

Л.С. Коряшкіна, О.О. Сазонова
Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТ ОБОРОТНОГО ЛОМУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ

Запропонована математична модель процесу оптимального розподілу наявного оборотного лому на виконання плану виробництва сталі з метою мінімізації витрат енергоресурсів.

Предложена математическая модель процесса оптимального распределения имеющегося в наличии оборотного лома на выполнение плана производства стали с целью минимизации затрат энергоресурсов.

It is suggested the mathematical model of optimal admeasurement of the available scrap for execution of production plan in order to minimize energy costs.

Ключові слова: виробництво сталі, оптимізація, технологічний процес, оборотний лом.

Вступ. У [1] зазначені основні проблеми гірничо-металургійного комплексу України, серед яких високий рівень енерговитрат при виробництві металопродукції. Дійсно, енергетичні витрати виробництва української сталі на 20 – 25 % перевищує загальносвітовий рівень. Майже половина металургійного виробництва в Україні сьогодні використовує енергозатратну мартенівську технологію виплавки сталі. Нові ефективні рішення для економії енергоресурсів у металургії України впроваджуються поки що повільно. Причина цього в тому, що, незважаючи на технічне й технологічне відставання ряду металургійних підприємств, у їхніх власників нерідко відсутня мотивація для проведення реконструкції й модернізації виробництва, для вкладання в цей напрямок значних фінансових ресурсів.

Тому за сучасних умов розвитку металургійної галузі ключовою задачею для будь-якого металургійного підприємства стає пошук внутрішніх резервів для зниження витрат, розробка енерго- і ресурсозберігаючих технологічних режимів. Важливою складовою господарської діяльності підприємства стає розробка таких виробничих програм, в яких велика увага приділялася б збільшенню видобутку й споживання власної сировини; зниженню питомих витрат сировинних й енергетичних ресурсів; максимальному використанню запасів сировини, матеріалів, запасних частин. У цьому зв'язку актуальним напрямком наукових досліджень в області прикладної математики є системний аналіз технологічних і фінансових процесів на підприємстві, застосування методів обчислювальної математики й оптимізації для кількісного обґрунтування вибору тієї або іншої програми функціонування підприємства.

Шихта складається з багатьох складових, залежно від виду сталі, що виготовляється. Основними складовими шихти, як правило [2], є: оборотний лом – лом, що утворюється на різних стадіях технологічного процесу при виробництві металевої продукції, і вторинні чорні метали (ВЧМ) – сталевий або чавунний лом і їх відходи.

Оборотний лом є найціннішою складовою металошихти плавильних агрегатів і печей, його доцільно використати для виплавки сталі більш відповідального призначення, але на сьогодні його запаси обмежені, а в перспективі будуть ще меншими. Крім того, від кількості оборотного лома в шихті залежить час виплавки сталі, що, у свою чергу, визначає витрати енергетичних ресурсів і, як наслідок, собівартість продукції.

Дана робота присвячена розробці математичного і програмного забезпечення задачі мінімізації енерговитрат на виробництво запланованої кількості сталі за рахунок оптимального розподілу по шихтах оборотного лому, який виділено на виконання плану.

Постановка задачі оптимізації технологічного процесу виробництва сталі. Вихідні дані: 1) статистичні дані, що містять наступну інформацію: день; марка сталі, номенклатурний номер сталі, що виплавляється; час початку плавки і час її закінчення; вага шихти, вага оборотного лому, ВЧМ, чавуну, антрациту, інших складових; 2) план, в якому зазначена кількість та найменування марок сталі, які необхідно виготовити; 3) кількість оборотного лому, яку виділяють на виконання цього плану.

Необхідно:

1) Побудувати для кожної марки сталі функціональну залежність, на основі якої можна було б обчислити тривалість плавки за даними про вміст оборотного лому у ковші (час виробництва тієї чи іншої марки сталі залежить від співвідношення кількості оборотного лому до загальної кількості лому у ковші).

2) Розподілити оборотний лом, виділений на виконання виробничого плану, між плавками певних марок сталі так, щоб сумарний час, витрачений на усі плавки, був мінімальним.

Побудова математичної моделі. Введемо такі позначення:

1) K – кількість видів марок сталі, яку виготовляє металургійне підприємство;

- 2) $P = (p_1, p_2, \dots, p_K)$ – план випуску продукції, де p_k – кількість плавок k -ої марки, $k = \overline{1, K}$;
- 3) $I = p_1 + p_2 + p_K$ – загальна кількість плавок, які необхідно здій-снити за планом;
- 4) M – кількість оборотного лому, яка виділяється на виробництво запланованої кількості сталі різних типів;
- 5) S_i – максимальна кількість вмісту лому в ковші, що визначається нормативами технологічного процесу для i плавки, $i = \overline{1, I}$;
- 6) z_i – доля оборотного лому (від M) у шихті на i плавку, $i = \overline{1, I}$;
- 7) x_i – доля оборотного лому у ковші i плавки. Очевидно, що змінні x_i та z_i пов'язані функціональною залежністю: $x_i = \frac{Mz_i}{S_i}, i = \overline{1, I}$.

Нехай $f_i(x_i)$ – час, який витрачається на виплавку певної кількості i -ої марки сталі і залежить від частки оборотного лому у шихті. Вид функції $f_i(x_i)$ може бути отриманий, виходячи з результатів обробки статистичної інформації про проведені виплавки. Тоді критерієм якості задачі може бути адитивна функція $F = \sum_{i=1}^I f_i(x_i)$, яка описує сумарний час, витрачений на виробництво запланованої продукції. Мінімізація сумарної тривалості виплавки сталі у кількості, передбаченої за планом, еквівалентна мінімізації витрат енергоносіїв, і, як наслідок, собівартості продукції.

Таким чином, математична модель задачі оптимального розподілу оборотного лому з метою зменшення витрат на енергоресурси записується в такий спосіб :

$$F = \sum_{i=1}^I f_i \left(\frac{Mz_i}{S_i} \right) \rightarrow \min, \quad z \in \Omega,$$

$$\Omega = \left\{ z \in R^I : z_1 + z_2 + \dots + z_I = 1, Mz_i \leq S_i, z_i \geq 0, i = \overline{1, I} \right\}.$$

Результати обчислювальних експериментів. В якості досліджуваних даних вибиралася інформація про здійснені виплавки у середньому за півроку. За цими даними:

- 1) Проаналізовано частоту виплавки сталі всіх марок, виявлені ті марки, що найчастіше здійснюються. Проведене сортування даних за марками сталі.
- 2) Аналізуючи отримані дані було виявлено, що тривалість плавки суттєво залежить від частки оборотного лому у шихті. Була висунута гіпотеза про нормальний розподіл генеральної сукупності. За допомогою методу спрямлених діаграм ця гіпотеза була підтверджена. Знайдена оцінка генеральної середньої (математичного сподівання) і середньо квадратичного відхилення. Було виявлено, що абсолютна величина відхилення майже усіх спостережуваних даних від їх середньої не перевищує потрібного середньо квадратичного відхилення, що за правилом 3-х сігм також свідчить про нормальний розподіл вибіркової сукупності. Спостереження, що не задовольняють вказаному правилу, були відкинуті й у подальших дослідженнях не враховувалися. Слід зауважити, що інформація про всі ті плавки, що були відкинуті, проаналізована з огляду на причини виникнення таких даних (вивчалися рапорти сталеварів про процес певної плавки).
- 3) За відібраними даними, по кожному типу сталі, побудована лінія тренду у вигляді поліному, обчислені коефіцієнти кореляції. Тим самим отримано функціональну залежність тривалості плавки від частки оборотного лому у плавці. Знайдені коефіцієнти кореляції підтверджують суттєву залежність цих величин (рис. 1, 2).

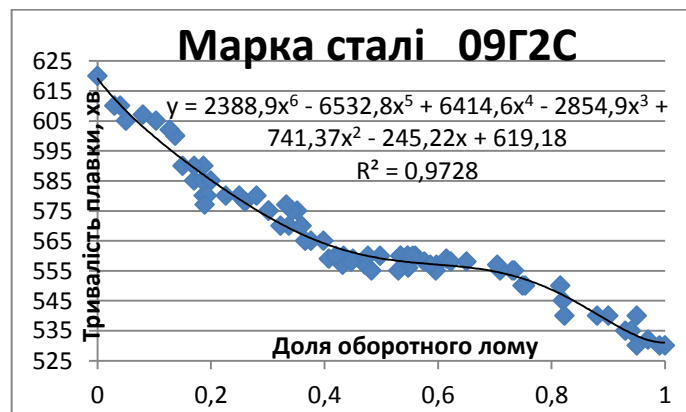


Рис. 1. Лінія тренду та коефіцієнт кореляції, розраховані для марки 09Г2С

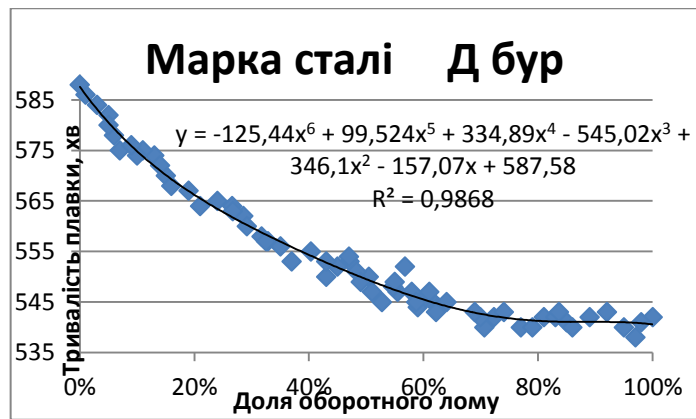


Рис. 2. Лінія тренду та коефіцієнт кореляції, розраховані для марки Д бур

Таким чином можна вважати, що залежність тривалості плавки від частки оборотного лому поліноміальна. Степінь полінома може бути різною для різних марок сталі, але не перевищує 6. Тому в процесі побудови математичної моделі задачі оптимізації розподілу оборотного лому по шихтах тривалість плавки будемо описувати поліномами порядку l , але не вище шостого. І, отже, функціонал побудованої моделі можна записати в такий спосіб:

$$F = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l a_{ij} \left(\frac{Mz_i}{S_i} \right)^j \rightarrow \min, \quad z \in \Omega$$

де $A = \{a_{ij}\}, i = \overline{1, l}, j = \overline{1, l}$ – матриця, що складається з коефіцієнтів многочлена степеня l , апроксимуючих залежність тривалості плавки від долі оборотного лому у шихті.

Після уточнення математичної моделі за рахунок визначення вище зазначеної функціональної залежності здійснюється перехід від задачі умовної нелінійної оптимізації до наступної задачі на безумовний мінімум:

$$\begin{aligned} \bar{F} = & \sum_{i=1}^l \sum_{j=0}^l a_{ij} \left(\frac{Mz_i}{S_i} \right)^j + B \cdot \sum_{i=1}^l \max^2(Mz_i - S_i, 0) + B \cdot \left(\sum_{i=1}^l z_i - 1 \right)^2 + \\ & + B \cdot \max^2(-z_i, 0) \rightarrow \min, \quad z \in R^l \end{aligned}$$

де B – дуже велике додатне число. Ця задача в розробленому програмному забезпеченні розв'язується за допомогою r -алгоритму Н.З. Шора [3] з оглядом на недиференційовність цільової функції.

Далі наведемо результати деяких обчислювальних експериментів.

Приклад 1. Візьмемо усі плавки, що виплавлялися за 7 січня (рис. 3). Кількість оборотного лому, яка виділялася на ці плавки, складала 145. До плану було внесено 4 плавки, такі як: «R 7/8», «32Г2», «Д», «09Г2С». Розподілили їх таким чином: «R 7/8» – 106,6 тон, «32Г2» – 12,44 тон, «Д» – 12,8 тон, «09Г2С» – 13,88 тон. Загальний час, який було витрачено на всі плавки, складав 2401 хвилину.

Дата	Марка ст.	ВЧМ, %		Время
07.01.11	R7 КП	29%	71%	516
07.01.11	32Г2 12"	93%	7%	695
07.01.11	Д 12"	93%	7%	585
07.01.11	09Г2С 11"	92%	8%	605
				2401

Рис. 3. План й розподілення оборотного лому на 07.01.2011

Результати розрахунків оптимального розподілу оборотного лому по шихтах, отримані під час програмної реалізації побудованої математичної моделі, наведені на рис. 4 та зведені у порівняльну таблицю 1.

Введите количество оборотного лома (в тоннах): M: 145

Сумарное время всех плавков (в минутах): T: 2303,7432044

Добавить плавку

Выберите марки стали

R 7/8

32Г2

Д

09Г2С

Распределить

Распределение:

0,40344443660691

77,0326121221276

16,4598426084154

51,2489609995834

Доля оборотного лома в ковше:

0,00268962957737

0,42795895623404

0,09144357004675

0,28471644999768

Время каждой плавки:

555,246498706573

591,948255412129

581,777835090467

574,770615210157

Рис. 4. Розрахований розподіл оборотного лому між плавками на 07.01.2011

Якби виробництво використовувало програмний продукт, то час затрачений на виплавку скоротився б до 2304 хвилин.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця

Дата	План	Фактичний розподіл оборотного лому	Розподіл оборотного лому за отриманою моделью	Тривалість плавки		
				фактична	обчислена на основі функціональної залежності за фактичним розподіленням	обчислена на основі математичної моделі
07.01.11	R7 КП	106,6	0,4	516	516	555
07.01.11	32Г2 12"	12,44	77,03	695	695	592
07.01.11	Д 12"	12,08	16,46	585	585	582
07.01.11	09Г2С 11"	13,88	51,25	605	604	574
Сумарний час плавков				2401	2399	2303

Приклад 2. Візьмемо всі плавки, що виплавлялися за 12 березня (рис. 5). Кількість оборотного лому, яка виділялася на ці плавки, складала 320 тон. Лом між плавками було розподілено наступним чином: «R 7/8» – 76, 4 тон, «32Г2» – 73,2 тони, «ст 35, 45» – 52,61 тон, «Д бур» – 59, 49 тон, «GrB» – 58,36 тон, «32Г2» – 0 тон. У результаті загальний час, який витратили на плавки склав 3548 хвилин.

Дата	Марка сталі	ВЧМ, %		Время
12.03.11	R8 КП	49%	51%	530
12.03.11	32Г2 12"	100%	0%	695
12.03.11	32Г2 11"	100%	0%	595
12.03.11	ст 45 9"	71%	29%	590
12.03.11	GrB 12"	68%	32%	579
12.03.11	Дбур FeV	67%	33%	559
				3548

Рис. 5. Розрахований розподіл оборотного лому між плавками на 12.03.2011

Результати розрахунків оптимального розподілення оборотного брухту по шихтах, отриманого за допомогою побудованої математичної моделі, наведені на рис. 6 і зведені у таблицю 2.

Распределение оборотного лома

Введите количество оборотного лома (в тоннах): M: 320

Суммарное время всех плавок (в минутах): T: 3418,2966182

Добавить плавку

Распределить

Выберите марки стали

Распределение:

Доля оборотного лома в ковше:

Время каждой плавки:

R 7/8	0,0	0,0	555,497919929207
32Г2	156,850910068819	0,87139394482677	532,906356186069
32Г2	156,342264859571	0,86856813810873	533,382745620001
GrB	5,86339583232752	0,03257442129070	607,941538173128
Д бур	1,25854874022782	0,00699193744571	586,498510746973
ст 35, 45	0,0	0,0	602,069547622974

Рис. 4. Розрахований розподіл оборотного лому між плавками на 12.03.2011

Таблиця 2

Узагальнююча таблиця результатів за прикладом 2

Дата	План	Фактичний розподіл оборотного лому	Розподіл оборотного лому за моделлю	Тривалість плавки		
				факт	обчислена за отриманою функц. залежністю за фактичним розподілом	обчислена за моделлю
12.03.11	R8 КП	76,400	19,75	530	528	555
12.03.11	32Г2 12"	0,000	85,87	695	694	533
12.03.11	32Г2 11"	73,200	172,18	595	595	533
12.03.11	ст 45 9"	52,610	15,55	590	588	608
12.03.11	GrB 12"	58,46	26,91	579	578	586
12.03.11	ДбурFeV	59,49	0	559	558	602
				3548	3540	3418

Розглянуті приклади демонструють суттєву економію, враховуючи ціни на енергоносії. Результати обчислювальних експериментів свідчать про доцільність застосування запропонованого в роботі підходу щодо прийняття рішення про раціональну загрузку шихт для виплавки сталі.

Висновки. Таким чином, у роботі здійснена систематизація даних про плавки, які відбувалися за період у півроку на металургійному підприємстві; на основі цих даних відновлено функціональну залежність тривалості процесу виплавки сталі кожного типу, що виробляється, від вмісту оборотного лому у відповідній шихті; побудована математична модель процесу оптимального розподілу наявного оборотного лому на виконання плану виробництва з метою мінімізації витрат енергоресурсів; розроблено програмне забезпечення у вигляді системи підтримки прийняття рішень про оптимальну загрузку шихт під час виробництва необхідної кількості сталі.

Бібліографічні посилання

1. **Минаев А.А.** Концептуальные пути решения основных проблем металлургического комплекса Украины / А.А. Минаев, В.В. Кисиль // Научные труды Донецкого Национального Технического Университета, 2011. – Серия металлургия. – Выпуск 13 (194).
2. **Никольский Л.Е.** Тепловая работа сталеплавильных печей / Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Л.К. Кузнецов. – М., 1981.
3. **Шор Н.З.** Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. / Н.З. Шор – К., 1977.

Надійшла до редколегії 17.06.2012