

О. П. Єгоров /к. т. н./, О. Ю. Потап /к. т. н./,
М. Ю. Кузьменко, В. О. Кузюков
О. П. Крячко /к. т. н./

Національна металургійна академія України,
м. Дніпро, Україна
НПО «Дніпрочорметавтоматика», м. Дніпро,
Україна
e-mail: dnecheravt@mail.ru

Дослідження налаштування листового стану за енергетичним критерієм на комп'ютерній моделі

О. Р. Egorov /Cand. Sci. (Tech.)/,
О. Yu. Potap /Cand. Sci. (Tech.)/,
М. Yu. Kuzmenko, V. O. Kuzyukov
О. Р. Kryachko /Cand. Sci. (Tech.)/

National Metallurgical Academy of Ukraine,
Dnipro, Ukraine

Research and Manufacturing Enterprise
Dneprchermetavtomatika, Dnipro, Ukraine
e-mail: dnecheravt@mail.ru

Research settings sheet as at energy criteria for computer models

Мета. Апробація методики ідентифікації математичної моделі прокатки та дослідження налаштування листового стану за енергетичним критерієм.

Методика. Системні дослідження щодо виявлення інформаційних характеристик об'єктів листового стану, що дозволяють ідентифікувати їх поточний стан, оцінити якісні і енергетичні характеристики технологічного процесу прокатки. Розробка принципів, методів та підходів до створення розподілених систем управління прокатними станами, що забезпечують енергозберігаюче управління на підставі ідентифікації їх поточного стану і параметрів технологічного процесу.

Результати. На комп'ютерній моделі проведено дослідження ефективності налаштування режиму обтиснень на безперервному листовому стані за критерієм мінімуму витрат енергії.

Наукова новизна. Розвиток теорії та практики моделювання процесу прокатки в умовах функціонування систем регулювання товщини та натягнення при налаштуванні листового стану за енергетичним критерієм.

Практична значущість. Запропонована методика лінеаризації моделі дозволяє суттєво спростити моделювання процесу прокатки в умовах функціонування систем регулювання товщини та натягнення. Доведено, що застосування запропонованого авторами методу оптимального розподілу обтиснень за клітьми дозволяє скоротити енергетичні витрати майже на 20 %. Запропонований алгоритм налаштування режиму прокатки дозволяє реалізувати його при створенні інтегрованих, розподільних систем управління листопрокатними станами. (Іл. 4. Табл. 4. Бібліогр.: 6 назв.)

Ключові слова: прокатка, оптимальний режим обтиснень, енергетичний критерій, лінеаризована модель, комп'ютерне моделювання.

Металургійна промисловість є однією з найбільш енергомістких галузей промисловості. Значна частка енергоресурсів, які споживаються у металургії, припадає на прокатне виробництво, зокрема на листопрокатні стани гарячої прокатки. В умовах істотного подорожчання енергії актуальність питань енергозбереження при прокатці стає незаперечною.

Одним з перспективних напрямів зниження енерговитрат при виробництві гарячекатаного листового прокату є оптимальний розподіл обтиснень за клітьми неперервного листового стану.

У праці [1] авторами було запропоновано енергетичний критерій та опрацьовано мето-

дику оптимального розподілу обтиснення за клітьми неперервного листового стану гарячої прокатки. Зазначена методика базується на припущенні про лінійну залежність жорсткості прокату M_n від обтиснення, яка при цьому має вигляд, наведений на рис. 1 (крива 1). Таке припущення дозволило суттєво спростити математичний опис задачі оптимізації і вирішити її в аналітичний спосіб з отриманням простих формул для визначення обтиснень в усіх клітьх неперервного стану.

Реальна крива пластичності, як відомо, має дещо інший вигляд (крива 2 на рис. 1), адже пластична деформація прокату не може відбу-

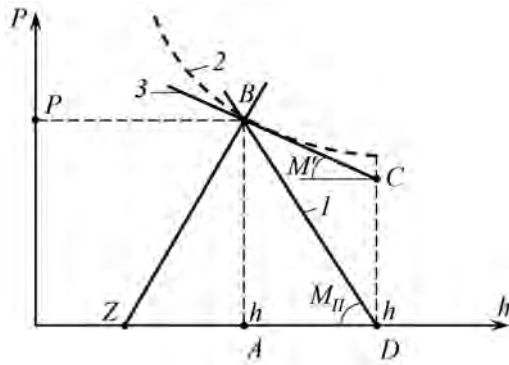


Рис. 1. До визначення енергії прокатки

ватися при малих значеннях зусилля прокатки і розпочинається лише за умов перевищення ним того значення, що відповідає порогу текучості металу.

Здійснивши лінійну апроксимацію фактичної кривої пластичності кривою 3 на рис. 1, тангенс кута нахилу якої дорівнює реальному значенню жорсткості прокату M'_{II} , ми отримуємо більш реалістичну модель процесу. За такою моделлю енергія, що витрачається на прокатку, являє собою площу прямокутної трапеції ABCD. На жаль, використання такої моделі для вирішення задачі оптимізації, на відміну від спрощеної моделі, що використовувалась в [1], є принципово неможливим через неможливість визначення площі зазначеної трапеції за величиною обтиснення $\Delta h = h_0 - h_1$ та жорсткості M'_{II} .

Проте зіставлення оптимізованих режимів обтиснення, отриманих за спрощеною моделлю визначення енергії прокатки, з реальними режимами прокатки, які були визначені на ді-

ючих станах гарячої та холодної прокатки шляхом поступового удосконалення впродовж тривалої практичної експлуатації [2, 3], виявляє їх суттєвий збіг з точністю до 1–4 %. Це дозволяє припустити, що коригування режиму обтиснення навіть за спрощеною методикою оптимізації може забезпечити значне зменшення витрат енергії на прокатку. Перевірка цього припущення здійснена шляхом комп'ютерного моделювання процесу прокатки у неперервній групі клітей стана гарячої прокатки.

Узагальнена структура моделі неперервної чистової групи клітей стана 2000 наведена на рис. 2. Модель містить сім типових блоків «Кл 1»...«Кл 7», що моделюють безпосередньо процес прокатки у клітях. Зокрема у цих блоках здійснюється обчислення товщини $h_{1,i}$ і температури $T_{1,i}$ прокату на виході із зони деформації, а також зусилля P_i та моменту M_i прокатки.

Товщина та температура прокату передаються з виходу відповідної кліті на вхід наступної за ходом прокатки кліті крізь блоки транспортного запізнення, які імітують часову затримку в пересуванні певної ділянки прокату у відповідному міжклітьовому проміжку.

З кожним блоком «Кл i» в моделі сполучено блок «CAPT i», що імітує роботу системи автоматичного регулювання товщини прокату за рівнянням Головіна – Сімса [4], забезпечуючи стабілізацію вертикального розміру прокату на заданому рівні, відповідно до визначеного режиму обтискання. На входи зазначених блоків надходить інформація про розрахункові та фактичні зусилля прокатки у кожній з клітей, а на

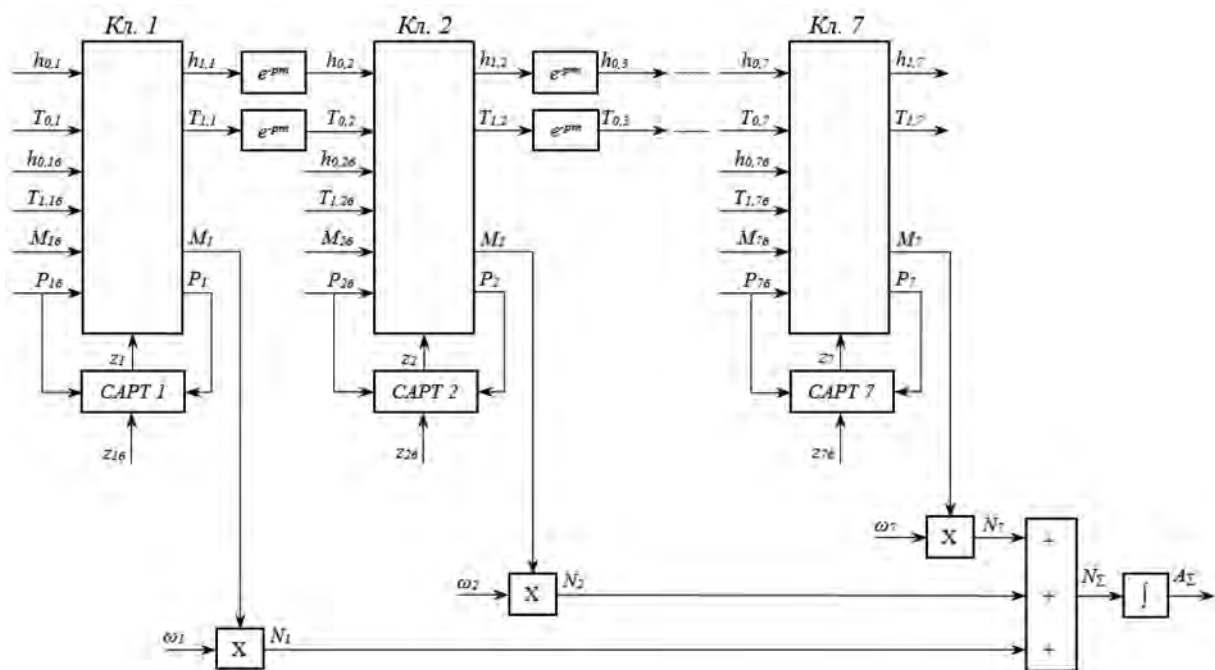


Рис. 2. Узагальнена схема моделі прокатки у чистовій групі клітей листопрокатного стана 2000

виходах формуються керуючі впливи у вигляді добавок до уставок міжвалкового зазору.

З огляду на мету моделювання, яка полягає у визначенні енергії, що витрачається на прокатку за умов застосування різних режимів обтискання, модель не містить блоків, що імітують стан прокату в міжклітьових проміжках. Їхня відсутність є цілком виправданою, адже, за висновками В. М. Видріна [5], сумарна робота (потужність) сил натягнення на неперервному прокатному стані дорівнює нулю, тобто ділянки смуги між клітьями виконують лише функції передавання енергії від однієї кліті до іншої, самі при цьому не створюють і не витрачають її. Виходячи з наявності на стані систем регулювання натягнення, які забезпечують якісну його стабілізацію у кожному міжклітьовому проміжку, можна не враховувати вплив натягнення на сумарні витрати енергії при прокатці. Зазначені міркування дозволили суттєво спростити модель, виключивши необхідність обчислення натягнення прокату.

В основу роботи моделі покладене припущення про лінійний характер залежності розрахункових технологічних параметрів від інших технологічних факторів, які в процесі прокатки зазнають змін у межах невеликих відхилень від їхніх базових значень. При цьому основними технологічними збуреннями визначено відхилення товщини і температури підкату. Таким чином, температура $T_{1,i}$ на виході з кліті, зусилля P_i та момент прокатки M_i визначаються в моделі за такими лінеаризованими формулами:

$$T_{1,i} = T_{1,i0} + \frac{\partial T_{1,i}}{\partial h_{0,i}}(h_{0,i} - h_{0,i0}) + \frac{\partial T_{1,i}}{\partial T_{0,i}}(T_{0,i} - T_{0,i0}), \quad (1)$$

$$P_i = P_{i0} + \frac{\partial P_i}{\partial h_{0,i}}(h_{0,i} - h_{0,i0}) + \frac{\partial P_i}{\partial T_{0,i}}(T_{0,i} - T_{0,i0}), \quad (2)$$

$$M_i = M_{i0} + \frac{\partial M_i}{\partial h_{0,i}}(h_{0,i} - h_{0,i0}) + \frac{\partial M_i}{\partial T_{0,i}}(T_{0,i} - T_{0,i0}), \quad (3)$$

де $T_{1,i0}$, $h_{1,i0}$, P_{i0} та M_{i0} – базові значення технологічних параметрів, а $\frac{\partial T_{1,i}}{\partial h_{0,i}}$, $\frac{\partial P_i}{\partial h_{0,i}}$, $\frac{\partial M_i}{\partial h_{0,i}}$ та $\frac{\partial T_{1,i}}{\partial T_{0,i}}$, $\frac{\partial P_i}{\partial T_{0,i}}$, $\frac{\partial M_i}{\partial T_{0,i}}$ – коефіцієнти моделі, що визначають вплив відхилень товщини ($h_{0,i} - h_{0,i0}$) та температури ($T_{0,i} - T_{0,i0}$) підкату на відповідні технологічні параметри.

Схема блоку «Кл i» реалізує рівняння (1)–(3), а також містить низку блоків множення, які виконують функцію ключів, що імітують завантаження кліті металом і вивільнення її по закінченні прокатки.

Обчислення товщини прокату на виході кліті здійснюється в моделі за рівнянням Головіна – Сімса:

$$h_{1,i} = Z_i + \frac{P_i}{M_{K,i}} \quad (4)$$

де Z_i – вихідний зазор між валками, а $M_{K,i}$ – модуль жорсткості i -ої кліті.

Для визначення базових значень геометричних та енергосилових параметрів доцільно скористатися методикою з праці [6], а для визначення температурних параметрів – рекомендаціями авторів праці [2].

Дослідження проводили для умов прокатки у клітьях чистової групи неперервного стану 2000 листа 1,5×1400 мм з вуглецевої сталі з вмістом вуглецю 0,27 % при товщині підкату $h_0 = 25$ мм та температурі підкату 920 °С. При цьому технічна характеристика клітей та режим обтискень відповідали даним праці [6]. Результати розрахунку базових параметрів прокатки наведено у табл. 1.

Для визначення коефіцієнтів лінеаризованої моделі (1)–(3) засобами MATLAB-Simulink відповідно до формул (5)–(16) було створено модель одиначної прокатної кліті. Подаючи по черзі на входи цієї моделі змінні у часі значення товщини та температури підкату, отримували графіки залежності параметрів $T_{1,i0}$, P_{i0} та M_{i0} від цих змінних. При цьому товщину підкату змінювали у межах ±10% від базового значення товщини на вході кожної кліті, а температуру підкату – в межах ±5% від базового значення температури на вході кожної кліті (табл. 2).

Для урахування впливу зміни швидкості прокатки, що супроводжує зміну обтискення через варіювання товщиною підкату, в моделі здійснювали поточне коригування частоти обертання валків, виходячи із закону постійності секундного об'єму.

Значення коефіцієнту $\frac{\partial P_i}{\partial h_{0,i}}$ являє собою модуль жорсткості прокату у відповідній кліті:

$$M_{П,i} = \frac{\partial P_i}{\partial h_{0,i}}. \quad (5)$$

На базі визначених коефіцієнтів лінеаризованої моделі відповідно до формул (1)–(3) та структурної схеми (рис. 2) в середовищі MATLAB-Simulink було створено модель 7-клітьової групи клітей.

За результатами моделювання процесів завантаження неперервної групи клітей, прокатки смуги (машинний час прокатки – 15 с) та вивільнення клітей для умов неоптимізованого режиму обтискень (див. табл. 1) визначено роботу прокатки, яка становить $A_{np} = 0,74$ ГДж.

Базуючись на визначених модулях жорсткості прокату, опрацьована методика оптимізації дозволяє здійснити перерозподіл обтискень у

Результати розрахунку базових значень параметрів прокатки у чистових клітках стана 2000

Параметри	Од. вимір.	Номер кліті						
		1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Абсолютне обтиснення, $\Delta h = h_0 - h_1$	мм	12,4	5,3	2,9	1,4	0,7	0,5	0,3
Кут захвату, α	рад	0,176	0,115	0,085	0,059	0,042	0,035	0,027
Довжина зони деформації, l_d	мм	70,2	46,0	34,0	23,7	16,7	14,1	11,0
Коефіцієнт зовнішнього тертя, μ	-	0,31	0,20	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18
Напруження текучості, σ_T	МПа	176,1	192,4	224,6	250,5	268,8	309,5	331,6
Середній контактний тиск, p_{cp}	МПа	425,4	464,8	542,3	604,9	649,2	747,4	800,8
Площа контактної поверхні, F	мм ²	98220	64350	47640	33120	23420	19800	15330
Випередження, S	-	0,13	0,09	0,09	0,08	0,06	0,06	0,04
Коефіцієнт плеча моменту, ψ	-	0,34	0,36	0,36	0,38	0,40	0,40	0,41
Температура підкату, T_0	°С	920	916,7	907,4	896,2	880,4	860,8	841,2
Базові значення параметрів для моделі								
Товщина підкату, $h_{0,б}$	мм	25,0	12,6	7,3	4,4	3,0	2,3	1,8
Температура прокату на виході з кліті, $T_{1,б}$	°С	916,7	907,4	896,3	880,4	860,8	841,2	820,2
Зусилля прокатки, $P_б$	МН	41,78	29,91	25,83	20,03	15,21	14,8	12,28
Момент прокатки, $M_б$	КН м	2003	1006	657,5	369,3	205,2	169,9	111,1

Таблиця 2

Діапазон варіювання товщини та температури підкату при визначенні коефіцієнтів лінеаризованої моделі

Показник	Номер кліті						
	1	2	3	4	5	6	7
$h_{0,min}$, мм	20,0	11,0	7,0	4,5	3,0	2,2	1,6
$h_{0,б}$, мм	25,0	13,5	8,5	5,5	3,75	2,7	2,0
$h_{0,max}$, мм	30,0	16,0	10,0	6,5	4,5	3,2	2,4
$T_{0,min}$, °С	897,0	893,8	884,7	873,8	858,4	839,3	820,2
$T_{0,б}$, °С	920,0	916,7	907,4	896,2	880,4	860,8	841,2
$T_{0,max}$, °С	943,0	939,6	930,1	918,6	902,4	882,3	862,2

кожній з клітей неперервної групи за критерієм мінімуму енергії, що витрачається на прокатку. За цією методикою товщина підкату на виході з першої кліті може бути визначена з праці [1] за формулою:

$$h_{1,1} = \frac{(M_{П,1}M_{П,2}M_{П,3}M_{П,4}M_{П,5}M_{П,6} + M_{П,1}M_{П,2}M_{П,3}M_{П,4}M_{П,5}M_{П,7} + M_{П,1}M_{П,2}M_{П,3}M_{П,4}M_{П,6}M_{П,7} + M_{П,1}M_{П,2}M_{П,3}M_{П,5}M_{П,6}M_{П,7} + M_{П,1}M_{П,2}M_{П,4}M_{П,5}M_{П,6}M_{П,7} + M_{П,1}M_{П,3}M_{П,4}M_{П,5}M_{П,6}M_{П,7})h_{0,1} + M_{П,2}M_{П,3}M_{П,4}M_{П,5}M_{П,6}M_{П,7}h_{1,7}}{M_{П,1}M_{П,2}M_{П,3}M_{П,4}M_{П,5}M_{П,6} + M_{П,1}M_{П,2}M_{П,3}M_{П,4}M_{П,5}M_{П,7} + M_{П,1}M_{П,2}M_{П,3}M_{П,4}M_{П,6}M_{П,7} + M_{П,1}M_{П,2}M_{П,3}M_{П,5}M_{П,6}M_{П,7} + M_{П,1}M_{П,2}M_{П,4}M_{П,5}M_{П,6}M_{П,7} + M_{П,1}M_{П,3}M_{П,4}M_{П,5}M_{П,6}M_{П,7} + M_{П,2}M_{П,3}M_{П,4}M_{П,5}M_{П,6}M_{П,7}} = 15,37 \text{ (мм)} \tag{6}$$

Оптимальне обтискання у кожній наступній кліті має визначатися за виразом:

$$\Delta h_i = \frac{M_{П,1}}{M_{П,i}} \Delta h_1 \tag{7}$$

На рис. 3 наведено графік зміни роботи A_{np} у часі.

Оптимізований у такий спосіб режим обтиснень наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Вихідний та оптимізований режим обтиснень

Показник	Номер кліті						
	1	2	3	4	5	6	7
$h_{1,i}$, мм за базовим режимом	12,6	7,3	4,4	3,0	2,3	1,8	1,5
$h_{1,opt,i}$, мм за оптимізованим режимом	15,37	9,85	6,41	4,37	3,09	2,16	1,5

Для моделювання прокатки з оптимальним режимом обтиснень необхідно скоригувати міжвалкові зазори. При цьому нове значення зазору z_{opt} може бути визначене відповідно до розрахункової схеми (рис. 4) за формулою:

$$z_{opt,i} = z_i + \Delta z_i = z_i + \frac{M_{\Pi,i} + M_K}{M_K} M_{\Pi,i} (h_{1i} - h_{1opt,i}) \quad (8)$$

Одночасно з коригуванням міжвалкових зазорів необхідно скоригувати базові значення зусиль прокатки, які відповідно до рис. 4 можна визначати за формулою:

$$P_{бopt,i} = P_{бi} + \Delta P_{бi} = P_{бi} + M_{\Pi,i} (h_{1i} - h_{1opt,i}) \quad (9)$$

та частоту обертання валків, адже зміна обтиснення впливає на зміну швидкості прокатки:

$$\omega_{opt,i} = \omega_i \frac{h_{1i}}{h_{1opt,i}} \quad (10)$$

Скориговані відповідно до (8)–(10) параметри моделі наведено в табл. 4.

За результатами моделювання оптимізованого процесу робота прокатки становить $A_{np\ opt} = 0,59$ ГДж, тобто енерговитрати на прокатку скоротилися майже на 20 %.

Висновки. Розроблено модель прокатки у чистовій групі неперервного широкосмугового ста-

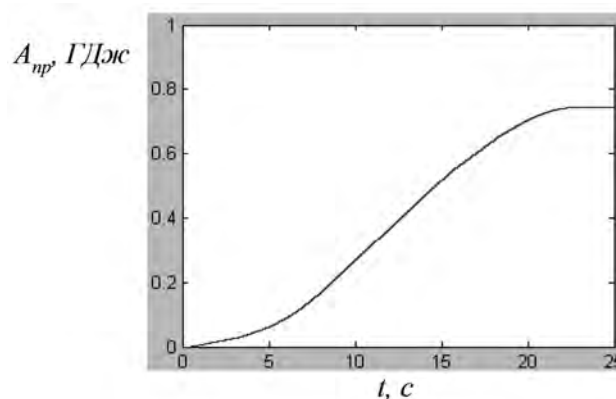


Рис. 3. Зміна у часі роботи прокатки

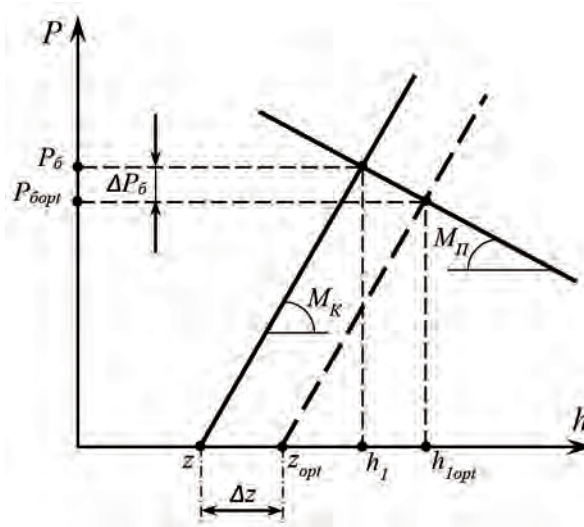


Рис. 4. До визначення скоригованого міжвалкового зазору та базового значення зусиль прокатки

на гарячій прокатки та доведено її адекватність. Розроблено лінеаризовану модель для визначення інтегральної роботи при прокатці окремої смуги. Запропонована методика лінеаризації моделі дозволяє суттєво спростити моделювання процесу прокатки в умовах функціонування систем регулювання товщини та натягнення. Розрахунки, проведені за методикою налаштування листового стану за енергетичним критерієм, були випробувані на комп'ютерній моделі

Таблиця 4

Вихідні та оптимізований параметри моделі

Показник		Номер кліті						
		1	2	3	4	5	6	7
Базовий режим	z_i , мм	7,69	3,78	1,36	0,64	0,51	0,06	0,055
	$P_{бi}$, МН	41,78	29,91	25,83	20,03	15,2	14,8	12,28
	ω_i , c^{-1}	5,18	8,95	14,88	21,88	28,53	36,45	43,75
Оптимізований режим	$z_{opt,i}$, мм	11,16	7,40	4,72	3,56	2,74	1,31	0,055
	$P_{бopt,i}$, МН	36,08	20,87	14,37	6,89	3,03	7,23	12,28
	$\omega_{opt,i}$, c^{-1}	5,18	7,33	11,02	15,01	19,58	27,13	36,46

в пакеті Matlab-Simulink. Дослідження показали, що параметри налаштування стана за критерієм мінімізації енергії зменшують енерговитрати майже на 20 % порівняно з даними [2; 3].

Бібліографічний список / References

1. Egorov V. Optimization of setting process of continuous sheet rolling / V. Egorov, A. Egorov, O. Potap, O. Kryachko, V. Kuvaev, M. Kuzmenko // Metallurgical & Mining Industry. – 2016. – № 6. – С. 14–19.

Egorov V., Egorov A., Potap O., Kryachko O., Kuvaev V., Kuzmenko M. (2016). *Optimization of setting process of continuous sheet rolling*. Metallurgical & Mining Industry. No. 6, pp. 14-19.

2. Григорян Г. Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки / Г. Г. Григорян, Ю. Д. Железнов, В. А. Черный и др. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

Grigoryan G. G., Zheleznov Yu. D., Chernyj V. A. (1975). *Nastrojka, stabilizaciya i kontrol' processa tonkolistovoj prokatki* [Setting, stabilization and control of the process of sheet rolling]. Moscow, Metallurgiya. (In Russian).

3. Меерович И. М. Повышение точности листового проката / И. М. Меерович, А. И. Герцев, В. С. Горелик и др. – М., 1969. – 262 с.

Meerovich I. M., Gercev A. I., Gorelik V. S. (1969). *Povyshenie tochnosti listovogo prokata* [Improving the accuracy of sheet metal]. Moscow, 262 p. (In Russian).

4. Егоров А. П. Моделирование системы управления толщиной полосы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки: учеб. пособие / А. П. Егоров, В. С. Егоров, М. И. Ханин, О. Е. Потап и др. – Днепропетровск: НМетАУ, 1999. – 76 с.

Egorov A. P., Egorov V. S., Hanin M. I., Potap O. E. (1999). *Modelirovanie sistemy upravleniya tolshchinoj polosy nepreryvnogo shirokopolosnogo stana goryachej prokatki* [Modeling control systems for strip]. Dnepropetrovsk, 76 p.

5. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов / В. Н. Выдрин. – Свердловск: Металлургиздат, 1960. – 256 с.

Vydrin V. N. (1960). *Dinamika prokatnyh stanov* [Dynamics of rolling mills]. Sverdlovsk, Metallurgizdat, 256 p. (In Russian).

6. Жучин В. Н. Расчет усилий при непрерывной горячей прокатке / В. Н. Жучин, Г. С. Никитин, Я. С. Шварцбарт, И. Г. Зуев. – М.: Металлургия, 1986. – 198 с.

Zhuchin V. N., Nikitin G. S., Shvarcbart Ya. S., Zuev I. G. (1986). *Raschet usilij pri nepreryvnoj goryachej prokatke* [Calculation of forces in continuous hot rolling]. Moscow, Metallurgiya, 198 p. (In Russian).

Purpose. *Approbation of methodology of mathematical rolling model identification and research of sheet mill setting by energy criteria*

Methodology. *System studies of identification of the sheet mill facilities informational characteristics, that allow to identify their running status, and to evaluate quality characteristics and energy response of the rolling process. Development of principles, methods and approaches to creation of the distributed control systems of rolling mills, that provide energy-saving control based on the identification of the running status and process parameters.*

Findings. *The research of setting operation mode effectiveness of cobbing on continuous sheet rolling mill by energy minimum criterion was carried out on the computer model.*

Originality. *Development of the theory and practice of rolling process modeling in conditions of functioning regulatory systems of thickness and tension with sheet-rolling mill setting on energy criteria.*

Practical value. *The suggested linearization technique allows to greatly simplify the modeling of rolling process modeling with a functioning regulatory systems of thickness and tension. It is shown that the application of the proposed by the authors method of the optimum allocation of sheet mill stand cobbing can cut energy costs in nearly 20 %.*

Key words: *rolling, optimum cobbing, energy criteria, linearized model, computer modeling.*

**Рекомендована до публікації
к. т. н. А. П. Крячко**

Поступила 26.01.2017

