

УДК 621.771.01

**І. Ю. Приходько**<sup>1</sup>, д.т.н, с.н.с., зав. відділом, ORCID 0000-0001-5651-8106**С. О. Воробей**<sup>1</sup>, д.т.н, с.н.с., ORCID 0000-0003-0119-3935**В. В. Разнослін**<sup>1</sup>, м.н.с., ORCID 0000-0002-4463-4588<sup>1</sup> *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

## ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ РІЗНОТОВЩИНОСТІ ТОВСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ

**Анотація.** Мета роботи - розробити науково-технічні пропозиції по зменшенню повздовжньої та поперечної різнотовщинності товстих листів при прокатці на товстолистових станах. В останні роки спостерігається постійне підвищення вартості енергоносіїв, загострення конкуренції між виробниками сталевого прокату. Тому підвищення ефективності процесу прокатки листів шляхом зменшення різнотовщинності та зниження витратного коефіцієнта є актуальною задачею. В Інституті чорної металургії НАН України досліджували можливість вирішення цієї задачі в умовах одного з товстолистових станів 3600. Проведено експериментальні та аналітичні дослідження формування повздовжньої та поперечної різнотовщинності товстих листів. Підтверджено відомий факт, що основний чинник формування повздовжньої різнотовщинності – це коливання сили прокатки. Листи, які вироблені на стані 3600, мають середню повздовжню різнотовщинність 0,35 – 0,58 мм (середньозважене значення по всьому сортаменту 0,520 мм). Основними факторами, що впливають на поперечну різнотовщинності є прогин валків, сплющування робочих валків в контакт з штабом, знос валків. Середня поперечна різнотовщинність складає 0,10 – 0,35 мм (у середньому 0,25 мм). Експериментально встановлено вплив маси монтажної партії листів на знос робочих валків і, відповідно, на профіль поперечного перерізу листів. В результаті проведених досліджень запропоновано три напрямки вирішення задачі зі зменшення різнотовщинності листів: 1) регламентування припуску на товщину прокату з урахуванням фактичних даних про повздовжню різнотовщинність листів за групами сортаменту; 2) впровадження експертної системи корекції заданої кінцевої товщини листів на комп'ютері регулятора чистової кліті; 3) забезпечення раціональних значень опуклості поперечного профілю листів. З метою зменшення опуклості поперечного перерізу листів проведено експериментальне дослідження застосування опуклих робочих валків в чистовій кліті замість валків з циліндричним профілем. Це забезпечило зниження середньої опуклості профілю поперечного перерізу листів приблизно від середнього вихідного рівня 0,25 мм до очікуваного 0,15 мм, і, відповідно, збільшення виходу придатного на 0,3 %, а також зменшення хвилястості листів. Рекомендовано впровадити в постійну експлуатацію в чистовій кліті товстолистового стану 3600 опуклі робочі валки (опуклість верхнього валка 0,15 мм, нижнього 0,10 мм).

**Ключові слова:** товстолистовий прокат, повздовжня та поперечна різнотовщинність, сила прокатки, знос валків.

**Посилання для цитування:** Приходько І. Ю., Воробей С. О., Разносілін В. В. Шляхи зменшення різнотовщинності товстолистового прокату. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 349-357. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-349-357>

**Вступ.** Підвищення вартості енергоносіїв, загострення конкуренції між виробниками сталевого прокату, потребує постійної роботи над підвищенням якості продукції, зниженням витрат металу для її виробництва. Зокрема це стосується і прокату, який виробляється на товстолистових станах (ТЛС).

У зв'язку з цим, підвищення ефективності процесу прокатки листів шляхом зменшення різнотовщинності та зниження витратного коефіцієнта є актуальною задачею.

**Мета роботи** – розробити науково-технічні пропозиції по зменшенню повздовжньої та поперечної різнотовщинності товстих листів при прокатці на товстолистових станах.

**Результати роботи.** Можливість вирішення цієї задачі досліджували в умовах одного з товстолистових станів 3600.

В табл. 1 наведено середні значення повздовжньої різнотовщинності листів. Середньозважене значення по всьому сортаменту 0,520 мм.

Таблиця 1 - Середні значення повздовжньої різнотовщинності листів.

Товщина листів, мм	Середня повздовжня різнотовщинність листів, мм при ширині, мм		
	від 800 до 1650	більше 1650 до 2500	більше 2500 до 3350
від 5 до 8	0,384	0,384	0,312
більше 8 до 12	0,576	0,564	0,504
більше 12 до 18	0,552	0,435	0,552
більше 18 до 28	0,363	0,582	0,623
більше 28 до 42	0,461	0,540	0,511

Повздовжня різнотовщинність листів у загальному випадку залежить від абсолютного значення сили прокатки та її розкиду при однаковому обтисненні, величини модуля жорсткості кліті, сумарного биття валкової системи та вихідної повздовжньої різнотовщинності листа [1-3].

Приклад розподілу сили прокатки і товщини листів по їх довжині (повздовжня різнотовщинність) наведен на рис. 1.

Коефіцієнт природного вирівнювання відносної повздовжньої різнотовщинності  $k_B$  можна визначити на підставі методики Меєровича І.М. в залежності від модуля жорсткості кліті, пластичного модуля жорсткості листа, сумарного биття валків, повздовжньої різнотовщинності листа на вході у прокатну кліть ( $\delta h_0$ ) сили прокатки та товщини листа до і після прокатки ( $h_0, h_1$ ) [4].

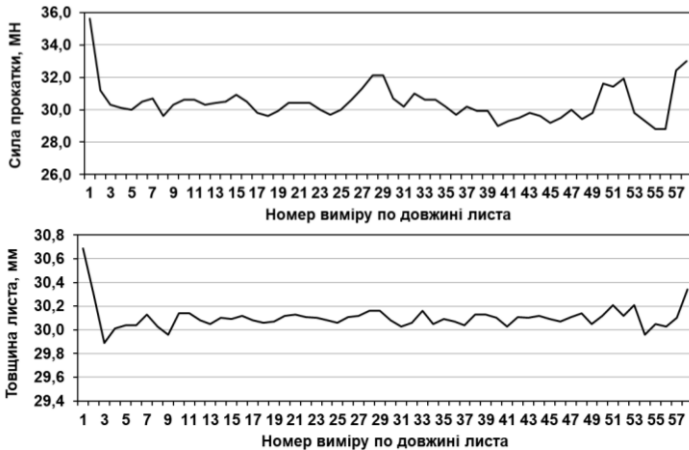


Рисунок 1 - Розподіл сили прокатки і товщини листів номінальної товщини 30 мм по їх довжині (повздовжня різнотовщинність).

Без урахування роботи системи автоматичного регулювання товщини листа поздовжня різнотовщинність на виході з кліті ( $\delta h_1$ ) знаходиться за формулою  $\delta h_1 = \delta h_0 \cdot h_1 / (k_B \cdot h_0)$ .

Поперечна різнотовщинність листів у загальному випадку залежить від прогину валків, сплющування робочих валків в контактi зі штабою, зносу валків [5, 6]. За результатами вимірювань на ТЛС 3600 фактичні значення опуклості листів (яка є основною складовою поперечної різнотовщинності листів) складають 0,10-0,35 мм (рис. 2), у середньому 0,25 мм.

За період прокатки монтажної партії листів профіль валків змінюється за рахунок їх зносу (рис. 3). На рис. 4 наведена залежність зносу валків від маси монтажної партії.

Таким чином, аналіз показує, що поступовий знос валків призводить до того, що величина опуклості поперечного профілю листів однакової товщини, ширини і марки сталі буде збільшуватися. Це буде супроводжуватись виникненням крайової хвилястості листів, яку на певному етапі стане неможливим компенсувати у допустимому діапазоні регулювання противигіну валків.

Для усунення такого результату монтажну партію прокату формують, як правило, від широких листів до вузьких і від тонких листів до товстих. Це дозволяє компенсувати вплив зносу валків шляхом зменшення сили прокатки, і, відповідно, прогину валків, за рахунок чого зменшується опуклість поперечного профілю листів.

На ТЛС 3600 вплив зносу валків компенсують за рахунок збільшення товщини листів (рис. 5).

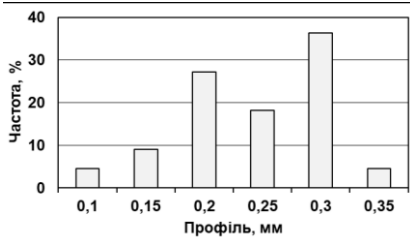


Рисунок 2 – Гістограма розподілу значень профіля поперечного перерізу листів.

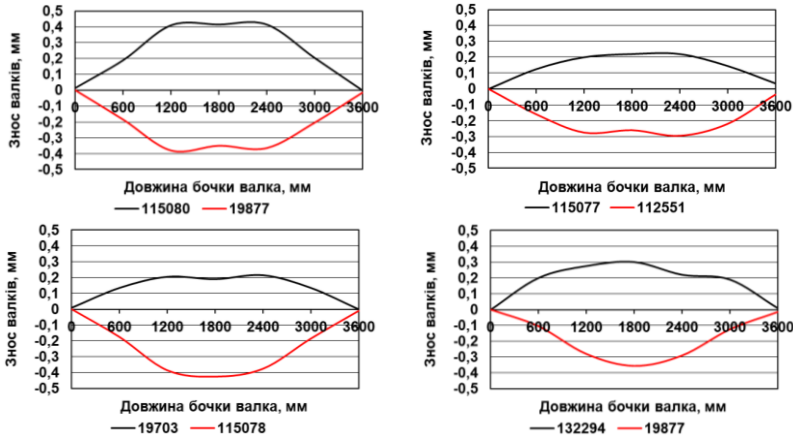


Рисунок 3 – Приклади результатів вимірювання зносу валків ТЛС 3600.

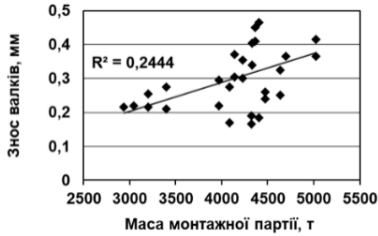


Рисунок 4 – Залежність зносу валків від маси монтажної партії.

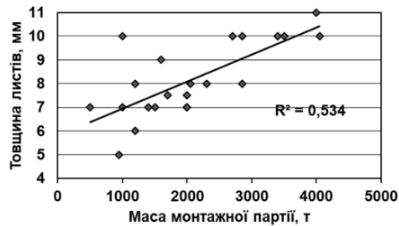


Рисунок 5 – Зміна номінальної товщини листів по мірі прокатки монтажної партії.

Для підвищення ефективності процесу прокатки листів шляхом зменшення різновтовщинності та зниження витратного коефіцієнту нами <sup>1)</sup> були запропоновані наступні шляхи.

<sup>1)</sup> Рішення щодо підвищення точності прокату розроблено разом із Кротом П.В.

1. *Регламентування припуску на товщину прокату з урахуванням фактичних даних про повздовжню різнотовщинність листів за групами сортаменту.*

Чинним алгоритмом керування ТЛС 3600 передбачено наступні припуски на товщину листів (табл. 2).

Таблиця 2 - Припуски на товщину листів у чинному алгоритмі керування ТЛС 3600.

Товщина листів, мм	Припуск на товщину, мм	Товщина листів, мм	Припуск на товщину, мм
від 5 до 10	+0,5	більше 25 до 40	+0,8
більше 10 до 15	+0,6	більше 40 до 80	+0,9
більше 15 до 25	+0,7	більше 80	+1,1

Припуски на товщину більшості типорозмірів листів перевищують максимальні значення повздовжньої різнотовщинності (див. табл. 1). Відповідне зменшення припусків дозволить отримати від 0,5 до 4,0 % економії металу в залежності від сортаменту листів.

2. *Впровадження експертної системи корекції заданої кінцевої товщини листів на комп'ютері регулятора чистової кліті.*

Це дозволить стабілізувати товщину листів на мінімальному допустимому рівні.

В експертній комп'ютерній системі реалізується алгоритм корекції заданої кінцевої товщини листів, який дозволяє зменшити втрати металу з надмірною товщиною листів. Тобто зменшується вплив ділянок, де товщина на кромках листів перевищує значення товщини, обчислене з урахуванням мінусового поля допуску і припусків на подальшу термічну обробку та зачистку поверхні.

Можливе зменшення середньої товщини листів на ТЛС 3600 оцінюється нами величиною 0,3-0,5 %.

3. *Забезпечення раціональних значень опуклості поперечного профілю листів.*

Оператори чистової кліті здійснюють підбір числа проходів та режиму обтискань шляхом встановлення різних цільових значень опуклості поперечного профілю листів. Це єдиний спосіб впливу на параметри обтискань в автоматичному режимі. Однак надмірна опуклість поперечного профілю листа – це необґрунтована підвищена витрата металу.

Технологічно необхідна мінімальна опуклість поперечного профілю листів, яка закладена розробником системи керування технологічним процесом на стані 3600, становить 0,05 мм. Дійсно, ця величина гарантує стабільність положення листа по осі прокатки. Все, що вище цього значення – це або необґрунтовані втрати металу, або

ризик одержання товщини кромки листів за межами поля мінусового допуску.

Наші оцінки показують, що перевищення опуклості поперечного профілю листів відносно технологічно необхідного значення на величину 0,2 мм еквівалентно додатковому необґрунтованому припуску на товщину листа в середньому на 0,1 мм.

Для вирішення цієї задачі нами було запропоновано використовувати в чистовій кліті ТЛС 3600 опуклі робочі валки замість валків з циліндричним профілем, які застосовувались на цьому стані.

На першому етапі досліджень в результаті розрахунків параметрів процесу формування профіля поперечного перерізу листів сортаменту ТЛС 3600 було запропоновано застосувати циліндричний нижній валок і опуклий верхній. З урахуванням запасу на можливу похибку величину опуклості задавали 0,15 мм.

При дослідному прокатуванні листів із застосуванням цих валків профіль верхнього валка задавали в систему керування станом. Крім цього, оператори задавали зменшену цільову опуклість профіля поперечного перерізу листів (0,10-0,15 мм).

Експериментальні дослідження супроводжувались виміром поперечного профілю прокатаних листів, спостереженням за зменшенням хвилястості листів.

Перше випробування одного профільованого валка не створило жодних проблем, але виявило тенденцію поліпшення показників площинності листів, а також зменшило витрати металу.

Після першого успішного застосування одного профільованого валка в подальшому було запропоновано використовувати також випуклий нижній робочий валок з величиною опуклості 0,10 мм.

На рис. 6 наведено графіки вихідного та зношеного профілю валків другого експериментального комплекту (задана вихідна опуклість верхнього валка 0,15 мм, нижнього 0,10 мм).

Використання профільованих валків забезпечило зниження середньої опуклості профілю поперечного перерізу листів приблизно від середнього вихідного рівня 0,25 мм до очікуваного 0,15 мм, що забезпечує зменшення середньої товщини листів на 0,05 мм. При середній номінальній товщині листів 16 мм збільшення виходу придатного становитиме 0,3 %. Також спостерігалось зменшення хвилястості листів орієнтовно на 5-10 %.

В результаті проведених досліджень рекомендовано впровадити в постійну експлуатацію в чистовій кліті ТЛС 3600 опуклі робочі валки (опуклість верхнього валка 0,15 мм, нижнього 0,10 мм).

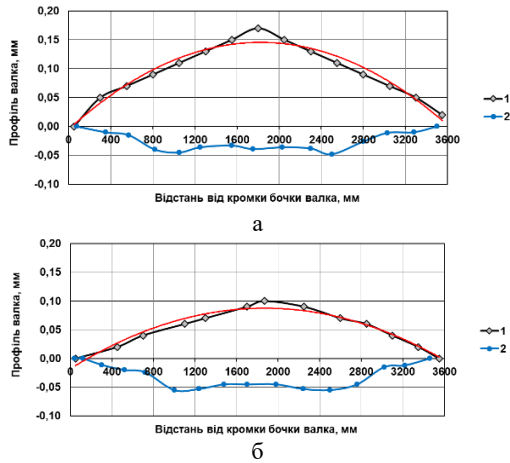


Рисунок 6 - Графіки вихідного (1) та зношеного (2) профілю другого комплекту профільованих верхнього (а) та нижнього (б) валків.

## Висновки

1. Досліджено формування повздовжньої та поперечної різнотовщинності листів, що прокатують на товстолистовому стані 3600. Показана можливість підвищення точності прокату і економії металу за цей рахунок.

2. В результаті проведеного аналізу запропоновано наступні рішення по підвищенню точності прокату:

- регламентування припуску на товщину прокату з урахуванням фактичних даних про повздовжню різнотовщинність листів за групами сортаменту;
- впровадження розробленої експертної системи корекції заданої кінцевої товщини листів на комп'ютері регулятора чистової кліті;
- забезпечення раціональних значень опуклості поперечного профілю листів.

3. З метою зменшення опуклості поперечного перерізу листів проведено експериментальне дослідження застосування опуклих робочих валків в чистовій кліті замість валків з циліндричним профілем. Це забезпечило зниження середньої опуклості профілю поперечного перерізу листів приблизно від середнього вихідного рівня 0,25 мм до очікуваного 0,15 мм, і, відповідно, збільшення виходу придатного на 0,3 %, а також зменшення хвилястості листів.

4. Рекомендовано впровадити в постійну експлуатацію в чистовій кліті ТЛС 3600 опуклі робочі валки (опуклість верхнього валка 0,15 мм, нижнього 0,10 мм).

### Перелік посилань

1. Полухин В. П. *Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станков*. М. : Металлургия, 1972. 512 с.
2. *Повышение точности прокатки листов и полос* / Коновалов Ю. В., Руденко Е. А., Гринчук П. С. и др. К. : Техніка, 1987. 144 с.
3. Коновалов Ю. В. *Справочник прокатчика. Справочное издание*. [в 2 кн.] М. : Теплотехник. Кн. 1: Производство горячекатаных листов и полос. 2008. 640 с.
4. *Повышение точности листового проката* / И. Н. Меерович, А. И. Герцев, В. С. Горелик, Э. Я. Классен. М. : Металлургия. 1969. 264 с.
5. Хохлов В. И., Воробей С. А. Изменение поперечного профиля горячекатаных полос за компанию валков ШСГП. *Теория и технология производства листового проката*: Сб. научн. тр. М. : Металлургия. 1991. С. 37-42.
6. Воробей С. О. Прогнозування площинності гарячекатаних штаб / *Збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-технічної конференції «Наука і металургія» 22-24 листопада 2022 р. м. Дніпро*. С. 66-67. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-conferens>

### References

1. Polukhin, V. P. (1972). *Mathematical modeling and computer calculation of sheet rolling mills*. Metallurgy
2. Konovalov, Yu. V., Rudenko, E. A., Grinchuk, P. S. et al. (1987). *Increasing the accuracy of rolling sheets and strips*. Tekhnika
3. Konovalov, Yu. V. (2008). *Directory of the distributor. Reference edition*. Book 1. Production of hot rolled sheets and strips. Teplotechnic
4. Meerovich, I. N., Gertsev, A. I., Gorelik, V. S., & Classen, E. Ya. (1969). *Increasing the accuracy of rolled sheets*. Metallurgy
5. Khokhlov, V. I., & Vorobei, S. O. (1991). Changing the transverse profile of hot-rolled strips for the roll company. *Theory and technology of sheet metal production*. Metallurgy
6. Vorobei, S. O. (2022). Prediction of flatness of hot-rolled strip. *Collection of abstracts of reports of the All-Ukrainian Scientific and Technical Conference "Science and Metallurgy". November 22-24. Dnipro*, pp 66-67. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-conferens>

**I. Yu. Prykhodko**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Senior Research, Head of Department, ORCID 0000-0001-5651-8106

**S. O. Vorobei**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Senior Research, ORCID 0000-0003-0119-3935

**V. V. Raznosilin**<sup>1</sup>, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-4463-4588

<sup>1</sup> *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

### WAYS TO REDUCE THE THICKNESS VARIATION OF THICK SHEETS ROLLING

**Abstract.** The purpose of the work is to develop scientific and technical proposals for reducing the longitudinal and transverse thickness variations of thick sheets when rolling on thick sheet mills. In recent years, there has been a constant increase in the cost of energy resources and increased competition between producers of rolled steel.

*"Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії". 2023. Випуск 37*  
*"Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy". 2023. Collection 37*



Therefore, increasing the efficiency of the sheet rolling process by reducing the thickness variation and reducing the consumption coefficient is an urgent task. The Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine investigated the possibility of solving this problem in the conditions of one of the 3600 plate mills. Experimental and analytical studies of the formation of longitudinal and transverse thickness variations in thick sheets were carried out. The well-known fact has been confirmed that the main factor in the formation of longitudinal thickness variations is the fluctuation of the rolling force. Sheets produced on the 3600 mill have an average longitudinal thickness variation of 0.35-0.58 mm (the weighted average value for the entire assortment is 0.52 mm). The main factors influencing the transverse thickness variation are roll deflection, flattening of work rolls in contact with the strip, and roll wear. The average transverse thickness variation is 0.10-0.35 mm (the average for the assortment is 0.25 mm). The influence of the mass of the assembly batch of sheets on the wear of work rolls and, accordingly, the cross-sectional profile of the sheets was experimentally established. As a result of the research, three directions for solving the problem of reducing the variation in thickness of sheets were proposed: 1) regulating the allowance for the thickness of rolled products, taking into account actual data on the longitudinal variation in thickness of sheets by assortment groups; 2) implementation of an expert system for correcting the specified final thickness of sheets on the computer of the finishing stand regulator; 3) ensuring optimal values of convexity of the transverse profile of sheets. In order to reduce the convexity of the cross-section of the sheets, an experimental study was carried out on the use of convex work rolls in the finishing stand instead of rolls with a cylindrical profile. This ensured a decrease in the average convexity of the cross-sectional profile of the sheets from approximately the average initial level of 0.25 mm to the expected 0.15 mm and, accordingly, an increase in the yield of suitable by 0.3%, as well as a decrease in the waviness of the sheets. It is recommended to introduce convex work rolls into continuous operation in the finishing stand of thick-sheet condition 3600 (convexity of the upper roll is 0.15 mm, the lower one is 0.10 mm).

**Key words:** thick sheet rolling, longitudinal and transverse thickness variation, rolling force, roll wear

**For citation:** Prykhodko, I. Yu., Vorobei, S. O., & Raznosilin, V. V. Ways to reduce the thickness variation of thick sheets rolling. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 349-357. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-349-357>

*Стаття надійшла до редакції збірника 25.09.2023 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*