

В. С. Єгоров /д. т. н./, **О. П. Єгоров** /к. т. н./,
О. Ю. Потап /к. т. н./, **М. Ю. Кузьменко**
Національна металургійна академія України

О. П. Крячко /к. т. н./
НВП «Дніпрочорметавтоматика»
В. М. Куваєв /д. т. н./
ДВНЗ «Національний гірничий університет»

Оптимізація процесу налаштування безперервної листової прокатки

У статті проведено аналіз впливу технології виробництва і складу обладнання на основні складові енерговитрат та розроблено пропозиції для зниження енерговитрат на виробництво листової продукції при збереженні високої продуктивності та якості листового прокату. (Іл. 1. Табл. 1. Бібліогр.: 1 назв.).

Ключові слова: прокатка, енергетичний критерій, осередок деформації, прокатна кліть, зусилля прокатки.

The analysis of the influence of production technique and hardware configuration on the main energy consumption components was made, and the proposal to reduce the energy consumption for the flat products manufacturing with maintaining the high performance and quality of flat products were made out in this article.

Key words: rolling, energy criterion, deformation, rolling stand, the rolling force.

Значна частка енергоресурсів металургії України споживається прокатними станами, а найбільш енергоємними з них є листопрокатні цехи. На цих станах прокатуються листи і смуги товщиною від 1–1,2 до 12–16 мм і шириною до 1850–2150 мм. До істотного подорожчання енергії, вдосконалення обладнання і технологій, появи нових схем прокатки автоматизація прокатних станів переслідувала в основному вирішення двох завдань – підвищення продуктивності прокатних станів та поліпшення якості випущеної продукції.

Основною метою цієї роботи є аналіз впливу технології виробництва і складу обладнання на основні складові енерговитрат та розробка пропозицій для зниження енерговитрат на виробництво листової продукції при збереженні високої продуктивності та якості листового прокату.

Енергія при виробництві листової продукції витрачається на нагрів заготовки, її обтиснення валками прокатної кліті з метою надання необхідної форми готовому листу і роботу таких технологічних агрегатів, як: ножиці, транспортери, рольганги та інше.

Найбільша частка електроенергії припадає на головний привід валків прокатних клітей, причому величина споживання цієї енергії залежить від налаштованих режимів прокатки.

Валки прокатної кліті є робочим інструментом, за допомогою якого енергія прокатного двигуна передається в осередок деформації і витрачається там на зміну форми смуги. Частина потужності прокатного двигуна витрачається

на подолання опорів у механічному передаванні обертання від двигуна до валків – це редуктор, шестерна кліть, шпинделі. Інша частина витрачається на деформацію металу в осередку деформації і на пружну деформацію елементів кліті при захопленні смуги валками. Певна частка енергії йде на пружну деформацію ділянки смуги між суміжними клітями при прокатці з натягненням. При прокатці має місце постійне саморегулювання рівності витрат енергії і її надходження від валків. Це забезпечується завдяки чутливості критичного (нейтрального) кута на найменшу диспропорцію між енергіями витрат і надходження.

З викладеного виходить, що процес прокатки може відбуватися тільки в тому випадку, коли в межах можливої зміни нейтрального кута є запас резервних сил тертя в осередку деформації. Якщо припустити, що такий запас завжди є, то можна аналізувати енергетичний стан процесу прокатки, спираючись тільки на розгляд витрат енергії на зміну форми смуги. Енергія пружного натягнення смуги між клітями передається через смугу від однієї кліті до іншої і становить окрему статтю витрат безвідносно до енергії, необхідної для пластичної деформації прокату. Спрощене графічне зображення деформаційного процесу зображено на рис 1.

Будемо виходити з формули А. І. Целікова, що виражає роботу деформації (енергію деформації), а потім перетворимо її до позначень, наведених на рис. 1.

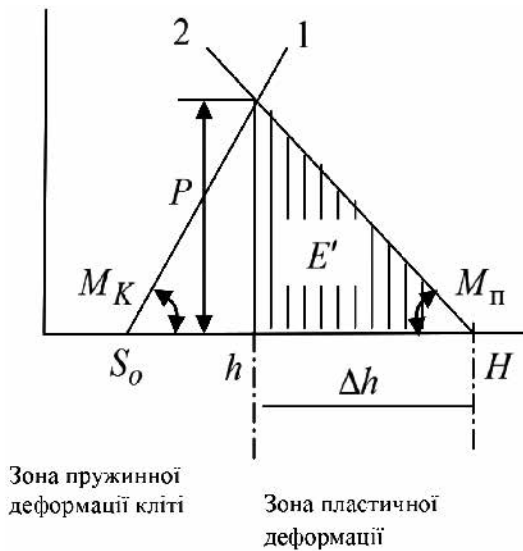


Рис. 1. Залежність зусилля P прокатки від обтиснення Δh в кліті

Ця формула має вигляд:

$$E = p_{cp} V \frac{\Delta h}{h} \quad (1)$$

де p_{cp} – середній питомий тиск, який приймається постійним уздовж осередка деформації; V – об’єм смуги, що вийшла з кліті після обтиснення Δh з товщиною h .

Перетворимо цю формулу до такого вигляду:

$$\begin{aligned} E &= p_{cp} L b_{cp} h \frac{\Delta h}{h} = \frac{P}{\sqrt{\Delta h R b_{cp}}} \vartheta T b_{cp} \Delta h = \\ &= M_n \Delta h \frac{T}{\tau_d} \Delta h = M_n \Delta h^2 \frac{T}{\tau_d}, \end{aligned} \quad (2)$$

де L – довжина прокатоної смуги за кліттю; b_{cp} – середня ширина смуги; P – зусилля прокатки; $\sqrt{\Delta h R b_{cp}}$ – площа контакту; ϑ – швидкість прокатки; T – час прокатки смуги довжиною L ; τ_d – час переміщення через осередок деформації елементарної ділянки смуги, що дорівнює часу викатки кліттю такого об’єму металу, який укладено безпосередньо в осередку деформації; M_n – жорсткість смуги, яка на рис. 1 показана постійною.

Звісно, при прокатці смуг у декількох клітях енергія на прокатку визначатиметься сумою енергій в кожній кліті. У свою чергу, енергія прокатки в кожній кліті залежить від величини обтиснення смуги. Визначивши мінімум цієї залежності, отримаємо необхідні значення обтиснень у клітях при прокатці з мінімальною енергією.

Для подальших викладок визначимо поняття «налаштування стану перед прокаткою». В праці [1] про цю проблему сказано, що завдання налаштування полягає в пошуку і використанні таких параметрів налаштування процесу прокатки і устаткування, введення яких у стан перед прокаткою забезпечить якісний перебіг цього процесу на фоні контрольованих і неконтрольованих технологічних збурень, які можуть змінюватися в певних межах. До налаштувальних уставок відносять розтвори валків, швидкості прокатки по клітях, зусилля примусових розпорів валків та інше.

Очевидно, що енергія E характеризує ту загальну енергію, яка витрачається на прокатку двома робочими валками. Тому спільність закономірностей між параметрами збережеться, якщо аналізувати енергетичні витрати E' тільки на одному валку. Тоді:

$$E' = \frac{1}{2} M_n \Delta h^2 \frac{T}{\tau_d} = \frac{1}{2} M_n (H - h)^2 \frac{T}{\tau_d}, \quad (3)$$

Проаналізуємо отриманий результат. Співмножник $M_n (H - h)^2$ можна вважати питомою пластичною енергією, що відповідає об’єму смуги в міжвалковому зазорі, тобто енергії в одиничному об’ємі прокату. Величина цієї енергії еквівалентна площі заштрихованого трикутника (рис. 1). Загальна ж енергія, витрачена на пластичну деформацію смуги довжини L , виявиться в стільки разів більше питомої, у скільки T більше τ_d , якби зробити розкладання загальної енергії на дискрети.

З урахуванням формули (3) проаналізуємо витрату енергії при прокатці смуги одночасно у декількох клітях, наприклад, у трьох. Запишемо кількість енергії:

$$\begin{aligned} E'_{1-3} &= E'_1 + E'_2 + E'_3 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{T}{\tau_{d,1}} \left[M_{n,1} (H - h_1)^2 \right] + \frac{T}{\tau_{d,2}} \left[M_{n,2} (h_1 - h_2)^2 \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{T}{\tau_{d,3}} \left[M_{n,3} (h_2 - h_3)^2 \right] \right\} = \\ &= \frac{1}{2} \left\{ m_1 \left[M_{n,1} (H - h_1)^2 \right] + m_2 \left[M_{n,2} (h_1 - h_2)^2 \right] + m_3 \left[M_{n,3} (h_2 - h_3)^2 \right] \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

де $m_i = \frac{T}{\tau_{d,i}}$ – кількість дискрет у i -й кліті при прокатці смуги кінцевої довжини впродовж машинного часу прокатки, який при безперервній прокатці однаковий для всіх клітей.

Дослідимо цей вираз на екстремум. Запишемо, що $m_1 < m_2 < m_3$, оскільки кількість дискрет збільшується для кожної наступної кліті. Якщо перейти до приватних похідних $\frac{dE'_{1+k}}{dh_3}$, що необхідно для знаходження екстремуму енергії, то наявність у відповідних рівняннях коефіцієнтів m_3 , які заздалегідь невідомі, засмітить результат. Тому напрошується необхідність застосувати штучний прийом для усунення впливу m_3 . Розглянемо один з них. Припустимо, що в нашому довільному прикладі $m_1 = 100$, $m_2 = 200$, а $m_3 = 300$. Ці цифри означають, що впродовж часу T через першу кліть пройде 100 дискрет, через другу – 200, а через третю – 300. Знайдемо спочатку умову, при якій $\frac{dE'_{1+3}}{dh_3} = 0$ у випадку викатки усіма трьома клітями однакової кількості дискрет, рівної 100. Потім знайдемо умову $\frac{dE'_{2+3}}{dh_3} = 0$, коли тільки у другій і третій клітях прокатаються 100 дискрет. Якщо умови екстремуму в першому і другому випадках збігаються, то це покаже, що дослідження виразу (4) на екстремум можна здійснювати без врахування значень коефіцієнтів m_3 .

Виходячи з виразу (4) за умови $m_1 = m_2 = m_3 = \text{const}$ запишемо:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE'_{1-3}}{dh_1} &= M_{n1}H + M_{n1}h_1 + M_{n2}h_1 - M_{n2}h_2 = 0, \\ \frac{dE'_{1-3}}{dh_2} &= -M_{n2}h_1 + M_{n2}h_2 + M_{n3}h_2 - M_{n3}h_3 = 0, \\ \frac{dE'_{1-3}}{dh_3} &= -M_{n3}h_3 = 0. \end{aligned} \right\} (5)$$

Розглянувши два перших рівняння цієї системи і розв'язавши їх відносно невідомих значень вихідних h_1 і h_2 , отримаємо:

$$h_1 = \frac{M_{n1}M_{n2}H + M_{n1}M_{n3}H + M_{n2}M_{n3}h_3}{M_{n1}M_{n2} + M_{n1}M_{n3} + M_{n2}M_{n3}}, \quad (6)$$

$$h_2 = \frac{M_{n1}M_{n2}H + M_{n1}M_{n3}h_3 + M_{n2}M_{n3}h_3}{M_{n1}M_{n2} + M_{n1}M_{n3} + M_{n2}M_{n3}}. \quad (7)$$

Для аналізу умов прокатки в двох останніх клітях ($m_2 = m_3 = \text{const}$) потрібно розглядати спільно тільки два останніх рівняння системи (5):

$$h_2 = \frac{M_{n2}h_1 + M_{n3}h_3}{M_{n2} + M_{n3}}.$$

Тепер, якщо у вираз для h_2 підставити значення h_1 з (6), то виявиться, що $h_2 = h'_2$, де h_2 визначено формулою (7). Звідси виходить, що пошук умов екстремуму функцій типу (3) можна про-

водити без урахування значень коефіцієнтів m_3 , що значно спрощує викладки. З фізичної точки зору означає, що умови екстремуму енергії можна знайти, аналізуючи витрати енергії на змінення форми суми одиничних порцій металу, що знаходяться у межах кожного з осередків деформації клітей безвідносно до смуги тієї чи іншої довжини на стані.

З апарату матаналізу відомо, що перевірка функції багатьох змінних на максимум або мінімум призводить до необхідності виконання громіздких математичних виразів. У нашому випадку можна обмежитися перевіркою на екстремум функції тільки двох змінних. Необхідно перевірити чи є корені рівнянь (6), (7) системи (5) координатами екстремуму функції $E'_{1-3} = f(h_1, h_2)$, при $m_3 = 1$. З теорії відомо, що якщо $D > 0$ при $df''_{xy} > 0$, то функція $f(x, y)$ має мінімум, а для D стосовно наших умов рекомендується вираз:

$$D = \left(\frac{d^2E'_{1-3}}{dh_1^2} \right) \left(\frac{d^2E'_{1-3}}{dh_2^2} \right) - \left(\frac{d^2E'_{1-3}}{dh_1 dh_2} \right)^2 > 0.$$

Підготувавши потрібні складові:

$$\frac{d^2E'_{1-3}}{dh_1^2} = (M_{n1} + M_{n2}) > 0; \quad \frac{d^2E'_{1-3}}{dh_1 dh_2} = -M_{n2};$$

$$\frac{d^2E'_{1-3}}{dh_2^2} = (M_{n2} + M_{n3}),$$

запишемо:

$$\begin{aligned} D &= (M_{n1} + M_{n2})(M_{n2} + M_{n3}) - (-M_{n2})^2 = \\ &= M_{n1}M_{n2} + M_{n1}M_{n3} + M_{n2}M_{n3} > 0 \end{aligned}$$

З цього результату випливає, що витрати енергії стають мінімальними, якщо передклітьовий стан налаштувати так, щоб вихідні товщини смуг в першій і в другій клітях визначалися формулами (6) і (7). Інакше кажучи, форма запису (4) набуває значення критерію, тобто $E'_{1-k} \rightarrow \min$.

Наведемо зведену табл. 1 формул, в яких значення оптимальних вихідних товщин смуг виражено у вигляді відношення «чисельник/знаменник».

З табл. 1 виходить, що, наприклад, товщини смуг у клітях трьохклітьового стана при товщині підкату H повинні бути такими:

$$h_2 = \frac{M_{n1}M_{n2}H + (M_{n1} + M_{n2})M_{n3}h_3}{M_{n1}M_{n2} + M_{n1}M_{n3} + M_{n2}M_{n3}},$$

а товщина смуги в останній кліті дорівнює заданій товщині h_3 .

Аналіз табл. 1 дає ще один метод знаходження вихідних товщин через обтиск смуги. По ньому достатньо знайти товщину смуги після першої кліті, а далі скористатися формулами:

Зведені формули

Товщина	Кількість клітей стану	Чисельник значень h_3
1	2	3
h_1	2	$M_{n1}H + M_{n2}h_2$
	3	$(M_{n1}M_{n2} + M_{n1}M_{n3})H + M_{n2}M_{n3}h_3$
	4	$(M_{n1}M_{n2}M_{n3} + M_{n1}M_{n2}M_{n4} + M_{n1}M_{n3}M_{n4})H + M_{n2}M_{n3}M_{n4}h_4$
	5	$(M_{n1}M_{n2}M_{n3}M_{n4} + M_{n1}M_{n2}M_{n3}M_{n5} + M_{n1}M_{n2}M_{n4}M_{n5} + M_{n1}M_{n3}M_{n4}M_{n5})H + M_{n2}M_{n3}M_{n4}M_{n5}h_5$
h_2	2	h_2
	3	$M_{n1}M_{n2}H + (M_{n1} + M_{n2})M_{n3}h_3$
	4	$(M_{n1}M_{n2}M_{n3} + M_{n1}M_{n2}M_{n4})H + (M_{n1}M_{n3}M_{n4} + M_{n2}M_{n3}M_{n4})h_4$
	5	$(M_{n1}M_{n2}M_{n3}M_{n4} + M_{n1}M_{n2}M_{n3}M_{n5} + M_{n1}M_{n2}M_{n4}M_{n5}) \cdot H + (M_{n1} + M_{n2})M_{n3}M_{n4}M_{n5}h_5$
h_3	2	-
	3	h_3
	4	$M_{n1}M_{n2}M_{n3}H + (M_{n1}M_{n2} + M_{n1}M_{n3} + M_{n2}M_{n3})M_{n4}h_4$
	5	$(M_{n1}M_{n2}M_{n3}M_{n4} + M_{n1}M_{n2}M_{n3}M_{n5})H + (M_{n1}M_{n2} + M_{n1}M_{n3} + M_{n2}M_{n3})M_{n4}M_{n5}h_5$
h_4	2	-
	3	-
	4	h_4
	5	$M_{n1}M_{n2}M_{n3}M_{n4}H + (M_{n1}M_{n2}M_{n3} + M_{n1}M_{n2}M_{n4} + M_{n1}M_{n3}M_{n4} + M_{n2}M_{n3}M_{n4})M_{n5}h_5$
Знаменник значень h_3		
	2	$M_{n1} + M_{n2}$
	3	$M_{n1}M_{n2} + M_{n1}M_{n3} + M_{n2}M_{n3}$
	4	$M_{n1}M_{n2}M_{n3} + M_{n1}M_{n2}M_{n4} + M_{n1}M_{n3}M_{n4} + M_{n2}M_{n3}M_{n4}$
	5	$M_{n1}M_{n2}M_{n3}M_{n4} + M_{n1}M_{n2}M_{n3}M_{n5} + M_{n1}M_{n2}M_{n4}M_{n5} + M_{n1}M_{n3}M_{n4}M_{n5} + M_{n2}M_{n3}M_{n4}M_{n5}$

$$\Delta h_i = \frac{M_{n1}}{M_{ni}} \Delta h_1, \Delta h_2 = \frac{M_{n1}}{M_{n2}} \Delta h_1 \text{ і так далі,}$$

де $\Delta h_1 = H - h_1$.

З цих формул, наприклад, із запису

$$\Delta h_4 = \frac{M_{n3}}{M_{n4}} \Delta h_3 = \frac{M_{n1}}{M_{n4}} \Delta h_1 \text{ виходить, що зусил-$$

ля прокатки в клітках $P_1 = P_2 = \dots P_3$. Це важливий практичний висновок, який показує, що при дотриманні енергетичного критерію, зусилля прокатки у всіх клітках мають бути рівні один одному.

Цей висновок дозволяє створити алгоритми автоматизованого розрахунку налаштування режиму прокатки смуг з мінімальною витратою електроенергії.

Висновки

Проведено аналіз впливу технології виробництва і складу обладнання на основні складові енерговитрат. Проведено аналіз стану питання налаштування листового стану перед прокаткою та визначено енергетичний критерій для прокатки смуг. Встановлено, що при дотриманні енергетичного критерію, зусилля прокатки у всіх клітках мають бути рівні один одному.

Бібліографічний список

1. Целиков А. И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А. И. Целиков. – М.: Металлургия, 1963. – 494 с.

Поступила 10.12.2015