

2 РОЗРАХУНОК ЗМІНЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ МЕТАЛУ ПРИ ГОРЯЧОМУ ПРОКАТУВАННІ В РЕВЕРСИВНІЙ КЛІТІ

(Завдання № 2)

2.1 Теоретичний вступ

Тепловий режим є одним з визначальних чинників технології прокатки. Він безпосередньо пов'язаний з режимами обтиснень, швидкостей, натягнень; від нього залежать енергосилові параметри прокатних станів, зусилля, що діють на валки і інші деталі робочих клітей, механічні властивості, точність розмірів профілю, форма, структура і якість поверхні готового прокату, профілізація і стійкість прокатних валків, стабільність всього технологічного процесу.

Тепловий режим розраховується з урахуванням теплового балансу, залежного від процесів конвективного, контактного, променевого теплообміну штаби і прокатних валків з рідиною, що охолоджує, навколишнім середовищем і деталями прокатного стана. Ці процеси протікають при гарячому і холодному прокатуванні з істотними відмінностями, що вимагають принципово різного підходу до методів розрахунку основних параметрів теплового режиму: температури штаби по проходах, температури і теплового профілю робочих і опорних валків, витрати рідини, необхідної для їх охолодження.

При гарячому прокатуванні визначальним параметром теплового режиму є температура штаби, заздалегідь нагрітої до 1100 - 1280°C і яка остигає в процесі деформації до 800 - 1100°C [2]. Втрата тепла штабою відбувається шляхом контактного теплообміну з валками, випромінювання в навколишнє середовище, конвекції охолоджуючої води і навколишнього повітря. Одночасно з охолодженням штаби під час прокатки відбувається і деяке підвищення її температур за рахунок виникнення тепла в результаті роботи, що витрачається на деформацію і тертя між металом і валками. Температура валків при гарячому прокатуванні на порядок нижче за температуру штаби (60 – 120°C) і визначається нею, як незалежний початковий параметр. Коливання температури валків, викликані зміною витрати і температури води, що подається на валки, мало впливають на температуру прокатоного металу.

Через деякий час після початку роботи стана середня температура валків, проводкової арматури і інших деталей стана, дотичних з гарячою штабою, встановлюється приблизно постійною і змінюється лише при зміні сортаменту, ритму або режиму прокатки.

При холодному прокатуванні визначальним параметром теплового режиму є тепловиділення за рахунок пластичної деформації і тертя в зоні контакту штаби і валків. При цьому в стан зазвичай поступає штаба, що має температуру, близьку до температури навколишнього середовища (20 – 40°C); по мірі обтиснення температура штаби збільшується і на виході із стана досягає 150 – 300°C. Температура валків при холодному прокатуванні одного порядку з температурою штаби і залежить від розподілу тепла, що виділилося, між

штабою і валками, і інтенсивності теплообміну їх з охолоджувальною рідиною і навколишнім середовищем.

Отже, на відміну від гарячої прокатки, температура штаби при розрахунку теплового режиму холодної прокатки не може бути незалежним початковим параметром і підлягає визначенню одночасно з температурою валків.

Враховуючи істотні відмінності теплових процесів, що протікають на станах гарячої і холодної прокатки, тепловий розрахунок цих станів проводиться по-різному.

У даних методичних вказівках розглянута тільки методика теплового розрахунку станів гарячої прокатки. Розрахунок полягає в наступному.

Спочатку задається температура нагріву металу під прокатку, що є початковим параметром теплового режиму стана.

Потім визначаються послідовно, від проходу до проходу, зміни температури металу, викликані контактом з валками, виділенням тепла за рахунок пластичної деформації, гідрозбивом окалини, охолодженням на рольгангах, тощо. При виконанні цих розрахунків температуру валків вважають заздалегідь відомою, приймаючи її наближене середнє значення. Зміни температури металу, викликані кожним з чинників, обчислюються незалежно один від одного. Для розрахунків вказаних змін температури використовуються або емпіричні формули, що виправдали себе на практиці, або формули, засновані на теорії теплопередачі, уточнені за практичними даними.

При виведенні формул для розрахунку зниження температури штаби за рахунок втрат тепла випромінюванням приймають наступні допущення:

температурний градієнт по товщині, ширині і довжині охолоджуваного металу відсутній;

тепловипромінювання верхньої і нижньої поверхонь штаби однакове;

теплоємність, щільність і коефіцієнт випромінювання є постійними величинами, не залежними від температури і стана випромінюючої поверхні.

Залежності, що описують падіння температури унаслідок випромінювання, зазвичай отримують сумісним вирішенням рівняння Стефана - Больцмана і рівняння, що характеризує зміни тепловмісту штаби за час τ :

$$dQ = F \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{серед}}}{100} \right)^4 \right] \cdot d\tau \quad (2.1)$$

$$dQ = c \cdot \rho \cdot V \cdot dT \quad (2.2)$$

де dQ – змінення тепловмісту за час $d\tau$;

F - поверхня випромінювання, м^2 ;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ - коефіцієнт випромінювання;

σ - коефіцієнт Стефана – Больцмана, $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

T_0 – початкова температура металу, К ;

$T_{\text{серед}}$ - температура навколишнього середовища, К ;

c - коефіцієнт теплоємності, Дж/(кг К);
 ρ - щільність металу, кг/м³;
 V - об'єм металу, м³.

Не враховуючи величину $\left(\frac{T_{\text{серед}}}{100}\right)^4$, як істотно меншу, ніж величина $\left(\frac{T_0}{100}\right)^4$, отримаємо:

$$\frac{dT}{T^4} = \frac{10^{-8} \cdot F \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot d\tau}{c \cdot \rho \cdot V} \quad (2.3)$$

Після інтегрування формули (2.3) можна отримати формулу для визначення температури металу після втрат тепла випромінюванням

$$T_{\text{випр}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{3 \cdot F \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \sigma \cdot 10^9 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot V}\right) + \left(\frac{1000}{T_0}\right)^3}} \quad (2.4)$$

де $T_{\text{випр}}$ – температура штаби після втрат тепла випромінюванням, К;

τ - час охолодження, с.

Для спрощення розрахунку можна користуватися формулою Г.П. Іванцова

$$T_{\text{випр}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot \tau}{h}\right) + \left(\frac{1000}{T_0}\right)^3}} \quad (2.5)$$

де h – товщина охолоджуваної штаби, мм.

Зміну температури за рахунок конвективних втрат тепла визначають вирішенням наступної системи рівнянь

$$dQ = \alpha_k \cdot (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot F \cdot d\tau \quad (2.6)$$

$$dQ = c \cdot \rho \cdot V \cdot dT \quad (2.7)$$

де α_k – коефіцієнт конвективної теплопередачі, Дж/(м² К).

Тоді, вирішуючи систему рівнянь при допущеннях, розглянутих при описанні втрат тепла випромінюванням, отримаємо

$$dT = \frac{\alpha_k \cdot (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot F}{c \cdot \rho \cdot V} \cdot d\tau \quad (2.8)$$

Втрати тепла металом при конвективному теплообміні можна розраховувати по формулі

$$\Delta T_{\text{конв}} = (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot e^{-\frac{\alpha_k \cdot F \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot V}} + T_{\text{серед}} \quad (2.9)$$

де $\Delta T_{\text{конв}}$ – втрати тепла металом при конвективному теплообміні, К.

Також для спрощення розрахунку зміни температури штаби за рахунок конвективного теплообміну можна скористатися наступною формулою

$$\Delta T_{\text{конв}} = (T_0 - T_{\text{серед}}) \cdot e^{-\frac{0,445 \cdot \tau}{h}} + T_{\text{серед}} \quad (2.10)$$

Втрати тепла конвекцією різні на різних ділянках технологічного потоку, і збільшуються по мірі збільшення швидкості прокатки, зменшення температури і товщини штаби, тобто збільшуються від нагрівальних печей до ділянки змотування.

Тому втрати теплоти конвекцією в основному розраховують при розрахунку зміни температури металу в чистових клітках, в останніх міжкліткових проміжках, на відвідному рольгангу і нехтують цими втратами при розрахунку зміни температури штаби в чорнових клітках і на проміжному рольгангу. Не врахування конвективних втрат в цьому випадку дає неточність кінцевого результату розрахунку температури не більш, ніж на 0,2 ÷ 0,3 %.

Розрахунок втрат тепла штабою за рахунок контакту з робочими валками заснований на припущенні відсутності теплообміну з навколишнім середовищем. Зміна температури металу за рахунок втрат тепла при контакті з валками визначається по формулі Х. Венцеля

$$\Delta T_{\text{кв}} = \frac{4,87}{(h_0 + h_1)} (T_0 - T_{\text{в}}) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_0 \cdot l_{\text{д}}}{1000 \cdot (h_0 + h_1) \cdot \vartheta_{\text{сер}}}} \quad (2.11)$$

де $\Delta T_{\text{кв}}$ – падіння температури металу в проході за рахунок втрат при контакті з валками, К;

$T_{\text{в}}$ - температура валків, К;

$\vartheta_{\text{сер}}$ – середня швидкість прокатки в даному проході, м/с.

Середня швидкість прокатки в проході

$$\vartheta_{\text{сер}} = (\vartheta_0 + \vartheta_1) / 2 \quad (2.12)$$

Швидкість входу заготовки в кліть можна визначити, використовуючи формулу (1.26), якщо відомі швидкість прокатки в даному проході і коефіцієнт витягання у цьому ж проході.

Підвищення температури прокатуваної штаби за рахунок енергії деформації визначається рівнянням

$$\Delta T_{\text{деф}} = \frac{A_{\text{деф}}}{c \cdot \rho \cdot V} \quad (2.13)$$

де $\Delta T_{\text{деф}}$ – деформаційний розігрів, °С;

$A_{\text{деф}}$ – робота, що витрачається на пластичну деформацію, Дж.

Робота деформації

$$A_{\text{деф}} = -p_{\text{сер}} \cdot \frac{V}{h} \cdot dh \quad (2.14)$$

де $p_{\text{сер}}$ – середнє нормальне контактне напруження, МПа.

Виконуючи інтегрування формули (2.14) отримаємо формулу для визначення повної роботи деформації

$$A_{\text{деф}} = p_{\text{сер}} \cdot V \cdot \ln(h_0/h_1) \quad (2.15)$$

Оскільки при прокатуванні 80÷90 % роботи йде на підвищення температури металу, то відповідно деформаційний розігрів, згідно формулам (2.13) і (2.15) можна розрахувати по формулі

$$\Delta T_{\text{деф}} = 0,85 \cdot \frac{P_{\text{сер}}}{c \cdot \rho} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (2.16)$$

Середнє нормальне контактне напруження розраховується по формулі

$$p_{\text{сер}} = \beta \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_s \quad (2.17)$$

де β – коефіцієнт Лоде, який враховує вплив головної нормальної напруги, що діє у напрямку осі бочки валків;

n_{σ} - коефіцієнт напруженого стана;

σ_s – опір металу пластичній деформації, МПа.

Коефіцієнт Лоде при плоскій (двовірній) деформації дорівнює $\beta = 1,15$.

Коефіцієнт напруженого стана визначається по формулі

$$n_{\sigma} = n'_{\sigma} \cdot n''_{\sigma} \cdot n'''_{\sigma} \cdot n_b \quad (2.18)$$

де n'_{σ} – коефіцієнт, що враховує вплив зовнішнього тертя на напружений стан в осередку деформування;

n''_{σ} – коефіцієнт, що враховує вплив зовнішніх зон на напружений стан в осередку деформування;

n'''_{σ} – коефіцієнт, що враховує вплив натягнення штаби на напружений стан в осередку деформування;

n_b – коефіцієнт, що враховує вплив ширини штаби на напружений стан в осередку деформування.

При розрахунку коефіцієнта n'_{σ} враховується геометрія осередку деформування, а саме відношення довжини осередку деформування до середньої товщини штаби в проході $l_{\text{д}}/h_{\text{сер}}$

$$\text{при } \frac{l_{\text{д}}}{h_{\text{сер}}} > (4 \div 5) \quad n'_{\sigma} = 1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{l_{\text{д}}}{h_{\text{сер}}} \quad (2.19)$$

де $h_{\text{сер}}$ - середня розрахована товщина штаби в проході, мм

$$h_{\text{сер}} = (h_0 + h_1)/2 \quad (2.20)$$

$$\text{при } 2 < \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} < 4 \quad n'_\sigma = \frac{2 \cdot h_H}{\Delta h \cdot (\delta - 1)} \cdot \left[\left(\frac{h_H}{h_1} \right)^\delta - 1 \right] \quad (2.21)$$

де h_H - висота нейтрального перетину, мм;

δ – коефіцієнт, який визначається за формулою Целікова А.И. [4]

$$\delta = 2 \cdot f \cdot (l_d / \Delta h) \quad (2.22)$$

$$\frac{h_H}{h_1} = \left(\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot \left(\frac{h_0}{h_1} \right)^\delta}}{\delta + 1} \right)^{\frac{1}{\delta}} \quad (2.23)$$

$$\text{при } \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} < 2 \quad n'_\sigma = 1 + \frac{1}{6} \cdot \frac{l_d}{h_{\text{сер}}} \quad (2.24)$$

Коефіцієнт n''_σ при $l_d/h_{\text{сер}} < 1$ визначається по формулі

$$n''_\sigma = (l_d/h_{\text{сер}})^{-0,4} \quad (2.25)$$

Якщо $l_d/h_{\text{сер}} > 1$, то $n''_\sigma = 1$.

Коефіцієнт n'''_σ , якщо немає напруження, дорівнює 1.

У випадку, коли напруження має місце, то коефіцієнт n'''_σ розраховується по формулі

$$n'''_\sigma = 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2 \cdot p'_{\text{сер}}} \quad (2.26)$$

де σ_0 і σ_1 – відповідно величини заднього і переднього натягань, МПа;

$p'_{\text{сер}}$ - середній нормальний контактний тиск без урахування натягання штаби, МПа.

Коефіцієнт n'''_σ можна розраховувати і по формулі Корольова (для холодної прокатки)

$$n'''_\sigma = \left(\varphi - \frac{\sigma_1}{1,15 \cdot \sigma_{s0}} \right) \cdot \frac{1}{m_1} \cdot (e^{m_1 \cdot \psi_n} - 1) + \left(1 - \frac{\sigma_0}{1,15 \cdot \sigma_{s0}} \right) \cdot (e^{m_0 \cdot (1 - \psi_n)} - 1) \quad (2.27)$$

де φ – коефіцієнт зміцнення в даному проході;

σ_{s0} – опір металу деформації перед проходом, МПа;

m_0, m_1 - коефіцієнти;

Ψ_n - коефіцієнт, який характеризує положення нейтрального перетину в осередку деформування.

Коефіцієнт зміцнення знаходиться з формули

$$\varphi = \sigma_{s1} / \sigma_{s0} \quad (2.28)$$

де σ_{s1} - опір металу деформації після проходження, МПа.

Коефіцієнти m_0 і m_1 в кожному проході

$$m_0 = 2 \cdot f \cdot (l_d / h_0) \quad (2.29)$$

$$m_1 = 2 \cdot f \cdot (l_d / h_1) \quad (2.30)$$

де f - коефіцієнт тертя.

Коефіцієнт тертя розраховується за формулою [4, 6]

$$f = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_M) \quad (2.31)$$

де k_1 - коефіцієнт, що враховує матеріал валків;

k_2 - коефіцієнт, що враховує вплив швидкості прокатки;

k_3 - коефіцієнт, що характеризує марку сталі;

T_M - температура металу в даному проході, °С.

Якщо прокатка здійснюється на сталевих валках, то коефіцієнт $k_1 = 1$, якщо на чавунних валках - $k_1 = 0,8$.

Коефіцієнт, що враховує вплив швидкості прокатки знаходиться по формулі

$$k_2 = 1,67 \cdot v_1^{-0,25} - 0,4 \quad (2.32)$$

При швидкостях прокатки менше 2 м/с коефіцієнт $k_2 = 1$; при швидкостях більше 20 м/с коефіцієнт $k_2 = 0,4$.

Коефіцієнт, що характеризує марку сталі, визначається за формулою

$$k_3 = 0,97926 + [C] \cdot (0,0031 \cdot [Ni] + 0,00175 \cdot [W]) + 0,02457 \cdot [Mn] + 0,02144 \cdot [Cr] + 0,001 \cdot [Mo] \quad (2.33)$$

де [...] - содержание данного элемента а стали в процентах.

Для вуглецевих сталей коефіцієнт k_3 дорівнює 1.

Коефіцієнт Ψ_n визначається по формулі

$$\Psi_n = \frac{m_0}{m_0 + m_1} \cdot \left[1 - \frac{1}{m_0} \cdot \ln \left(\frac{\varphi - \frac{\sigma_1}{\sigma_{s0}}}{1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_{s0}}} \right) \right] \quad (2.34)$$

Коефіцієнт n_b залежить від відношення середньої ширини штаби до довжини осередку деформування, тобто $b_{сер} / l_d$, де $b_{сер}$ - середня ширина штаби, мм:

$$b_{\text{сер}} = (b_0 + b_1)/2 \quad (2.35)$$

При $b_{\text{сер}}/l_{\text{д}} > 5$ $n_b = 1$.

При відношенні середньої ширини штаби до довжини осередку деформування менше п'яти, коефіцієнт n_b розраховується по формулі

$$n_b = \frac{1 + \left(\frac{3 \cdot b_{\text{сер}} - l'_{\text{д}}}{6 \cdot b_{\text{сер}}} \right) \cdot f \cdot \frac{l'_{\text{д}}}{h_{\text{сер}}}}{1 + \frac{f}{2} \cdot \frac{l'_{\text{д}}}{h_{\text{сер}}}} \quad (2.36)$$

де $l'_{\text{д}}$ - приведена довжина осередку деформування [4], мм.

$$l'_{\text{д}} = l_{\text{д}} \cdot \left[1 - \frac{\text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{f} \right] \quad (2.37)$$

Опір металу деформації визначається по формулі [5]

$$\sigma_s = k \cdot \sigma_0 \cdot \xi^a \cdot (10 \cdot \varepsilon)^b \cdot (T/1000)^c \quad (2.38)$$

де k, a, b, c - коефіцієнти для конкретної марки сталі;

σ_0 - базовий опір металу деформації, який отримано методом розтягнення при стандартних умовах: $\varepsilon = 10\%$; $\xi = 1\text{с}^{-1}$; $T = 1000^\circ\text{C}$;

T - температура металу при входе в кліть (см. формулу 2.5);

ξ - швидкість деформації, с^{-1} , яка визначається по формулі

$$\xi = \vartheta_1 \cdot \varepsilon_h / l_{\text{д}} \quad (2.39)$$

Коефіцієнти k, a, b, c визначаються по таблиці 2.2.

2.2 Завдання для розрахунку змінювання температури металу по проходам при реверсивному прокатуванні

У завданні необхідно визначити температуру металу після кожного проходу при прокатуванні заготовки в реверсивній кліті. Вихідні дані беруться відповідно до варіанту домашнього завдання № 1 по таблиці 1.2 і додатковими даними, представленими в таблиці 2.3 (див. в кінці завдання № 2).

Нижче приведений розрахунок змінювання температури металу при реверсивному прокатуванні заготовки із сталі мазкі 3сп товщиною $h_0=180$ мм, шириною $b_0=500$ мм і довжиною $l_0=5000$ мм за 7 проходів з обтисненнями в кожному проході відповідно $\Delta h_1 \dots \Delta h_7 = 45, 40, 25, 20, 15, 10, 5$ мм. Прокатка здійснюється на сталевих валках діаметром $D_B=930$ мм зі швидкостями $\vartheta_1 \dots \vartheta_7 = 2,3; 2,4; 2,5; 2,7; 2,9; 3,0; 3,2$ м/с відповідно по проходах. Температура нагріву заготовки в методичній печі складає $T_0=1280^\circ\text{C}$; відстань від печі до кліті $L=20$ м; швидкість транспортування заготовки до кліті $\vartheta_{\text{тр}} = 1,7$ м/с.

2.3 Приклад визначення змінювання температури металу по проходам

Розрахунок будемо вести для центральної по довжині точки розкату. Відповідно до умов завдання заготовка нагрівається в методичній печі до температури 1280°C. Після видачі з печі вона транспортується по рольгангу до робочої кліті, внаслідок чого відбувається зниження температури металу із-за втрат теплоти випромінюванням в навколишнє середовище. Для визначення температури металу після втрат тепла випромінюванням можна скористатися формулою (2.5).

Для нашого випадку час охолодження заготовки при транспортуванні її від печі до кліті визначатиметься часом її транспортування

$$\tau_{\text{охл1}} = \frac{L}{\vartheta_{\text{тр}}} + \frac{l_0/2}{\vartheta_0}$$

де $\tau_{\text{охл1}}$ - час охолодження металу при транспортуванні його від печі до кліті, с;

L - відстань від печі до кліті, м;

$\vartheta_{\text{тр}}$ - швидкість транспортування заготовки від печі до кліті, м/с.

Швидкість входу заготовки в кліть визначаємо, використовуючи формулу (1.26)

$$\vartheta_0 = \vartheta_1/\lambda_1 = 2,3/1,294 = 1,78 \text{ м/с.}$$

Отже, час охолодження заготовки при її транспортуванні від печі до кліті складе

$$\tau_{\text{охл1}} = \frac{20}{1,7} + \frac{5/2}{1,78} = 13,2 \text{ с.}$$

Тепер можна визначити температуру металу перед першим проходом після втрат теплоти випромінюванням (формула 2.5). Температуру металу визначатимемо не в Кельвінах, а відразу в градусах за Цельсієм, і позначимо її $T_{\text{вх}}$, тобто температура металу при вході в прокатну кліть

$$\begin{aligned} T_{\text{вх1}} &= \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot \tau_{\text{охл1}}}{h_0}\right) + \left(\frac{1000}{T_0 + 273}\right)^3}} - 273 = \\ &= \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot 13,2}{180}\right) + \left(\frac{1000}{1280 + 273}\right)^3}} - 273 = 1272^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

Таким чином, в кліть заготівка входить з температурою 1272°C.

Далі визначаємо втрати тепла за рахунок контакту з ватками. При цьому приймаємо температуру валків $T_{\text{в}} = 80^\circ\text{C}$.

Середня швидкість прокатки в першому проході (формула 2.12)

$$v_{\text{сер1}} = (v_0 + v_1)/2 = (1,78 + 2,3)/2 = 2,04 \text{ м/с.}$$

Радіус валків кліті (формула 1.19)

$$R_B = 930/2 = 465 \text{ мм.}$$

Тоді довжина осередку деформування в першому проході (формула 1.18)

$$l_{\text{д1}} = \sqrt{R_B \cdot \Delta h_1} = \sqrt{465 \cdot 45} = 144,7 \text{ мм.}$$

Таким чином, падіння температури при контакті з валками в першому проході (формула 2.11) дорівнює

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{кв1}} &= \frac{4,87}{(h_0 + h_1)} (T_{\text{вх1}} - T_B) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_0 \cdot l_{\text{д1}}}{1000 \cdot (h_0 + h_1) \cdot v_{\text{сер1}}}} = \\ &= \frac{4,87}{(180 + 135)} (1272 - 80) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 180 \cdot 144,7}{1000 \cdot (180 + 135) \cdot 2,04}} = 5^\circ\text{C.} \end{aligned}$$

Для визначення деформаційного розігрівання приймаємо коефіцієнт теплоємності для сталі $c = 683,2 \text{ Дж/(кг·град)}$, щільність металу $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$.

Оскільки для виведення диференціального рівняння контактного тиску використовується умова пластичності при двовимірній деформації, то в цьому випадку нехтуємо розрахованим раніше розширенням і для розрахунку середнього контактного тиску приймаємо коефіцієнт Лодє рівним 1,15.

Для нашого випадку в першому проході (формула 2.20)

$$h_{\text{сер1}} = (h_0 + h_1)/2 = (180 + 135)/2 = 157,5 \text{ мм.}$$

Тому відношення $l_{\text{д1}}/h_{\text{сер1}} = 144,7/157,5 = 0,918 < 2$ (формула 2.24), звідки отримуємо

$$n'_{\sigma 1} = 1 + 0,918/6 = 1,153.$$

Для першого проходу (оскільки $l_{\text{д1}}/h_{\text{сер1}} = 144,7/157,5 = 0,918 < 1$, формула 2.25), то

$$n''_{\sigma 1} = (0,918)^{-0,4} = 1,035.$$

Оскільки в нашому прикладі розрахунку натягнення відсутнє, то коефіцієнт $n'''_{\sigma} = 1$.

Середня ширина штаби в першому проході (формула 2.35)

$$b_{\text{сер1}} = (b_0 + b_1)/2 = (500 + 515)/2 = 507,5 \text{ мм.}$$

Відношення $b_{\text{сер1}}/l_{\text{д1}} = 507,5/144,7 = 3,507 < 5$, тому розраховуємо коефіцієнт n_{b1} по формуле (2.36).

Спочатку визначаємо кут захвату (формула 1.20)

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{\Delta h_1}{D_B}\right) = \arccos\left(1 - \frac{45}{930}\right) = 17,9^\circ.$$

Далі визначаємо коефіцієнт тертя. Оскільки в нашому випадку прокатка відбувається на сталевих валках, то коефіцієнт $k_1 = 1$.

Для першого проходу коефіцієнт k_2 дорівнює (формула 2.32)

$$k_2 = 1,67 \cdot \vartheta_1^{-0,25} - 0,4 = 1,67 \cdot 2,3^{-0,25} - 0,4 = 0,956.$$

Для сталі марки 3сп приймаємо $k_3 = 1$. Таким чином, коефіцієнт тертя в першому проході (формула 2.31) дорівнює

$$\begin{aligned} f_1 &= k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot T_{\text{вх1}}) = \\ &= 1 \cdot 0,956 \cdot 1 \cdot (1,05 - 0,0005 \cdot 1272) = 0,40. \end{aligned}$$

Тоді по формулі 2.37

$$l'_{\text{д1}} = l_{\text{д1}} \cdot \left[1 - \frac{tg\left(\frac{\alpha_1}{2}\right)}{f_1} \right] = 144,7 \cdot \left[1 - \frac{tg\left(\frac{17,9}{2}\right)}{0,40} \right] = 87,1 \text{ мм.}$$

По формулі (2.36) знаходимо

$$n_{b1} = \frac{1 + \left(\frac{3 \cdot b_{\text{сер1}} - l'_{\text{д1}}}{6 \cdot b_{\text{сер1}}} \right) \cdot f_1 \cdot \frac{l'_{\text{д1}}}{h_{\text{сер1}}}}{1 + \frac{f_1}{2} \cdot \frac{l'_{\text{д1}}}{h_{\text{сер1}}}} = \frac{1 + \left(\frac{3 \cdot 507,5 - 87,1}{6 \cdot 507,5} \right) \cdot 0,40 \cdot \frac{87,1}{157,5}}{1 + \frac{0,40}{2} \cdot \frac{87,1}{157,5}} = 0,994.$$

Таким чином, коефіцієнт напруженого стану в першому проході нашого прикладу дорівнює (формула 2.18)

$$n_{\sigma1} = n'_{\sigma1} \cdot n''_{\sigma1} \cdot n'''_{\sigma1} \cdot n_{b1} = 1,153 \cdot 1,034 \cdot 1 \cdot 0,994 = 1,186.$$

Швидкість деформації в першому проході (формула 2.39)

$$\xi_1 = \vartheta_1 \cdot \varepsilon_{h1} / l_{\text{д1}} = 2,3 \cdot 0,25 / 144,7 \cdot 10^{-3} = 3,97 \text{ с}^{-1}.$$

Для сталі 3сп коефіцієнти дорівнюють [5]:

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

Тому опір металу деформації в першому проході складе (формула 2.38)

$$\begin{aligned} \sigma_{s1} &= k \cdot \sigma_0 \cdot \xi_1^a \cdot (10 \cdot \varepsilon_{h1})^b \cdot (T_{\text{вх1}}/1000)^c = \\ &= 0,96 \cdot 90,7 \cdot 3,97^{0,124} \cdot (10 \cdot 0,25)^{0,167} \cdot (1272/1000)^{-2,54} = 65,3 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Отже, тепер можна знайти середнє нормальне контактне напруження (формула 2.17)

$$p_{\text{сер1}} = \beta \cdot n_{\sigma1} \cdot \sigma_{s1} = 1,15 \cdot 1,185 \cdot 65,3 = 89,1 \text{ МПа.}$$

Тоді деформаційним розігрівши в першому проході буде (формула 2.16):

$$\Delta T_{\text{деф1}} = 0,85 \cdot \frac{p_{\text{сер1}}}{c \cdot \rho} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} = 0,85 \cdot \frac{89,1 \cdot 10^6}{683,2 \cdot 7850} \cdot \ln \frac{180}{135} = 4^\circ\text{C.}$$

Знаючи втрати температури при контакті з валками і деформаційний розігрів, можна знайти температуру металу при виході його з кліті після першого проходу:

$$T_{\text{вих1}} = T_{\text{вх1}} - \Delta T_{\text{кв1}} + \Delta T_{\text{деф1}} = 1272 - 5 + 4 = 1271^\circ\text{C}.$$

Після виходу з кліті після першого проходу розкат починає охолоджуватися за рахунок випромінювання, тому так само, як і для першого проходу визначаємо температуру металу перед входом в кліть в другому проході (формула 2.5):

$$T_{\text{вх2}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot \tau_{\text{охл2}}}{h_1}\right) + \left(\frac{1000}{T_{\text{м1}} + 273}\right)^3}} - 273$$

де $\tau_{\text{охл2}}$ - час охолодження металу перед другим проходом, с.

Час охолодження розкату буде дорівнювати

$$\tau_{\text{охл2}} = \tau_{\text{вих1}} + \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{вх2}}$$

де $\tau_{\text{вих1}}$ - час виходу штаби з кліті в першому проході, с;

$\tau_{\text{п}}$ - час паузи, с;

$\tau_{\text{вх2}}$ - час входу штаби в кліть при другому проході, с.

$$\tau_{\text{охл2}} = \frac{l_1/2}{v_1} + \tau_{\text{п}} + \frac{l_2/2}{v_2}$$

Час паузи приймаємо $\tau_{\text{п}} = 3$ с.

Тоді

$$\tau_{\text{охл2}} = \frac{6,472/2}{2,3} + 3 + \frac{8,954/2}{2,4} = 6,3 \text{ с.}$$

Температура металу перед другим проходом

$$T_{\text{вх2}} = \frac{1000}{\sqrt[3]{\left(\frac{0,0534 \cdot 6,3}{135}\right) + \left(\frac{1000}{1271 + 273}\right)^3}} - 273 = 1267^\circ\text{C}.$$

Далі аналогічно визначаємо втрату температури при контакті з валками, деформаційний розігрів і, відповідно, температуру металу при виході з кліті після другого проходу. Для решти всіх проходів розрахунок проводиться аналогічним чином.

Всі результати розрахунку зведені в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку температури металу по проходам при реверсивному прокатуванні

Номер проходу	Температура металу перед входом в кліть, $T_{вх}$, °С	Падіння температури при контакті с валками, $\Delta T_{кв}$, °С	Деформаційний розігрів, $\Delta T_{деф}$, °С	Температура металу на виході з кліті, $T_{вих}$, °С
1	1272	5	4	1271
2	1267	7	5	1265
3	1258	8	5	1255
4	1243	10	6	1240
5	1222	12	7	1217
6	1187	15	8	1180
7	1138	15	5	1128

Таким чином, температура кінця прокатки складає 1128 °С.

Побудувати графіки залежності температур $T_{вх}$ і $T_{вих}$ від номера проходу (рис. 2.1).

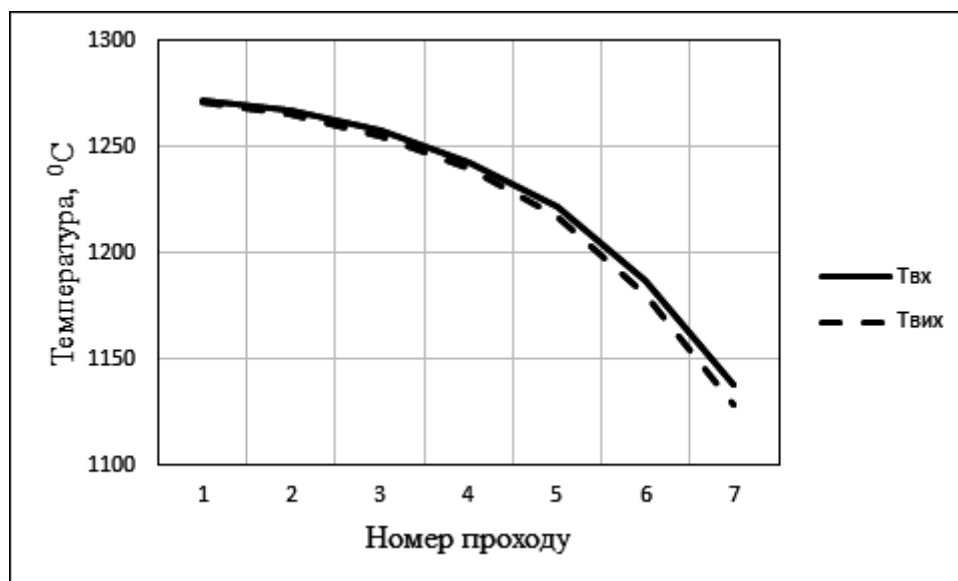


Рисунок 2.1 - Залежність температури металу перед входом в кліть ($T_{вх}$) і на виході з кліті ($T_{вих}$) від номера проходу

Варіанти вихідних даних для виконання завдання № 2 наведені в таблицях 1.2, 2.2 і 2.3.

2.4 Варіанти індивідуальних завдань № 2

Таблиця 2.2 – Розрахункові коефіцієнти до формули (2.38) [5]

Номер варіанту	Марка сталі	k	σ_0 , МПа	a	b	c
1	10	0,934	87,6	0,125	0,266	-2,46
2	40X	0,979	87,5	0,130	0,170	-3,62
3	15Г	0,842	103,0	0,126	0,188	-2,74
4	45	1,000	87,4	0,143	0,173	-3,05
5	20X13	0,900	136,0	0,132	0,210	-3,26
6	60С2	0,921	105,0	0,153	0,197	-3,46
7	40ХН	0,935	88,5	0,134	0,234	-3,47
8	35ГС	0,975	89,6	0,136	0,187	-2,79
9	5сп	0,917	89,5	0,144	0,208	-3,35
10	У10А	0,995	80,5	0,163	0,194	-3,57
11	ШХ15	1,010	79,6	0,137	0,220	-4,07
12	X17H2	0,866	126,0	0,130	0,063	-4,72
13	15X13	0,950	145,0	0,102	0,125	-3,50
14	15X25T	1,028	58,5	0,124	0,052	-3,70
15	30ХГСА	0,996	92,4	0,134	0,250	-3,34
16	3сп	0,960	90,7	0,124	0,167	-2,54
17	15ХСНД	0,880	93,2	0,122	0,226	-2,90
18	20ХГ2С	1,011	95,8	0,125	0,213	-3,65
19	У7А	0,948	78,3	0,159	0,197	-2,87
20	38ХМЮА	1,016	100,0	0,114	0,273	-3,72

Таблиця 2.3 – Варіанти завдань для розрахунку змінення температури металу при реверсивному прокатуванні

№ варіанту	Марка сталі	D _в , мм	Матеріал валків	T _о , °C	Відстань від печі до кліті, L, м	Швидкість транспортування, $\vartheta_{тр}$, м/с	ϑ_1 , м/с	ϑ_2 , м/с	ϑ_3 , м/с	ϑ_4 , м/с	ϑ_5 , м/с	ϑ_6 , м/с	ϑ_7 , м/с
1	10	950	сталь	1255	35	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,3
2	40X	850	чавун	1270	28	1,7	2,1	2,4	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3
3	15Г	1000	сталь	1260	33	1,7	2,0	2,2	2,5	2,8	2,9	3,1	3,2
4	45	800	чавун	1250	40	1,7	1,9	2,2	2,5	2,8	3,0	3,1	3,4
5	20X13	900	сталь	1240	25	1,7	2,0	2,4	2,4	2,7	2,8	3,0	3,2
6	60С2	930	сталь	1245	31	1,7	1,8	1,9	2,1	2,3	2,5	2,8	2,9
7	40ХН	1050	сталь	1250	27	1,7	1,9	2,1	2,5	2,6	2,8	3,1	3,3
8	35ГС	800	чавун	1230	37	1,7	2,1	2,1	2,4	2,5	2,8	2,9	3,0
9	5сп	950	сталь	1270	30	1,7	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	3,4	3,6
10	У10А	900	сталь	1190	25	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,4	2,7	2,9
11	ШХ15	1000	сталь	1170	29	1,7	1,9	2,2	2,3	2,5	2,8	3,1	3,4
12	X17Н2	1200	сталь	1180	26	1,7	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4
13	15X13	800	чавун	1240	40	1,7	2,0	2,2	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5
14	15X25Т	930	сталь	1200	36	1,7	1,9	2,1	2,5	2,9	3,0	3,2	3,5
15	30ХГСА	850	чавун	1250	34	1,7	2,1	2,4	2,7	2,8	3,0	3,3	3,6
16	3сп	800	чавун	1280	45	1,7	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,3	3,5
17	15ХСНД	800	чавун	1230	32	1,7	1,9	2,0	2,1	2,4	2,6	2,8	2,9
18	20ХГ2С	950	сталь	1260	43	1,7	2,1	2,2	2,5	2,8	2,9	3,0	3,2
19	У7А	850	чавун	1200	40	1,7	1,9	2,1	2,5	2,7	2,8	3,0	3,3
20	38ХМЮА	1000	сталь	1250	31	1,7	2,2	2,4	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3