560 600	560 560 560	630	540	110	16
1150	690	760	75	600 630	560 600	710 760	600 640	120 120	20 20

Стани для холодного прокатування

Стан 2-клітевий 1200, кварто:

1. Діаметр робочого валка, мм – 500.
2. Діаметр опорного валка, мм – 1320.
3. Довжина бочки валків, мм 1200.
4. Потужність електродвигунів, кВт - 4x180.
5. Частота обертання, об/хв – 750 – 1000.
6. Швидкість прокатування, м/с – 24,5.

Стан триклітевий 1450, кварто:

- Діаметр робочого валка, мм – 450.
- Діаметр опорного валка, мм – 1130.
- Довжина бочки валка, мм – 1450.
- Потужність електродвигунів, кВт – 1470.
- Частота обертання, об/хв – 62,8-232,6.
- Швидкість прокатування, м/с – 2,74-5,27.

Чотириклітевий стан, кварто 2500:

- Діаметр робочих валків, мм – 500.
- Діаметр опорних валків, мм – 1500.
- Довжина бочки валків, мм – 2500.
- Потужність електродвигунів, кВт – 2x2800.
- Частота обертання, об/хв – 300x500.
- Швидкість прокатування, м/с – 21.

П'ятиклітевий стан 1200, кварто:

- Діаметр робочого валка, мм – 500.
- Діаметр опорного валка, мм – 1340.
- Потужність електродвигунів, кВт – 2200; 2x1600; 2x1600; 2x2200.
- Частота обертання, об/хв – 125 – 780.
- Швидкість прокатування, м/с – 17,3-28,2.

- Товщина прокату, мм – 0,2-0,36.
- Ширина прокату, мм – 1050.
- Маса рулону, т – 15.
-

Двадцятивалковий стан 1200:

- Діаметр робочих валків, мм – 55.
- Діаметр опорних валків, мм
 - 1 ряд – 10;
 - 2 ряд – 175;
 - 3 ряд – 300.
- Довжина бочки валків, мм – 1200.
- Потужність електродвигуна – 2620 кВт.
- Швидкість прокатування, м/с – 5 – 10.
- Товщина прокату, мм – 0,1.

Стан чотириклітєвий 1700:

- Діаметр робочого валка, мм – 500.
- Діаметр опорного валка, мм – 1300.
- Довжина бочки валка, мм – 1700.
- Потужність електродвигунів, кВт – 2200.
- Швидкість прокатування, м/с – 25.
- Товщина прокату, мм – 0,4 – 2,0.

П'ятиклітєвий стан 1700:

1. Діаметр робочого валка, мм – 600.
2. Діаметр опорного валка, мм – 1500.
3. Довжина бочки валка, мм – 1700.
4. Потужність електродвигунів, кВт – 8840.
5. Швидкість прокатування, м/с – 25.
6. Товщина прокату, мм – 0,4 – 3,5.

П'ятиклітєвий стан 2030:

1. Діаметр робочого валка, мм – 615.
2. Діаметр опорного валка, мм – 1600.
3. Довжина бочки валка, мм – 2030.
4. Потужність електродвигунів, кВт – 10800.
5. Швидкість прокатування, м/с – 31,4.
6. Товщина прокату, мм – 0,4.

Додаток Б **Рисунки до виконання завдань**

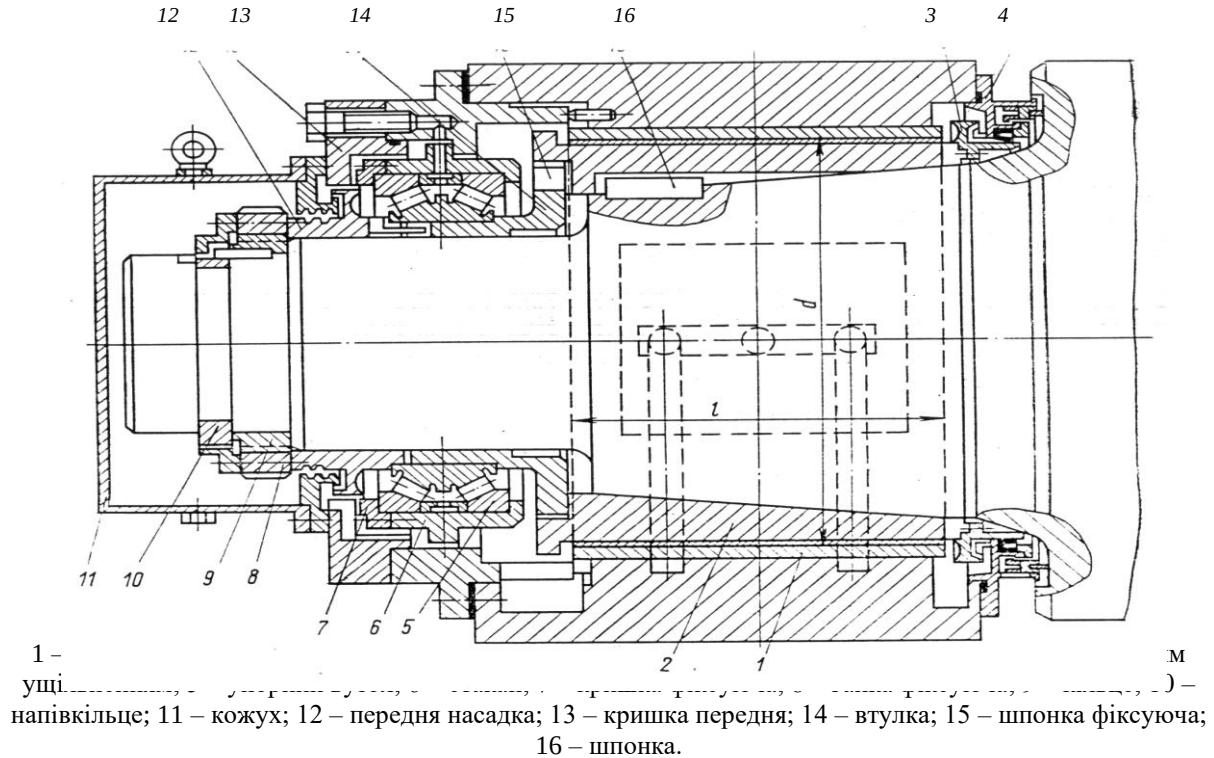


Рисунок Б.1 – Підшипник рідинного тертя конструкції ЄЗТМ діаметром 450-1320 мм

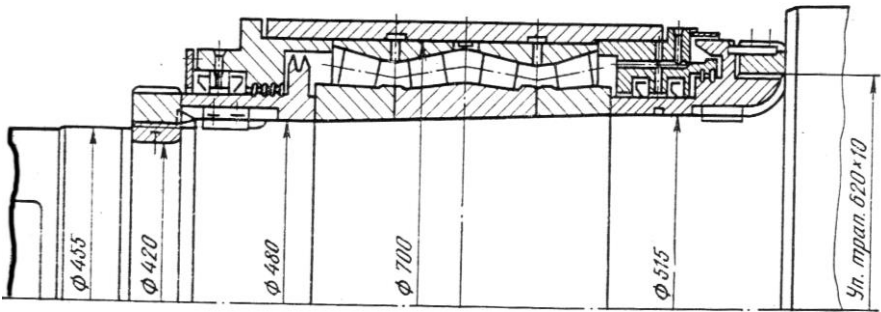


Рисунок Б. 2 – Установка рабочего вала з конічною шийкою отиривалкового стану 2000 на роликових кінцевих підшипниках

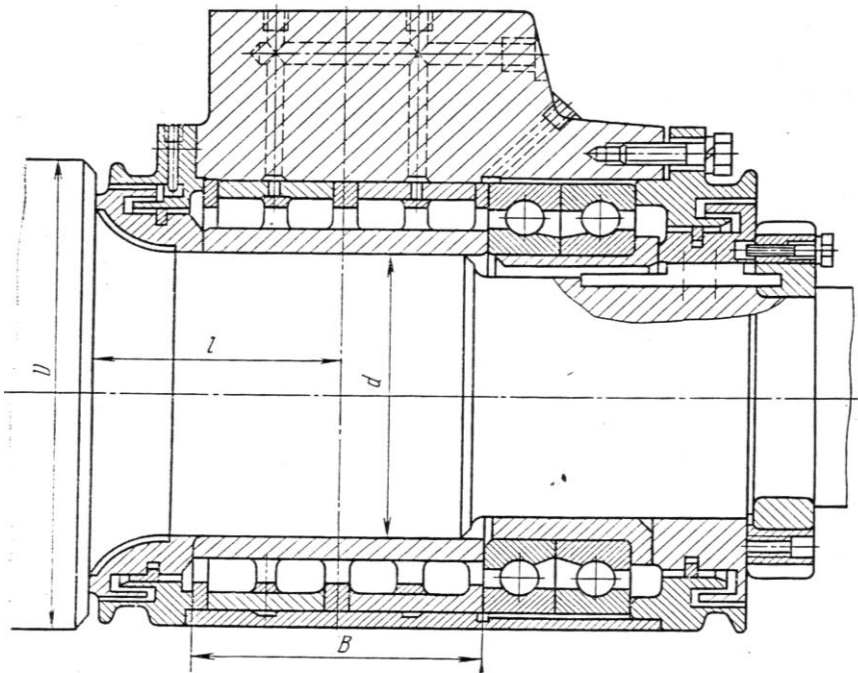
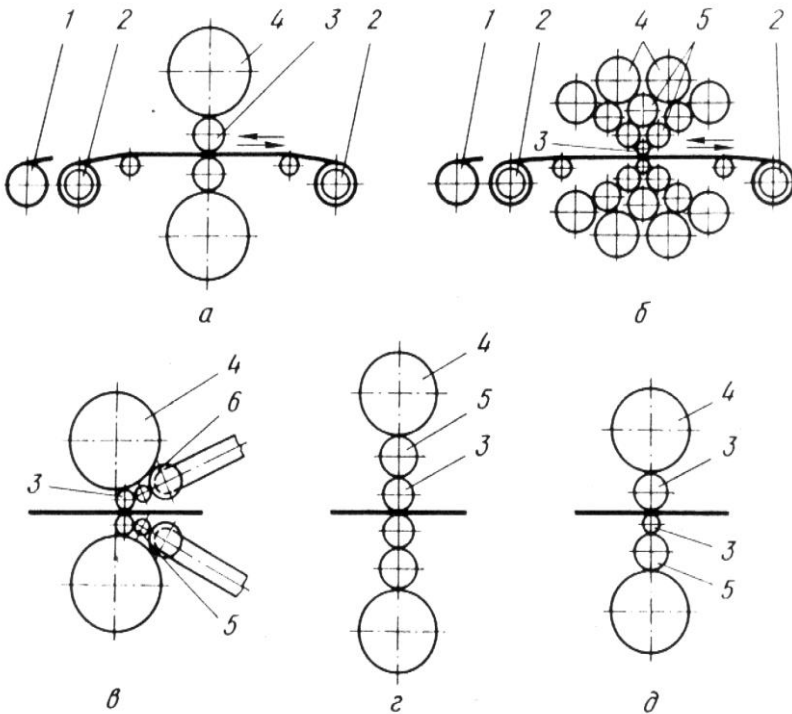
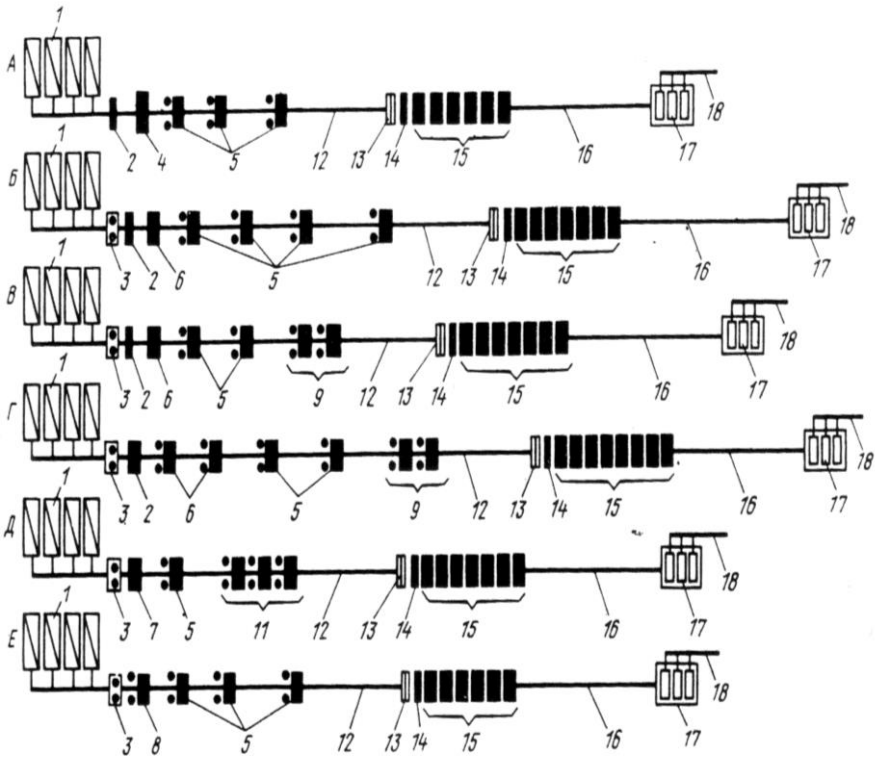


Рисунок Б. 3 – Фіксуєча опора валка на чотирирядному підшипнику з циліндричними роликами (шийка валка конічна або циліндрична з діаметром під підшипник 500-950 мм)



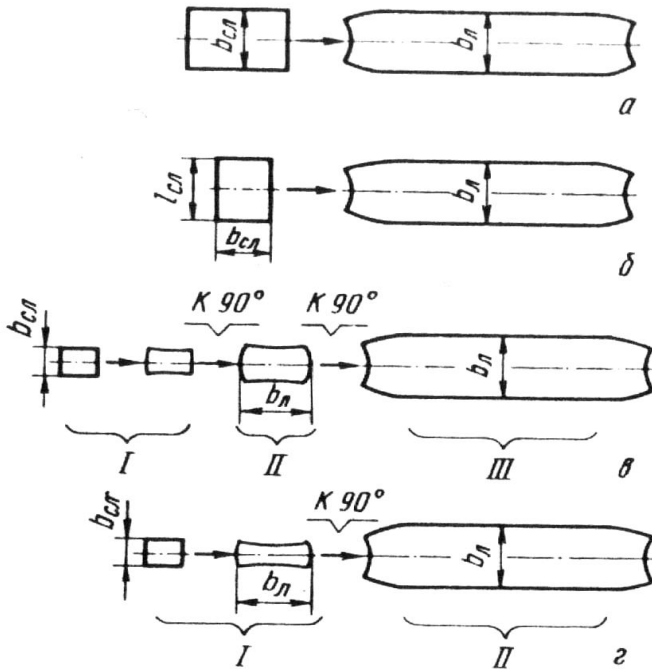
а – кварто; б – 20-валковий; в – типу МКВ; г – 6-валковий типу НС;
 д – 5-валковий (стан Тейлора); 1 – розмотувач; 2 – моталки; 3 – робочі валки;
 4 – опорні валки; 5 – проміжні валки; 6 – опорні ролики.

Рисунок Б. 4 – Схеми однокліткових реверсних станів і робочих клітей різних конструкцій



1 – нагрівальні печі; 2 – чорновий окулиноломач з горизонтальними валками; 3 – чорновий окулиноломач з вертикальними валками; 4 – розширювальна кліть кварто; 5 – чорнові універсальні кліті кварто; 6 – чорнова кліть кварто; 7 – чорнова кліть дуо; 8 – чорнова реверсивна кліть; 9 – чорнова безперервна підгрупа з двох універсальних клітей кварто; 10 – чорнові універсальні кліті дуо; 11 – чорнова безперервна підгрупа з трьох універсальних клітей кварто; 12 – проміжний рольганг; 13 – летючі ножиці; 14 – чистовий окулиноломач; 15 – чистова безперервна група клітей кварто; 16 – відвідний рольганг; 17 – моталки; 18 – конвеєр для транспортування рулонів.

Рисунок Б.5 – Схеми розташування робочих клітей безперервних широкосмугових станів



а – просте поздовжнє; б – просте поперечне; в – поздовжнє з розбиванням ширини заготовки; г – поперечне з поздовжніми попередніми пропусками (протягуванням);

I, II, III – стадії процесу прокатування

Рисунок Б.6 – Схеми прокатування товстих листів

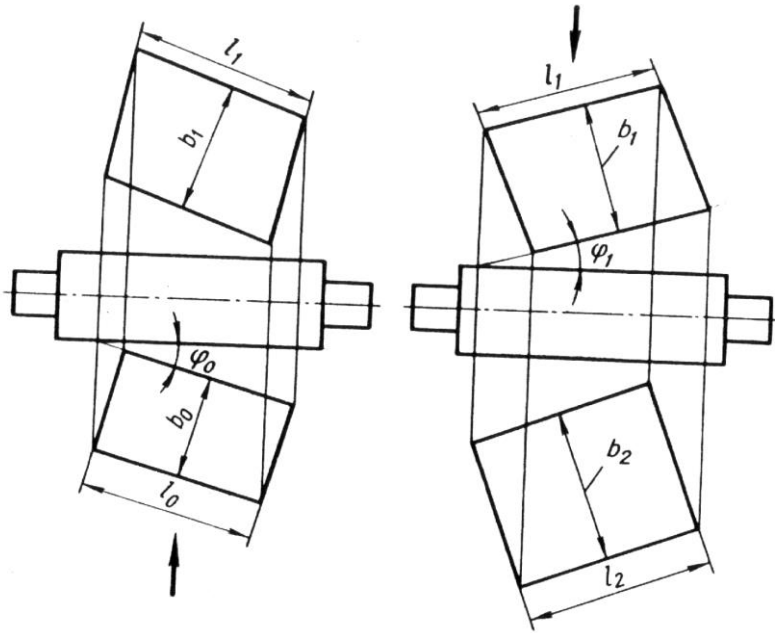


Рисунок Б. 7 – Схема прокатування під кутом (прямий і зворотній пропуски)

**Розміри шийок листових валків станів Дуо та Кварто на підшипниках кочення
(циліндричні шийки) і ПРТ (конічні шийки) (Рисунки А.8 і А.9)**

D ₆	Циліндричні шийки		Конічні шийки					D ₆	Циліндричні шийки		Конічні шийки				
	d ₂	l ₂ max	d _k	l _k	l ₃ min	l _{ж.т}	d _{ж.т}		d ₂	l ₂ max	d _k	l _k	l ₃ min	l _{ж.т}	d _{ж.т}
250	140 150	200 280				110	180	750	380 400 420	500 530 530	430 480	380 420	100 110	300-375	500
300	150 160 170	280 320 320	170	160	45	120-130	200	800	420 440 460	530 530 530	480	420	110	330-415	550
350	180 200	350 370	190 220	190 210	45 50	130-165 150-190	220 250	900	500 530	530 530	570	490	110	390-490	650
400	200 220	370 400	240	230	55	165-205	225	1000	530 560 600	530 560 560	630	540	110	425-530	710
450	249 260	430 460	260 280	240 250	60 65	180-225 195-240	300 320	1100	600 630	560 600	630 710	540 600	110 120	425-530 480-600	710 800
500	260 280	460 460	310	270	70	210-260	350	1200	630 670 710	600 650 720	760	640	120	850-510	850
550	300 320	460 460	350	300	80	240-300	400	1300	710 750	720 850	800	710	125	540-670	900
600	320 340	460 460	350	300	80	240-300	400	1400	750 710	850 720	890	780	125	600-750	1100
650	340 360	460 500	390	340	90	270-340	450	1500	710 750	720 850	1000	860	130	670-840	1120
700	360 380	500 500	430	380	100	300-375	500	1600	750 720	850 720	1000 1050	860 820	130 135	670-880	1120 1120

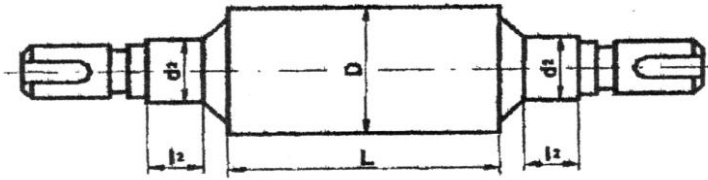


Рисунок Б. 8 – Циліндрична шийка

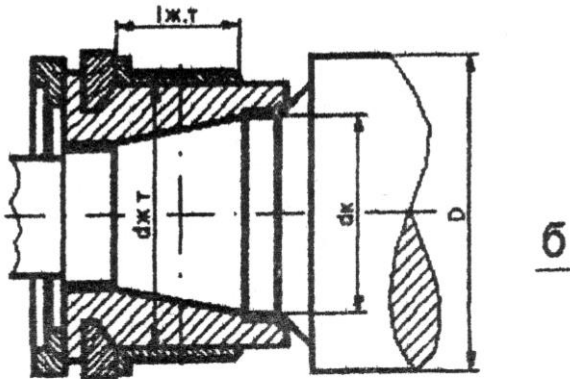
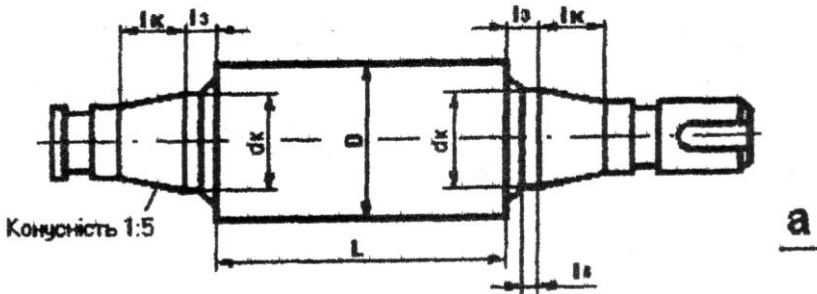
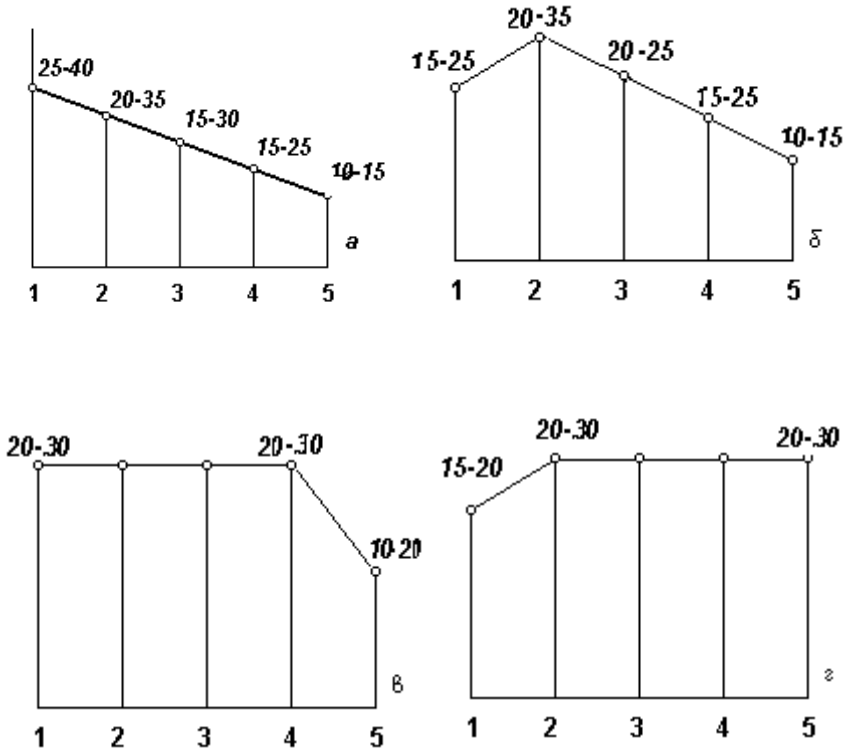


Рисунок Б. 9 – Конічна шийка



1, 2, 3, 4, 5 – номери клітей; а, б, в, г – варіанти розподілу обтискувань

Рисунок Б.10 – Режими обтискувань при холодному прокатуванні на безперервних станах

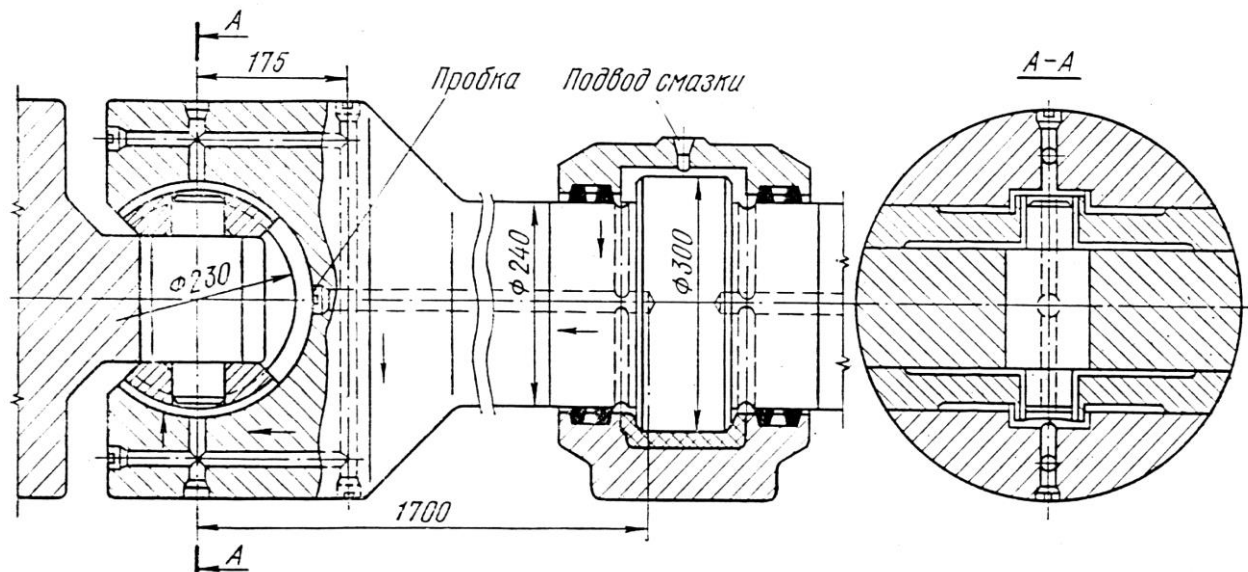


Рисунок Б.11 – Універсальний шпиндель приводу валків реверсивного стану 1700

Додаток В
Розрахунково-графічне завдання з дисципліни
“Технологія листового прокатування”

№	Кінцеві параметри	Ширина розкату, мм	Вид прокатування	Марка сталі
1	2	3	4	5
1	Верх 720 x 960 низ 780x1000 висота 2300 маса 11,9 т.	80 x 900	холодний всад	X18P9T
2	Верх 720 x 1000 низ 720 x 960 висота 3100 маса 14,4 т.	1000 x 960	гарячий всад	16Г2
3	Верх 640 x 990 низ 580 x 942 висота 220 маса 11,0 т.	80 x 870	холодний всад	1X13
4	Верх 640 x 1100 низ 580 x 1062 висота 2200 маса 11,8 т.	120 x 1050	холодний всад	0X20H3
5	Верх 720 x 1570 низ 780 x 1600 висота 2300 маса 17,7 т.	140 x 14400	гарячий всад	Сталь 3кп
6		2 x 1500 маса 15 т.	транзит всад	Сталь 08ю
7		1,8 x 1400 маса 7,5 т.	холодний всад	Сталь 1X13
8		4 x 1500 маса 10 т.	транзит	Сталь 3кп
9		2,5 x 1200 маса 12 т.	транзит	Сталь 65Г
10		0,6 x 1200 маса 15 т.	холодний прокат	Сталь 3кп
11		1 x 1500 маса 10 т.	холодний прокат	08ю
12		0,3 x 1200 маса 7,5 т.	холодний прокат	0X18H9

1	2	3	4	5
13	Верх 640 x 950, низ 580 x 942, h=220	80 x 1650	холодный всад	ЭИИ37Б
14		0,3 x 600 маса 1,5 т.	холодный прокат	08кп
15		0,8 x 2000 маса 10т.	холодный прокат	Ст3
16		1,2 x 1800 маса 15 т.	холодный прокат	Ст3
17		0,3 x 1200 маса 5 т.	холодный прокат	XI8H9T
18		4,5 x 1000 маса 20 т.	транзит	4X13
19		0,3 x 1000 маса 2 т.	холодный прокат	65Г
20		1,0 x 1500 маса 7,5 т.	холодный прокат	08ю
21	640 x 1100, 580 x 1062, h=2200	80 x 1000	холодный всад	10XI2H9
22	640 x 1220, 580 x 1196, h=2200	100 x 1050	горячий всад	651
23	640 x 1480, 580 x 1436, h=2200	120 x 1300	холодный всад	1X13
24		3 x 1400 маса 15 т.	горячий всад	08ю
25		6 x 1500 маса 12 т.	горячий всад	08кп
26		2 x 1300 маса 10 т.	транзит	10Г2
27		0,7 x 1400, маса 15 т.	холодный прокат	Ст3