

Т.А. Желдак, Л.С. Коряшкіна, Д.М. Гаранжа, Д.О. Сердюк

## **СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРО ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛУ В БАГАТОЕТАПНОМУ ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

*Анотація. Представлена система підтримки прийняття рішень базується на реалізації математичної моделі задачі оптимального використання металу в двоетапному процесі його розподілу при виробництві прокатної продукції, а саме: на етапі розливки сталі з ковша при конвертерному виробництві і під час формування заготовок в машинах з неперервним литтям. Критерієм оптимальності є мінімізація втрат металу. При цьому враховується вид продукції, що виробляється, і можливі варіанти розкрою в двох переділах прокатки. Важливою частиною СППР є попередня обробка великого замовлення, яке містить різні типи продукції і передбачає виконання декількох плавов. Запропонований евристичний алгоритм розбиття великого замовлення на такі частини, які можна виконати в межах лише однієї плавки з якомога більшим заповненням ковша. Наведені результати обчислювальних експериментів підтверджують коректність математичної моделі задачі оптимального розподілу металу на виконання плану виробництва прокатної продукції. Представлені розрахунки демонструють також можливість застосування розробленої системи на металургійних підприємствах під час виробництва прокатної продукції для забезпечення мінімальної кількості переналадок обладнання різальних машин і раціональне використання металу.*

*Ключові слова: витратний коефіцієнт металу, мірність, оптимізаційна задача розкрою, двоетапна модель, замовлення, алгоритм.*

**Постановка проблеми.** Металургійна промисловість є однією з провідних галузей економіки України. Її продукція знаходить широке застосування в усіх галузях народного господарства. Внутрішній ринок металопродукції є базою розвитку країни. Основними чинниками, які характеризують зростання попиту на металопродукцію на внутрішньому ринку, є: зростання потреби в продукції гірничо-металургійного комплексу; розширення масштабів будівництва і реалізація реформ у житлово-комунальному господарстві; імпортозаміщення окремих видів машин і устаткування; необхідність технічного переоснащення основних фондів галузей економіки; реалізація нових проектів в промисловості та енергетиці, в першу чергу національних; оновлення парку

рухомого складу на залізничному транспорті; відновлення та розвиток машинобудування та ін.

Як зазначається в [1], рушійними силами в розвитку як вітчизняної, так і світової металургії на сьогоднішній день є прагнення передових металургійних компаній задовольняти запити як ринку в цілому, так і окремих клієнтів, розробка нових продуктів, діджиталізація процесів, удосконалення наявних технологій і імплементація нових «зелених» проектів.

Стимулювання стратегічних зрушень на металургійних підприємствах сприяє їх розвитку на інтенсивній основі, досягненню позитивного ефекту в будівництві, машинобудуванні, розбудові дорожньо-транспортного комплексу, створенню нових робочих місць і формуванню передумов для стійкого економічного зростання країни [2]. Тому дослідження проблем, пов'язаних з інтенсифікацією роботи підприємств металургійної галузі і вирішенням актуальних виробничих питань, заслуговує уваги з боку дослідників та науковців.

Важливими стратегічними заходами розвитку підприємств металургійної галузі є створення та впровадження новітніх і удосконалених традиційних технологій, в тому числі, енерго- та ресурсозберігаючих. В роботі [3] розглянуто технологічний процес виробництва металопрокату і запропонована математична модель задачі оптимального використання металу як на етапі розливки сталі з ковша при конвертерному виробництві, так і під час формування заготовок в машинах з неперервним литтям. При цьому враховуються всі види продукції, що вироблятиметься, і можливі варіанти розкроювання в двох перedілах прокатки. Дана робота присвячена розробці алгоритму і програми, що реалізує вказану модель, а також обґрунтуванню можливості і особливостям її використання на металургійних підприємствах.

**Мета дослідження.** Розробка системи підтримки прийняття рішень щодо використання металу під час багатоетапного виробництва прокатної продукції в межах заданого плану і забезпечення зниження енергетичних та ресурсних витрат за рахунок використання розробленого математичного і програмного забезпечення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним з найефективніших способів вдосконалення прокатного виробництва є, безумовно, впровадження інформаційних технологій. Тому невід'ємною частиною сучасних прокатних станів є електронні системи проектування, розрахунку, контролю та обліку виробничих процесів. Серед основних напрямків науково-технічних досягнень в області виробництва листового і сортового прокату в роботі [4] виділені розро-

бка засобів комп'ютерного моделювання процесів виробництва гарячекатаних і холоднокатаних смуг, арматурного прокату, катанки і профілів високої точності для машинобудування; прогнозування показників якості прокату; вдосконалення технології їх виробництва. Автори зазначають, що на сьогодні ними розроблено комплекс математичних моделей розрахунку температурно-швидкісних, деформаційних, енергосилових параметрів гарячої прокатки смуг і сортового прокату, а також прогнозування показників механічних властивостей цих видів продукції. На основі цих моделей розроблено метод визначення раціональних схем виробництва гарячекатаного листового і сортового прокату з безперервно литих заготовок в ливарно-прокатних комплексах. Метод заснований на аналізі результатів математичного моделювання параметрів прокатки і прогнозування показників якості прокату із застосуванням теорії прийняття рішень. Він дозволяє обґрунтовано підходити до вибору конструктивно-структурних схем ливарно-прокатних комплексів в залежності від показників якості прокату, заданого сортаменту і продуктивності.

В роботі [5] розглянуто актуальну проблему виробництва сортового прокату в прутках на діючому виробництві стана 370/150 ВАТ «БМЗ керуюча компанія холдингу» БМК» (Білорусь). Наведено коротку технологічну модель отримання сортового прокату в прутках, розроблений алгоритм системи визначення оптимального розкрою сортового прокату, який дозволяє не тільки значно знизити втратний коефіцієнт металу при виробництві, але й контролювати сам процес в момент розкроювання.

Методику розв'язання задачі оптимального розкрою, що ґрунтується на комбінаторному аналізі можливих варіантів формування розкрійних планів для розрізання довгомірного прокату і зіставлення їх за критерієм максимального виходу товарного прокату за довжиною (заданої) довжини і максимальної вартості товарного прокату запропоновано в [6]. На першому етапі розглядався детермінований випадок з відомою координатою торця довгомірного прокату, а на другому випадок, коли становище торця довгомірного прокату описувалося ймовірнісними характеристиками. Авторами встановлені загальні закономірності, які забезпечують найкращий розкрій довгомірного прокату на різних стадіях виробництва стрижневого прокату.

В даній статті розглядається двоетапний процес розподілу металу при виробництві сортового прокату, математична модель оптимізації якого була запропонована в роботі [3], базуючись на результатах досліджень в [7, 8].

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Схема технологічного процесу виробництва прокату включає послідовність наступних операцій: 1) виплавка сталі, 2) розливка зливків у виливниці, 3) нагрівання зливків, 4) прокатка блюмів, 5) обріз блюмів парогідравлічним ножом, 6) прокатка передільної заготовки, 7) розкроювання передільної заготовки, 8) нагрівання штанг-заготовок, 9) прокатка профілів готової продукції, 10) розкроювання профілів готової продукції, 11) завершальна обробка готової продукції. Вочевидь, кожна з операцій суттєво впливає на виконання наступних.

Отже, розкрій злитка здійснюється в два етапи. На першому – весь злиток поділяється на передільні заготовки, довжина яких може лежати в межах від 2,4м до 3,2м з кроком 0,05м. На другому – кожна передільна заготовка розкочується в готовий виріб (швелер, куточок, балка, обід ...) і ділиться на мірні штанги довжиною 12, 11,7, 9 або 6 м згідно замовленню (визначається логістичними вимогами клієнта).

Математично задача сформульована за наступних припущень: а) відома кількість блюмів певного перерізу, яку необхідно використати для виготовлення продукції за планом; б) між виливницями і блюмами встановлена однозначна відповідність, тобто відомо, з якої виливниці метал розкатується у блюм заданого перерізу; в) кожна передільна заготівка розкроюється на штанги тільки одного розміру, при цьому поділ здійснюється з урахуванням наперед розрахованої методом повного перебору оптимальної довжини передільної заготовки для кожного виду продукції, тобто для кожної довжини передільної штанги. Оскільки деякі перерізи блюмів передбачають виготовлення не одного виду готового виробу, а відразу кілька, комбінуючи довжини передільних заготовок в різній кількості, можна максимально використовувати всю довжину отриманого блюма (всю масу налитого злитка).

Зазначена вище математична модель передбачає пошук такої маси металу в ковші і такого її розподілу на зливки на етапі 2), які б дозволяли на наступних операціях розкроювати передільні заготовки і готову продукцію з останніх, мінімізуючи можливі обрізки і враховуючи поточний розмір замовлення на сортовий прокат:

$$Z(q, x) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$Z(q, x) = \sum_{n=1}^n \left( \frac{q_n}{a_n c_n \rho_n} - \sum_{m=1, M; \sigma_{nm}=1} \sum_{p=1}^4 length_m^p \cdot x_m^{p,n} \right);$$

за умов

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n \leq Q; \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^N x_m^{p,n} = \text{NumberZag}_m^p, m = 1, 2, \dots, M; p = 1, 2, 3, 4; \quad (3)$$

$$\text{NumberZag}_m^p = \frac{b_m^p}{\text{amount}_m^p}, m = 1, 2, \dots, M; p = 1, 2, 3, 4; \quad (4)$$

$$\sum_{m=1, M; \sigma_{nm}=1} \sum_{p=1}^4 \text{length}_m^p \cdot x_m^{p,n} - \frac{q_n}{a_n c_n \rho_n} \leq 0, n = 1, 2, \dots, N; \quad (5)$$

$$q_{\min} \leq q_n \leq q_{\max}, n = 1, 2, \dots, N; \quad (6)$$

$$x_n^{p,n} \geq 0, x_n^{p,n} - \text{цiлі}, p = 1, 2, 3, 4; m = \overline{1, M}; n = \overline{1, N}; \sigma_{nm} = 1. \quad (7)$$

Тут  $Q$  – максимальна кількість металу в ковші (кг);  $\rho$  – густина металу (кг/м<sup>3</sup>);  $N$  – кількість виливниць для розливки зливоків  $q_n, n = 1, 2, \dots, N$  – маса зливку в  $n$ -й виливниці;  $q_{\min}, q_{\max}$  – мінімально і максимально можлива маса зливку;  $M$  – кількість видів продукції, що виготовляється;  $b_m^p = \overline{1, M}, p = \overline{1, 4}$ ; – план виготовлення продукції (штанг)  $l_p, p = 1, 2, 3, 4$ ; – можливі довжини штанг відповідно замовленню;  $\text{length}_m^p$  – оптимальна довжина передільної заготовки для виробництва відповідної продукції;  $\text{NumberZag}_m^p$  – кількість заготовок довжини  $\text{length}_m^p$ , яку необхідно отримати в результаті розкрою злитків для виконання замовлення;  $\text{amount}_m^p$  – кількість штанг відповідної продукції, отримана після розкрою однієї заготовки довжини  $\text{length}_m^p$ ;  $x_n^{p,n}$  – кількість заготовок довжини  $\text{length}_m^p$ , яку отримаємо після розкрою  $n$ -го блюму.

Якщо  $I$  – кількість варіантів блюмів, що відрізняються площею поперечного перерізу, то зв'язок між блюмами та продукцією встановлюється за допомогою матриці  $H = \{h_{im}\}, i = \overline{1, I}, m = \overline{1, M}$ ; з елементами:

$$h_{im} = \begin{cases} 1, & \text{якщо з } i\text{-го блюму можна отримати } m\text{-ту продукцію} \\ 0 & \text{у протилежному випадку;} \end{cases}$$

А отже, кожному індексу  $n$  поставлений у відповідність номер перерізу блюму, що зазначимо в матриці  $D = \{d_{in}\}, i = \overline{1, I}, n = \overline{1, N}$ , елементи якої визначаються за правилом:

$$d_{in} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } n\text{-й блюм має переріз } i\text{-го типу} \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

Якщо величина  $\sigma_{nm} = \sum_{i=1}^l h_{im} d_{in}$  дорівнює 1, їй відповідають чотири цілі невід'ємні змінні  $x_n^{p,n}$ . Коли  $\sigma_{nm}$  змінної  $x_n^{p,n}$  не існує.

Довжина  $n$ -го блюму після прокатки  $l_n = \frac{q_n}{a_n c_n \rho_n}$ , де  $a_n = \sum_{i=1}^l d_{in} \bar{a}_i$ ,  $c_n = \sum_{i=1}^l d_{in} \bar{c}_i$

– розміри перерізу блюму.

Розглянемо особливості реалізації наведеної моделі. По-перше, зазначимо, що задача (1) – (7) є задачею частково-цілочисельного лінійного програмування, для розв'язання якої застосовується метод гілок та меж. По-друге, оскільки модель (1) – (7) сформульовано в межах однієї плавки, а розмір замовлення (загалом) на прокатну продукцію з однієї марки сталі може значно перевищувати розмір одного ківша, то потрібно здійснити розбиття всього замовлення на частини, кожна з яких може бути виконана за одну плавку. По-третє, саме замовлення на практиці вимірюється не в штангах певної довжини, а в тонах готової продукції. А, отже, реалізація побудованої моделі передбачає етап попередньої обробки вихідних даних, на якому: 1) з усіх поточних замовлень формується єдине замовлення; 2) отримане замовлення, що вимірюється тонами, конвертується в таке, що вимірюється в штангах готової продукції; 3) останнє в свою чергу поділяється на декілька частин так, щоб для кожної частини виконувалася умова розв'язності задачі (1) – (7):  $\sum_{p=1}^4 \sum_{m=1}^M mass_m^p b_m^p \leq Q$ , де  $mass_m^p$  – маса

1 штанги відповідної продукції (маса 1 н.м.  $\cdot l_p$ ). Крім того, оцінюється, скільки блюмів і якого перерізу потрібно використовувати для виконання замовлення:

$$\frac{1}{M_{\max}} mass_m^p b_m^p h_{im} \leq w_i \leq \frac{1}{M_{\min}} mass_m^p b_m^p h_{im}, i = \overline{1, I},$$

де  $M_{\max}$  і  $M_{\min}$  – максимальна і мінімальна кількість металу, що вміщується в блюм. Величини  $w_i$  визначимо так, щоб виконувалась рівність  $\sum_{i=1}^I w_i = N$ .

Таким чином, ухвалення рішень про використання металу в процесі виконання замовлень на сортовий прокат здійснюється в розробленій комп'ютерній системі за схемою, наведеною на рис. 1.

Продемонструємо роботу СППР на прикладі задачі мінімізації втрат металу при виконанні 5 замовлень, склад яких відображений в табл. 1 і містить тип продукції (номер швелера), її довжину і потрібну масу.

| Приклад замовлення |                |                  |                |
|--------------------|----------------|------------------|----------------|
| № замовлення       | № швелера      | Довжина (м)      | Маса (т)       |
| 1                  | 8; 10; 16      | 9; 11,7; 6       | 14; 27; 24     |
| 2                  | 12; 12; 16     | 6; 9; 11,7       | 100; 25; 35    |
| 3                  | 8; 10; 14; 12  | 9; 12; 11,7; 6   | 30; 27; 15; 5  |
| 4                  | 8; 12; 14; 10  | 12; 12; 11,7; 6  | 10; 29; 10; 14 |
| 5                  | 10; 14; 14; 16 | 9; 11,7; 6; 11,7 | 15; 15; 10; 9  |

З усіх замовлень формується єдиний, сортований за номером продукції, список, де фіксується загальна маса виробів за їх типом та перерізом (табл. 2).

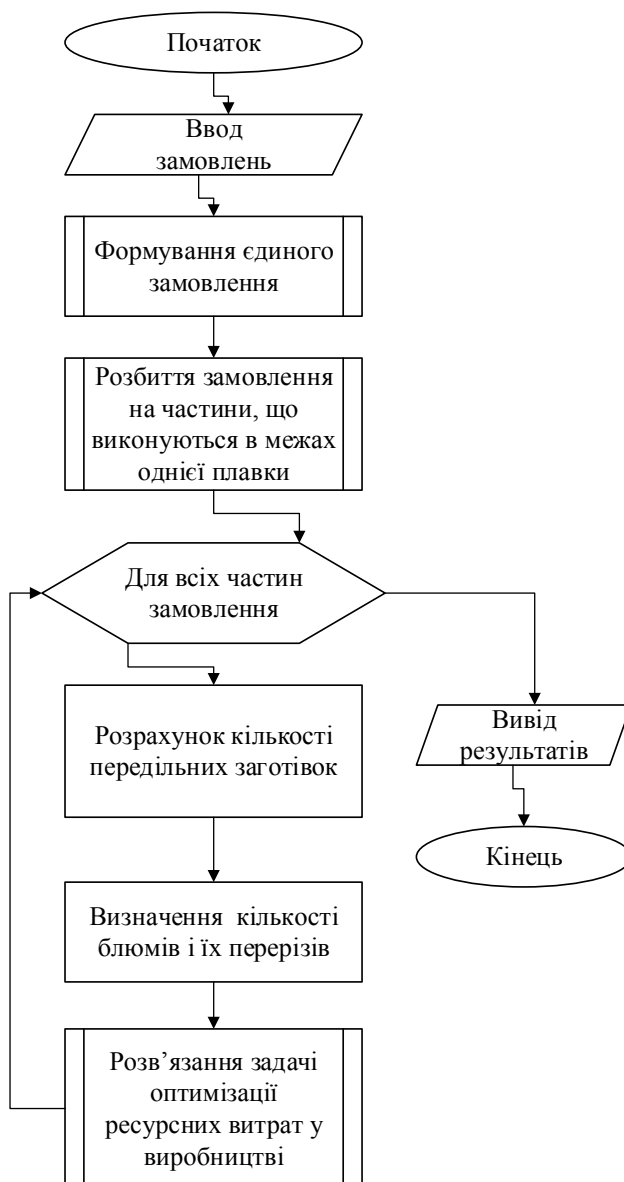


Рисунок 1 – Послідовність процедур з обробки замовлень, що виконуються в розробленій СППР

Оскільки технологічний процес передбачає обмежену кількість металу, що використовується в межах однієї плавки (від 50т до 60 т), то велике замовлення цілеспрямованим перебором розбивається на частини так, щоб маса кожної з них не виходила за вказані границі. Алгоритм розбиття розроблений таким чином, щоб на одну плавку приходилося якомога менше типів продукції. Так, замовлення з табл. 2 поділено на 7 частин, інформація про які наведена в табл. 3. Слід зазначити, що на практиці частина замовлень може бути не включена до жодної з плавок. Тоді вона додається до замовлення наступного дня.

Таблиця 2

Загальне денне замовлення

| Швелер № | Довжина, м | Маса (т) |
|----------|------------|----------|
| 8        | 9          | 44       |
| 8        | 12         | 10       |
| 10       | 11.7       | 27       |
| 10       | 12         | 27       |
| 10       | 6          | 14       |
| 10       | 9          | 15       |
| 12       | 6          | 105      |
| 12       | 9          | 25       |
| 12       | 12         | 29       |
| 14       | 11.7       | 40       |
| 14       | 6          | 10       |
| 16       | 6          | 24       |
| 16       | 11.7       | 44       |

Оскільки математична модель (1) – (7) задачі оптимізації витрат металу у прокатному виробництві передбачає план розкроювання блямбів на першому етапі, вимірюваний в передільних заготовках, то обов'язково розраховується така кількість цих заготовок відповідної довжини (див. останній стовпчик табл. 3), яка дозволить отримати на другому етапі розкроювання злитків потрібний обсяг продукції. При цьому враховуються знайдені повним перебором оптимальні варіанти довжин передільних заголовків для фасонних профілів типу швелер, що виготовляються прокатним цехом №2 (Стан 550) ПАО «ДМЗ» (м. Дніпро) [3].

Приклад замовлення на сім плавов

| № плавки | Типи швелерів |    | Довжини, м |      | Маси, тон |    | Кількість передільних заготовок, шт (штанг) |          |
|----------|---------------|----|------------|------|-----------|----|---------------------------------------------|----------|
| 1        | 8             | 8  | 9          | 12   | 44        | 10 | 139 (695)                                   | 29 (116) |
| 2        | 10            | 10 | 11,7       | 12   | 27        | 27 | 67 (268)                                    | 87 (261) |
| 3        | 12            |    | 6          |      | 52,5      |    | 107 (856)                                   |          |
| 4        | 12            |    | 6          |      | 52,5      |    | 107 (856)                                   |          |
| 5        | 10            | 14 | 6          | 11,7 | 14        | 40 | 38 (266)                                    | 94 (282) |
| 6        | 14            | 16 | 6          | 11,7 | 10        | 44 | 19 (133)                                    | 90 (270) |
| 7        | 12            | 12 | 9          | 12   | 25        | 29 | 54 (270)                                    | 59 (236) |

В табл. 4 наведені довжини передільних заготовок, які забезпечують мінімальні втрати металу на другому етапі розкроювання для продукції із замовлення, що розглядається.

В табл. 5 наведені результати розв'язання задачі оптимізації (1) – (7). Для кожної з плавов вкажемо: масу металу, що подається в ковш; розподіл його по блюмах; кількість передільних заготовок, які отримано у результаті розкроювання за розмірами, відповідно до продукції, що виробляється. Також розрахований відсоток втрат металу під час виконання замовлення.

Таблиця 4

Оптимальні довжини передільних заготовок

| Номер швелеру, | Довжина виробу (м) | Перетин, мм*мм | Довжина передільної заготовки, м | Кількість штанг, шт |
|----------------|--------------------|----------------|----------------------------------|---------------------|
| 8              | 9                  | 125*125        | 2,75                             | 5                   |
| 8              | 12                 | 125*125        | 2,9                              | 4                   |
| 10             | 11,7               | 130*130        | 3,2                              | 4                   |
| 10             | 12                 | 130*130        | 2,45                             | 3                   |
| 12             | 6                  | 150*150        | 2,95                             | 8                   |
| 12             | 9                  | 150*150        | 2,75                             | 5                   |
| 12             | 12                 | 150*150        | 2,95                             | 4                   |
| 14             | 11,7               | 150*150        | 2,55                             | 3                   |
| 14             | 6                  | 150*150        | 3,05                             | 7                   |
| 16             | 11,7               | 150*150        | 2,9                              | 3                   |

## Оптимальний розподіл металу по блюмах, їх розкрій і втрати металу

| № плавки | Маса металу в ковші, кг | Розподіл металу по блюмах |          | Тип швелеру: кількість передільних заготовок, шт | Загальна маса продукції, кг | Втрати, % |
|----------|-------------------------|---------------------------|----------|--------------------------------------------------|-----------------------------|-----------|
|          |                         | № блюму                   | Маса, кг |                                                  |                             |           |
| 1        | 57244                   | 1-6                       | 7088,8   | 8(9): <b>21</b> ; 8(12): <b>0</b>                | 54000                       | 5,67      |
|          |                         | 7                         | 7328,2   | 8(9): <b>8</b> ; 8(12): <b>13</b>                |                             |           |
|          |                         | 8                         | 7383,4   | 8(9): <b>5</b> ; 8(12): <b>16</b>                |                             |           |
| 2        | 56764                   | 1 - 3                     | 7156,1   | 10(11,7): <b>0</b> ; 10(12): <b>22</b>           | 54000                       | 4,87      |
|          |                         | 4 - 6                     | 7222,5   | 10(11,7): <b>17</b> ; 10(12): <b>0</b>           |                             |           |
|          |                         | 7                         | 6505,6   | 10(11,7): <b>0</b> ; 10(12): <b>20</b>           |                             |           |
|          |                         | 8                         | 7122,9   | 10(11,7): <b>16</b> ; 10(12): <b>1</b>           |                             |           |
| 3, 4     | 55794                   | 1 - 7                     | 7300,2   | 12(6): <b>14</b>                                 | 52500                       | 5,9       |
|          |                         | 8                         | 4693,0   | 12(6): <b>9</b>                                  |                             |           |
| 5        | 57000                   | 1 - 2                     | 7315,4   | 10(6): <b>19</b> ; 14(11,7): <b>0</b>            | 54000                       | 5,26      |
|          |                         | 3 - 7                     | 7211,8   | 10(6): <b>0</b> ; 14(11,7): <b>16</b>            |                             |           |
|          |                         | 8                         | 6310,3   | 10(6): <b>0</b> ; 14(11,7): <b>14</b>            |                             |           |
| 6        | 56378                   | 1 - 3                     | 7291,4   | 12(9): <b>15</b> ; 12(12): <b>0</b>              | 54000                       | 4,22      |
|          |                         | 4 - 7                     | 7300,2   | 12(9): <b>0</b> ; 12(12): <b>14</b>              |                             |           |
|          |                         | 8                         | 5939,1   | 12(9): <b>9</b> ; 12(12): <b>3</b>               |                             |           |
| 7        | 57014                   | 1 - 6                     | 7176,5   | 14(6): <b>0</b> ; 16(11,7): <b>14</b>            | 54000                       | 5,29      |
|          |                         | 7                         | 6310,3   | 14(6): <b>6</b> ; 16(11,7): <b>6</b>             |                             |           |
|          |                         | 8                         | 7008,5   | 14(6): <b>13</b> ; 16(11,7): <b>0</b>            |                             |           |

Оскільки на практиці допускається значення втрат металу до 10%, то можна зробити висновок, що розроблена математична модель дозволяє вирішувати проблему надвитрат металу під час виробництва прокатної продукції і кількісно обґрунтовувати прийняття відповідних рішень.

**Висновки.** В даній роботі було розроблено систему підтримки прийняття рішень про раціональне використання металу під час виробництва сортового прокату. В основі системи лежить алгоритм, що реалізує математичну модель задачі оптимального розподілу металу на виконання плану виробництва прокатної продукції, який дозволяє мінімізувати не тільки втрати металу в момент його розливки у виливниці, але й обрізки в ході розкроювання отриманих злитків на передільні заготовки. При цьому враховується можливість наперед оці-

нити оптимальний розмір передільної заготовки, виходячи з бажаного розкроювання по довжині готової продукції, допустимих для даної продукції профілів передільної заготовки та обмежень на вагу одного зливка згори та знизу. Задачу узагальнено на випадок, коли розмір замовлення перевищує розмір плавки, а також на випадок паралельного виконання кількох замовлень на прокатну продукцію з однієї марки сталі. Результати обчислювальних експериментів свідчать про можливість застосування розробленого алгоритму як основи системи прийняття рішень про раціональне використання металу у прокатному виробництві.

Роботу виконано у рамках державної бюджетної тематики за номером: 0121U109788.

#### **ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА**

1. Современные технологии и мировые тенденции в металлургии [Электронный ресурс] // Metinvest. – 13 марта 2020. – Режим доступа: <https://metinvestholding.com/ru/media/article/sovremennye-tehnologii-v-metallurgii-i-mirovie-tendencii>.
2. Пилипенко А.А. Стратегічні напрями розвитку підприємств металургійної галузі [Електронний ресурс] / А.А. Пилипенко // Ефективна економіка, 2014. – № 1. – Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2800>.
3. Hnatushenko V.V. Mathematical model of steel consumption minimization considering the two-stage billets cutting / V.V. Hnatushenko, T.A. Zheldak, L.S. Koriashkina // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – № 2. – Р. 118-124.
4. Приходько И.Ю. Основные направления исследований и актуальные разработки прокатного отдела Института черной металлургии Национальной академии наук Украины / И.Ю. Приходько, С.А. Воробей, В.Г. Раздобреев // ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. – №75(11). – С. 1270-1275.
5. Панковец И.А. Разработка и внедрение автоматизированной системы оптимального раскроя прутка на стане 370/150 ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» / И.А. Панковец // Литье и металлургия, 2019. – № 4. – С. 38-42.
6. Бешта А. С. Оптимальный раскрой длинномерного проката на прокат товарной длины / А. С. Бешта, М. Ю. Кузьменко, О. А. Бойко, А. С. Соколова // Научный вісник Національного гірничого університету. – 2014. – № 2. – С. 76-85.

7. Желдак Т.А. Системний аналіз факторів, що визначають мірність сортового прокату та шляхи мінімізації немірної продукції / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Науковий вісник НГУ. – 2009. – №8. – С. 73-77.
8. Slesaryev V.V. Using of the Tabu search method in optimization the rolled stock layout / V.V. Slesaryev, T.A. Zheldak, D.M. Garanzha and O.D. Stanina // Scientific Reports on Resource Issues : Rock Strength, Rock Fragmentation and Effective Use of Energy Potential of Geotechnical Systems. TU Bergacademie Freiberg. – 2012. – Vol. 2 – P. 87-99.

### REFERENCES

1. Modern technologies and world trends in metallurgy [Electronic resource] // Metinvest. – 13 March 2020. – Access mode: <https://metinvestholding.com/ru/media/article/sovremennie-tehnologii-v-metallurgii-i-mirovie-tendencii>.
2. Pylypenko AA Strategic directions of enterprises metallurgical industry development [Electronic resource] / A. A. Pylypenko // Effective economy, 2014. – № 1. – Access mode : <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2800>.
3. Hnatushenko V.V. Mathematical model of steel consumption minimization considering the two-stage billets cutting / V.V. Hnatushenko, T.A. Zheldak, L.S. Koriashkina // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – № 2. – P. 118-124.
4. Prihod'ko I.Yu. The basic areass of research and actual developments of the rolling department of the Institute of Ferrous Metallurgy, Ukraine' National Academy of Sciences / I.Yu. Prihod'ko, S.A. Vorobei, I. G. Razdobreev // Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic information. 2019. – Vol. 75. – № 11. – С. 1270-1275.
5. Pankovets I.A. Development and implementation of an automated system of optimal bar cutting at the mill 370/150 at OJSC «BSW – Management Company of the Holding «BMC». Litiyo i Metallurgiya (Foundry production and metallurgy). – 2019. – Vol. 4. –P. 38-42. (In Russ.)
6. Beshta A.S. Optimal deviding of long products into rolled products of marketable length / A.S. Beshta, M.Yu. Kuzmenko, O.A. Boyko, A.S. Sokolova // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2014. – № 2. – P. 76-85.
7. Zheldak T.A. Системний аналіз факторів, що визначають мірність сортового прокату та шляхи мінімізації немірної продукції / Т.А. Zheldak, D.M. Haranzha // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. –2009. – № 8. – P. 73-77.

8. Slesaryev V.V. Using of the Tabu search method in optimization the rolled stock layout / V.V. Slesaryev, T.A. Zheldak, D.M. Garanzha and O.D. Stanina // Scientific Reports on Resource Issues : Rock Strength, Rock Fragmentation and Effective Use of Energy Potential of Geotechnical Systems. TU Bergacademie Freiberg. – 2012. – №. 2 – P. 87-99.

Received 27.09.2021.

Accepted 30.09.2021.

***Система поддержки принятия решений об использовании металла  
в многоэтапном прокатном производстве***

*Представленная система базируется на реализации математической модели задачи оптимального расхода металла в двухэтапном процессе его распределения при производстве прокатной продукции, а именно: на этапе разливки стали из ковша при конвертерном производстве и при формировании заготовок в машинах с непрерывным литьем. Критерием оптимальности является минимум потерь металла. При этом учитывается вид производимой продукции и возможные варианты раскроя в двух переделах прокатки. Важной частью СППР является предобработка большого заказа, содержащего различные типы продукции и предусматривающего выполнение нескольких плавов. Предложен эвристический алгоритм разбиения большого заказа на такие части, которые можно выполнить в пределах только одной плавки с как можно полным заполнением ковша. Приведенные результаты вычислительных экспериментов подтверждают корректность математической модели задачи оптимального распределения металла при выполнении плана производства прокатной продукции. Представленные расчеты показывают также возможность применения разработанной системы на металлургических предприятиях при производстве прокатной продукции для обеспечения минимального количества переналадок оборудования режущих машин и рационального использования металла.*

***Decision support system for the use of metal in multi-stage rolling production***

*The presented system is based on the implementation of a mathematical model of the problem of optimal metal consumption in a two-stage process of its distribution in the production of rolled products, namely: at the stage of casting steel from a ladle during converter production and during the formation of blanks in machines with continuous casting. The criterion of optimality is the minimum loss of metal. This takes into account the type of products produced and possible options for cutting in two rolling stages. The mathematical model is a problem of partial-integer linear programming. For its solving, we use the method of branches and boundaries. An important part of the DSS is the preprocessing of a large order containing various types of products and providing for the execution of several heats. The proposed heuristic algorithm for dividing a large order into parts that can be performed within only one heat with as complete filling of the ladle as possible. Moreover, the received order, measured in tons, is converted into that measured in the bars of the finished product. The presented results of computational experiments confirm the correctness of the mathematical model of the problem of optimal metal distribution when fulfilling the plan for the production of rolled products. The presented calculations also show the possibility of using the developed system at metallurgical enterprises in the*

*production of rolled products to ensure the minimum number of changeovers of the equipment of cutting machines and the rational use of metal.*

**Желдак Тимур Анатолійович** – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

**Коряшкіна Лариса Сергіївна** – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

**Гаранжа Дмитро Миколайович** – старший викладач кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

**Сердюк Дмитро Олегович** – магістр кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна.

**Желдак Тимур Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой системного анализа и управления, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина.

**Коряшкіна Лариса Сергіївна** – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри системного анализа и управления, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина.

**Гаранжа Дмитро Миколайович** – старший преподаватель кафедры системного анализа и управления, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина.

**Сердюк Дмитро Олегович** – магистр кафедры системного анализа и управления, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», Днепр, Украина.

**Zheldak Timur Anatolijovych** – Candidate of Technical Science, Head of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Ukraine.

**Koriashkina Larysa Sergiyivna** – Candidate of Physics and Mathematics Science, Associate Professor of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Ukraine.

**Haranzha Dmytro Mykolaiovych** – Senior teacher of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Dnipro.

**Serdiuk Dmytro Olegovich** – Student, Dnipro University of Technology, Ukraine.