

В.В. Слесарев, Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа

**ЗАСТОСУВАННЯ ТЕНЗОМЕТРИЧНИХ ДАТЧИКІВ В СИСТЕМІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ КЕРУВАННЯ СОРТОПРОКАТНИМ ВИРОБНИЦТВОМ**

*Анотація:* В статті проаналізовано можливий вплив на якісний показник виробництва можливих помилок вимірювання на кожному етапі технологічного циклу. Обґрунтована необхідність впровадження системи автоматичного керування розливкою в складі загальної СППР керування сортопрокатним виробництвом.

*Ключові слова:* розливка, керування, зливки, витратний коефіцієнт металу, ваги, датчик, прокат.

**Вступ.** Основним критерієм, за яким оцінюється ефективність металургійного виробництва, зокрема сортопрокатного, є витратний коефіцієнт металу (ВКМ). Він дорівнює відношенню за вагою усього металу, що використаний на виконання певного замовлення  $M_{brutto}$  до обсягу (фактичного відвантаження) цього замовлення  $M_{netto}$ . Сенс ВКМ майже ідентичний сенсу коефіцієнту корисної дії, а сам коефіцієнт має бути якомога ближчим до одиниці.

$$ВКМ = M_{brutto} / M_{netto} \quad (1)$$

Витрати металу у процесі виробництва сталевих прокатів зі злиwkів мають як випадковий, так і систематичний характер. Вони виникають на кожній зі стадій виробництва готової продукції. Аби їх мінімізувати, необхідно чітко знати природу виникнення цих втрат, можливу величину, а також доступні шляхи їх усунення.

Оскільки втрати на попередніх етапах мають враховуватися при налаштуванні на оптимальні значення наступних технологічних операцій, вони мають чітко контролюватися чи прогнозуватися. Водночас можливі втрати прикінцевих етапів визначають оптимальні налагодження початкових операцій, тому точності вимірювання та прогнозування на цих етапах має приділятися також підвищена увага. Враховуючи викладене, актуальною вбачається дослідження впливу

кожного з джерел втрат металу в технологічному процесі та впровадження у загальну інтегровану систему підтримки прийняття рішень керування технологічним процесом необхідних датчиків та прогнозуючих підсистем.

**Постановка проблеми.** Технологічний цикл виробництва сортового прокату на металургійному виробництві зазвичай містить кілька операцій [1], послідовність яких ілюструє таблиця 1. Як можна побачити, величини, що контролюються на кожному з етапів, відрізняються як за природою, так і за шкалами.

Зрозуміло, що на кожному з етапів (їх ще називають переділами) виробництва готового прокату виникають втрати. Деякі з них носять технологічний характер і не можуть бути усунені, інші є наслідком тих чи інших помилок операторів та автоматичних систем керування окремими процесами.

Таблиця 1

Технологічні операції, контрольовані та неконтрольовані параметри

№ з/п	Технологічна операція	Форма металу	Вид втрат	Контрольовані параметри	Неконтрольовані параметри
1	Розливка зливків	Зливок	Перелив/недолів	Висота наливу	Вага зливку
2	Розігрів зливків	Зливок	Угар металу	Температура посадки, час нагрівання	Температура виходу, вага зливка
3	Прокатка блюмів	Блюм	Основний та додатковий обріз	Обріз ПГН	Лінійні розміри блюма
4	Прокатка й розкроювання заготовки	Заготовка квадратна чи прямокутна	Обрізок, стружка, немірна штанга	Кількість та довжина мірних і немірних штанг	Вага обрізка, отвір валків
5	Прокатка й розкроювання сортаменту	Готова продукція	Обрізок, стружка	Кількість та вага готової продукції	Вага обрізка

З таблиці 1 легко побачити, що на більшості технологічних операцій контролюються якраз не вага металу – величина, що безпосередньо входить до ВКМ

Раніше [2] авторами було виконано системний аналіз факторів, що визначають мірність розкату квадратної чи прямокутної передільної заготовки. Було показано, що найбільш суттєвий вплив на довжину розкату, який приходить на розкроювання, має фактична висота наливу сталі у зливок, наявність додаткового (понаднормативного) обрізу на парогідравлічних ножицях (ПГН), величина угару зливку

при його розігріві у колодязях та фактичний отвір валків заготівельного стану.

В [3] було побудовано модель багатовимірної лінійної регресії, що дозволяє прогнозувати довжину розкату за величинами, отриманими на попередніх переділах. При цьому були встановлені довірчі інтервали залежності та значущість коефіцієнтів рівняння за статистичними критеріями. При цьому за введеними критеріями було показано, що кращим рівнянням є формула

$$L = a_1 X_1 + a_2 X_{34}, \quad (2)$$

де  $X_1$  - висота наливу сталі в мм;  $X_{34}$  - сукупний (номінальний та додатковий) обріз на парогідравлічних ножицях;  $a_1$  та  $a_2$  - коефіцієнти, значущі за критеріями Фішера та Стьюдента.

Сімейство рівнянь вигляду (2), відмінних лише коефіцієнтами, може бути отримано для кожного з типів виливниць, що використовуються в сталеплавильному цеху.

В існуючому технологічному процесі [1] вирішуються дві оптимізаційні задачі. Перша, докладно розглянута в [4], полягає у комбінаторному визначенні такого набору мірних і немірних штанг, на які розкрояється передільна заготовка, який забезпечував би мінімум (в ідеалі – відсутність) обрізку та, водночас, паралельне виконання усіх наявних замовлень на готову продукцію. Інакше кажучи, заготовка, довжина якої спрогнозована через висоту наливу, угар та обріз ПГН, має бути якомога повніше розподілена на мірні довжини того чи іншого замовлення. Зведений критерій оптимізації має вигляд

$$k_1 \left( \sum_{j=1}^m L_j - \sum_{k=1}^t x_{jk} \right) + k_2 \sum_{q=1}^{p-1} \sum_{r=q}^p \left( \frac{a_q}{z_q + 1} - \frac{a_r}{z_r + 1} \right)^2 \cdot L_k \rightarrow \min \quad (3)$$

де  $k_1, k_2$  - вагові коефіцієнти узгодження цільових функцій мінімізації залишку від розкроювання  $j$ -тої заготовки на  $x_{jk}$  передільних штанг  $k$ -того типу;  $p_i$  - кількість штанг  $i$ -того типу, які необхідно розкרוїти;  $t$  - кількість варіантів розкрою;  $a_q, a_r$  - кількість заготовок, що вирізаються за  $q, r$ -м замовленнями;  $z_i, z_j$  - обсяг  $q, r$ -ого замовлення, яке ще не виконане,  $p$  - кількість видів замовлень.

Мірність передільних штанг і є тією самою другою оптимізаційною задачею. Формалізовано вона виглядає наступним чином

$$l_0 m_0 - n \cdot l_{netto} m_{netto} \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $l_{netto}$  – довжина готової продукції товарна, згідно із замовленням;  $l_0$  – довжина передільної штанги;  $n = 1, 2, \dots$  – ціла кількість готових штанг, що можуть бути отримані з однієї передільної;  $m_0$  та  $m_{netto}$  – вага погонного метру передільної заготовки та готової продукції відповідно.

Кожне замовлення надходить у вигляді маси певного виду продукції, яка має бути розділена на задану довжину  $l_{netto}$ . Залежно від  $m_{netto}$ , яка може різнитися у кілька разів, з передільної штанги, довжиною  $l_0 \in [2, 2 \dots 3, 2]$  метри, можна викроїти кілька штанг готової продукції, забезпечивши при цьому мінімум обрізку. Для важких профілів така мірна довжина зазвичай одна, для легших їх кілька. Наприклад, для швелера №10П при виготовленні з однієї передільної штанги п'яти готових штанг  $l_{netto} = 11,7$  метрів оптимальною буде  $l_0 = 3,05$  метри, а для чотирьох –  $l_0 = 2,45$  метри.

Фактично, рішення оптимізаційної задачі (4) є умовою для розв'язання оптимізаційної задачі (3), адже множина можливих розкроювань складається з оптимальних для даного замовлення мірних довжин передільних заготовок

$$x_k = \left\{ l_0^i \right\}_p. \quad (5)$$

У свою чергу,  $L_k$  з (3) є прогнозованою за (2) величиною довжини розкату. Коефіцієнти (2) справедливі для так званого «ідеального спостереження», або ж для еталонного ходу технологічного процесу. Таким чином, неточності в роботі операторів обладнання чи помилка вимірювань можуть призвести до істотних помилок прогнозування та оптимізації. Як наслідок – збільшиться ВКМ (1), хоча на кожному етапі особи, які приймають рішення, будуть виходити зі, здавалося б, оптимальних міркувань.

Враховуючи викладене, актуальною вбачається задача дослідження впливу кожного з джерел втрат металу в технологічному процесі та впровадження у загальну інтегровану систему підтримки

прийняття рішень керування технологічним процесом [6] необхідних датчиків та прогнозуючих підсистем.

**Мета дослідження:** дослідити вплив можливих помилок вимірювань та спостережень на кожному з етапів виробництва сортового прокату, визначити припустимі межі невизначеності та рекомендувати вирішення проблеми.

**Основний матеріал.** Розглянемо докладніше причини виникнення та методику вимірювання чи розрахунку основних видів втрат під час виготовлення сортового прокату.

Згідно з [2], втрати металу обумовлені:

- недоливом чи переливом зливку – безпосередньо на величину переливу, яка не бере участь в подальшому процесі або недоливу, який призводить до зменшення відсотку мірних передільних заготовок;

- угаром металу в нагрівальних колодязях – на нормативну величину, обумовлену нагріванням зливка до заданої температури (при гарячому посаді з  $T = 900^{\circ}\text{C}$  й температурі видачі  $T = 1250^{\circ}\text{C}$ , складає 1,64–1,67% від ваги зливка), а також на додаткову величину, що нелінійно збільшується з часом перебування зливка в колодязі;

- обрізом на парогідравлічних ножицях, що поділяються на технологічний (однаковий для усіх блюмів) та додатковий, обумовлений станом кінців (носить ймовірний характер, з'являється у 10-20% зливоків й може сягати 2-3% маси прокатоного сляба);

- зміною отвору валків, унаслідок чого виконується невірне розкроювання квадратної чи прямокутної заготовки, що у свою чергу призводить до утворенням значного обрізку або немірної готової продукції.

Використовуючи запропоновані раніше моделі процесів розливки, прокатки та розкроювання, був проведений математичний експеримент із застосуванням так званого греко-латинського квадрату [5] – методу планування багатофакторних експериментів, що дозволяє отримувати залежності досліджуваної змінної від кожного з факторів, незалежно від інших незалежних змінних.

Було досліджено, як зміниться ВКМ при виконанні типового замовлення великого об'єму (2500 тон) на швелер №10П при помилці вимірювання кожного з видів втрат. Результати дослідження представлені у таблиці 2.

## Залежність ВКМ від помилки вимірювання для швелера №10П

Помилка вимірювань	Величина ВКМ за умови, що похибка в параметрі							
	Висота наливу		Угар		Обріз ПГН		Отвір валків	
	абс.	±, %	абс.	±, %	абс.	±, %	абс.	±, %
-5%	1,101173	112,84%	1,09145	102,00%	1,090883	101,37%	--	--
-4%	1,091960	102,57%	1,09094	101,43%	1,090712	101,18%	--	--
-3%	1,100538	112,14%	1,09048	100,92%	1,090351	100,77%	1,091962	102,57%
-2%	1,091480	102,03%	1,09018	100,58%	1,090064	100,45%	1,093181	107,62%
-1%	1,097168	108,38%	1,08999	100,37%	1,089898	100,27%	1,091935	102,54%
0	1,089657	100,00%	1,089657	100,00%	1,089657	100,00%	1,089657	100,00%
1%	1,097934	109,23%	1,090663	101,12%	1,089959	100,34%	1,091924	102,53%
2%	1,093165	103,91%	1,090536	100,98%	1,090419	100,85%	1,094203	105,07%
3%	1,089856	100,22%	1,090945	101,44%	1,090405	100,83%	1,096487	107,62%
4%	1,095282	106,27%	1,091116	101,63%	1,090788	101,26%	--	--
5%	1,090153	100,55%	1,091470	102,02%	1,091395	101,94%	--	--

Величині у 100% в таблиці 2 відповідає значення ВКМ, отримане при точному супроводженні технологічного процесу інформацією без помилок. Відсутність значень з помилкою в 4% та 5% для отвору валків пояснюється нереальністю таких величин, адже системою натискних гвинтів керує система автоматичного регулювання, для якої подібна помилка є нереальною.

Як видно, найсуттєвіший вплив на ВКМ має можлива помилка висоти наливу сталі у виливницю, за нею йде помилка у отворі валків. Ці два параметри, на відміну від вимірювання угару та обрізу ПГН, мають контролюватися з особливою точністю.

Крім того, слід відзначити відчутно нелінійний характер залежності ВКМ від помилки висоти наливу та помилки ширини отвору валків у той час, як помилки у вимірюванні інших величин впливають на витратний коефіцієнт металу майже лінійно.

Нарешті, ще один важливий момент – оптимальне значення ВКМ порушується як при додатних, так і при від'ємних значеннях помилки по кожній змінній у обраному діапазоні вимірювань.

Швелер №10П належить до дрібно-сортового прокату, тому вплив помилки висоти наливу на ВКМ при його виробництві є недостатньо показовим. Для порівняння, аналогічні викладеному вище математичні експерименти були поставлені для швелерів №16П (середньо-сортовий) та №24П (крупно-сортовий). Результати моделювання демонструє сімейство залежностей на рис. 1, де помітною стають дві тенденції. По-перше, що крупніший профіль прокатується, то важливішим для нього є вимірювання точності висоти зливу, а по-

друге, яскраво помітна багатоекстремальність ВКМ як функції висоти наливу.

Велика кількість екстремумів знайденої залежності пояснюється, зокрема тим, що при певній зміні висоти зливку оптимальною стає нова, відмінна від попередньої комбінація мірних та немірних довжин, що можуть бути отримані за (4) при однаковій довжині розкату. Що важчими є штанги готової продукції, а отже що меншу кількість їх можна отримати з одного зливку, то менше локальних екстремумів має залежність ВКМ від параметрів прокатки.

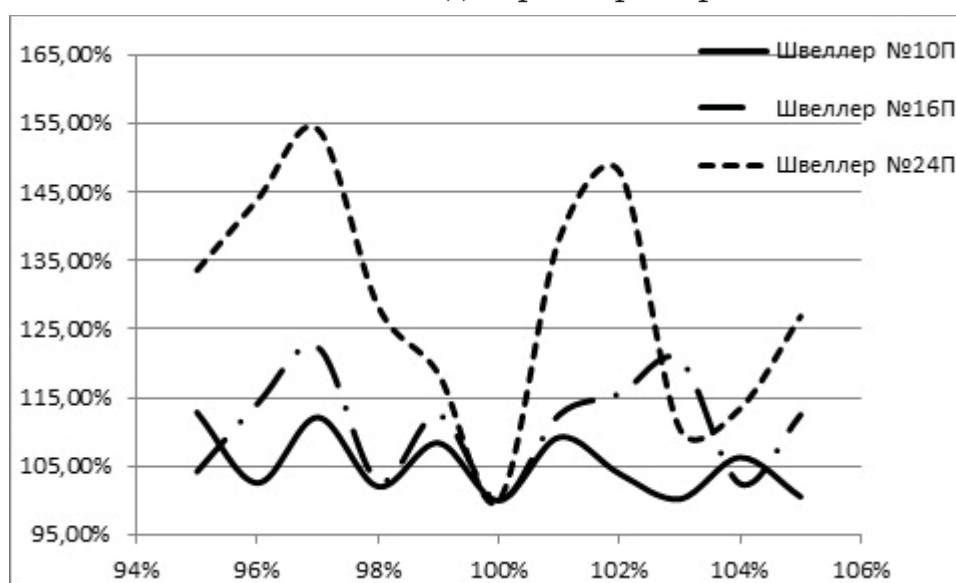


Рисунок 1 – Залежність зміни ВКМ від точності розливки зливків

Останній факт, у свою чергу, залишає відкритим питання – чи можна для заданих параметрів готової продукції за умови планового ведення виробничого процесу отримати оптимальне значення висоти наливу й налаштування отвору валків таким чином, аби забезпечити глобальний мінімум ВКМ. Також відкритим залишається питання про метод глобальної оптимізації, який слід застосовувати для пошуку найкращих умов прокатки.

Аналізуючи відстань між глобальним оптимумом та найближчими піками як ліворуч, так і праворуч від нього, отримуємо, що ймовірна помилка вимірювання висоти зливка не має перевищувати 0,5% у той чи в інший бік. В ході математичного моделювання також було з'ясовано, що робочі висоти зливків знаходяться у межах 2000–2300 мм. Таким чином, для забезпечення бажаної точності необхідно вимірювати висоту наливу з помилкою не більше  $\pm 10$ – $11,5$  мм. За-

безпечити таку точність оптичними приладами на теперішній момент в умовах існуючого виробництва нереально.

Слід враховувати й ще одну важливу деталь – якість внутрішньої поверхні виливниць, адже в перерахунку висоти наливу до ваги зливку вважається, що обидва торці є плоскими, а бічні поверхні – рівними. В реальних умовах піддон з виливницями, як і футеровка стінок, можуть вигоряти в процесі експлуатації, внаслідок чого чіткий математичний зв'язок між висотою та вагою зливка порушується значно суттєвіше ніж на 0,5%.

Альтернативою бачиться вимірювання ваги зливку за допомогою тензометричних вагів, що монтуються в траверзу сталерозливного крана. Сучасні електронні ваги дозволяють виконувати розливу сталі з 60-тонного ковша з помилкою не більше  $\pm 20$  кг, що в умовах робочої ваги злиwkів 6880-7710 кг становить  $\pm 0,26-0,29\%$ . Слід також відзначити, що крім точності вимірювання згадані ваги мають бути без інерційними, аби враховувати у масі зливку вагу того металу, який вже вийшов з ковша, але ще не досяг поверхні металу всередині виливниці.

**Висновки та перспективи досліджень.** В результаті виконання математичного багатофакторного експерименту за греко-латинських квадратом були отримані залежності витратного коефіцієнту металу від можливих помилок вимірювання параметрів, що використовуються у моделях прогнозування та оптимізації при виготовленні сортового прокату.

Ключовими параметрами, які мають контролюватися, є ширина отвору валків та величина зливку. Вигляд залежностей багатоекстремальний, що обумовлено комбінаторним характером оптимізаційної задачі знаходження оптимального розкroювання заготовки на передільні штанги.

В якості контрольованого параметру замість висоти зливку пропонується застосовувати тензометричний датчик ваги, який має забезпечувати помилку вимірювання ваги зливку не більше  $\pm 0,5\%$ . Іншою вимогою до датчика має бути висока швидкодія.

Враховуючи багатоекстремальний нелінійний характер залежності ВКМ у функції розміру зливку та інших параметрів, необхідно в подальшому вирішити задачу прогнозування оптимальної ваги зливка в залежності від замовлення на готову продукцію і очікуваних



станів на проміжних переділах. Одним з варіантів рішення такої задачі, враховуючи її комбінаторну складову, може бути застосування евристичних методів оптимізації, зокрема, еволюційного характеру.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Технологическая инструкция по производству блюмов, заготовки и фасонных профилей в прокатном цехе №1 [Текст] : под ред. Канищева Л.И. – Днепропетровск: ДМЗ им. Петровского. – 1999.–340 с.
2. Желдак, Т.А. Системний аналіз факторів, що визначають мірність сортового прокату та шляхи мінімізації немірної продукції [Текст] / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Дніпропетровськ: Науковий вісник НГУ. – 2009. - №8. – с. 73-77.
3. Гаранжа, Д.М. Факторний аналіз впливу технологічних параметрів процесу гарячої прокатки на довжину розкату і побудова прогнозуючої моделі [Текст] / Д.М. Гаранжа, Т.А. Желдак , М.В. Краєв // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – №1 – с.44-49.
4. Желдак, Т.А. Оптимальне одновимірне розкромлювання матеріалу у прокатному виробництві [Текст] / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2009. – № 4. – с. 43-46.
5. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента [Текст] : пер. с англ. Е.Г. Коваленко; под ред. Н.П. Бусленко / Х. Шенк. – М. : МИР, 1972. – 382 с., ил.
6. Слесарев, В.В. Інтегровані системи керування багатостадійним металургійним виробництвом на прикладі прокатки труб [Текст] / В.В. Слесарев, Т.А. Желдак // *Системные технологи. Региональный межвузовский сборник научных работ*. – Выпуск 4 (75). – Днепропетровск, 2011. – с. 78–85.