

УДК 621.74

Могілевцев О. О., Шолохова Я. О.

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ВАРІАНТІВ ПЛАНУВАННЯ ВИПУСКУ ВИЛИВКІВ

Техніко-економічні показники роботи ливарного цеху значною мірою залежать від оптимальності поточного планування випуску виливків на конкретний проміжок часу, наприклад, робочу зміну, добу тощо [1–3].

Загальна номенклатура виливків, які випускає ливарний цех, як правило, досить велика і для цехів масового виробництва становить десятки і сотні найменувань, а для цехів дрібносерійного виробництва може бути значно більшою. Кількість виливків, які виробляються цехом паралельно, без переналагодження устаткування, технологічного процесу та зміни оснащення залежить від встановленого устаткування і, як правило, становить 2–4 найменування (рідко більше).

Плануючи поточну роботу цеху, вибирають з усієї номенклатури певний перелік найменувань виливків, що будуть виготовлятися паралельно протягом планового періоду. Навіть враховуючи накладені обмеження (термін постачання виливків замовнику, наявність готових виливків на складі тощо), може бути декілька можливих варіантів вибору такого переліку. Задача полягає в тому, щоб порівняти ці варіанти між собою і вибрати з них найкращий. Зазвичай цей вибір роблять інтуїтивно, і він на завжди буває оптимальним. Опубліковані методики об'єктивного оцінювання і порівняння варіантів вибору авторам не відомі.

Застосовуючи графоаналітичний метод, запропонований в роботі [4], можна проаналізувати кожний з вибраних переліків виливків і порівняти їх між собою за певними об'єктивними критеріями. Крім того, цей метод дає змогу розробити графік узгодженої роботи формувального та плавильно-заливального устаткування на плановий період.

Метою даної роботи є розробка загальної методики аналізу і порівняння варіантів потокового планування виробництва виливків в ливарному цеху.

Фактично при плануванні вибирають переліки не виливків, а форм, в кожній з яких може бути декілька однакових (іноді різних) виливків. До основних критеріїв ефективності роботи цеху при виготовленні конкретного переліку виливків (форм) можна віднести:

- очікуваний випуск придатних виливків протягом планового періоду;
- очікуваний коефіцієнт завантаження устаткування (потокових ліній, плавильних печей тощо);
- очікувані додаткові витрати енергії, пов'язані з переплавом металу, що зливається з ковшів, зберіганням готового рідкого металу в печі або ковші доки форми будуть готові до заливки тощо;
- забезпечення додержання заданої температури заливання форм;
- забезпечення ритмічної, безперебійної, узгодженої роботи формувального та плавильно-заливального устаткування, яку можна кількісно охарактеризувати, наприклад, очікуваною тривалістю вимушених перерв у роботі конвеєрів або печей.

Для конкретних ливарних цехів можуть бути встановлені також інші критерії.

Зважаючи на різноманітність умов ливарних цехів, запропонувати єдиний універсальний алгоритм розрахунків величини зазначених критеріїв важко, для кожного цеху він повинен бути окремим. У будь-якому разі наявність комп'ютерного забезпечення значно спрощує та прискорює такі розрахунки.

Для об'єктивного кількісного порівняння вибраних переліків форм можна застосувати функцію бажаності Φ будь-якого вигляду. Найпростішим є лінійний вираз:

$$\Phi = a_1 \cdot k_1 + a_2 \cdot k_2 + \dots + a_r \cdot k_r, \quad (1)$$

де k – величина критерію; a – ваговий коефіцієнт.

Ваговий коефіцієнт визначає важливість даного критерію в умовах конкретного цеху (він може бути як додатним, так і від'ємним).

Застосування запропонованої методики розглянемо на досить поширеному прикладі чавуноливарного цеху, де метал виплавляється у вагранці, а форми заливаються на конвеєрі з монорейкових ковшів. Позначимо вибрані форми номерами 1, ... i , ... n . Форми подаються під заливку послідовно, починаючи з № 1, і заливаються, доки вистачає металу в ковші. Наступний ківш починає заливку з першої не залитої форми.

Для кожного з вибраних переліків форм аналіз починають з роботи заливальної зони потокової лінії, для чого розраховують і будують графік Половинкіна. Нагадаємо, що при проектуванні ця операція виконується на основі середніх значень металомісткості форми та тривалості її заливки. При поточному плануванні слід враховувати, що ці показники різні для різних форм. Крім того, з різних ковшів заливаються різні комбінації форм за винятком випадку, коли з ковша заливається k_n форм (k – ціле число). Кількість таких комбінацій звичайно невелика.

Позначимо номери комбінацій форм, що заливаються з одного ковша через 1, ... j , ... m . Аналізуючи роботу заливальної дільниці, слід визначити для кожної j -ї комбінації форм такі показники:

- кількість p_j форм, що заливаються з ковша;
- масу q_j металу, що заливається з ковша в форми;
- масу g_j металу, що залишається в ковші після заливання останньої форми;
- потрібну довжину $L_{z,j}$ заливальної зони конвеєра;
- тривалість $\tau_{pk,j}$ розливки ковша;
- ритм $\tau_{nk,j}$ подачі наступного ковша;
- максимальну та мінімальну допустиму температуру заливання.

Для визначення p_j та q_j для кожної комбінації форм розраховують суму

$$q_j = \sum q_{\phi,i}, \quad (2)$$

де $q_{\phi,i}$ – металомісткість i -ї форми.

Підсумовування починають з першої форми, яку заливає ківш, і продовжують поки виконується нерівність $q_j \leq q_{pk}$, де q_{pk} – місткість ковша; p_j дорівнює кількості доданків; залишок металу в ковші $g_j = q_{pk,j} - q_j$, де $q_{pk,j}$ – маса металу в j -му ковші після його заповнення.

Для наступної комбінації підсумовування починають з першої не залитої у попередній комбінації форми. Операцію повторюють доки наступний ківш почне заливку знову з першої форми. Кількість різних комбінацій дорівнює m .

Для подальших розрахунків визначають ритм $\tau_{n\phi}$ подачі форм під заливку, який залежить тільки від кроку a_ϕ форм на конвеєрі та швидкості v_k руху останнього і є для даного конвеєра величиною постійною:

$$\tau_{n\phi} = \frac{a_\phi}{v_k}. \quad (3)$$

Ритм подачі ковшів і тривалість розливання ковша розраховують для кожної j -ї комбінації за формулами:

$$\tau_{нк. j} = \tau_{нф} \cdot p_j; \quad (4)$$

$$\tau_{рк. j} = \sum \tau_{з. i} + \tau_{нф} \cdot (p_j - 1), \quad (5)$$

де $\tau_{з. i}$ – тривалість заливання i -ї форми.

Суму беруть за всіма формами j -го варіанту. Треба враховувати, що ковші не можуть мінятися місцями на монорейці, тобто за будь-яких умов наступний ківш повинен закінчити заливку пізніше, ніж попередній. Тому, користуючись графіком Половинкіна, слід перевірити виконання нерівності для всіх m ковшів:

$$\tau_{нк. j} + \tau_{рк. j} > \tau_{рк. (j-1)}. \quad (6)$$

Якщо нерівність не виконується, до циклу j -го ковша слід додати відповідний час чекання.

Для визначення кількості ковшів, які треба мати на монорейці, розраховують мінімальний цикл обертання кожного j -го ковша і відкладають ці величини на графіку Половинкіна.

Довжину заливальної зони, яка потрібна для повного розливання j -го ковша, визначають за формулою:

$$L_{з. j} = v_k \cdot \sum \tau_{з. i}. \quad (7)$$

Суму беруть за всіма формами j -го варіанту.

Максимальна потрібна довжина заливальної зони повинна бути не більше фактичної. Якщо ця умова не виконується, приймають одне з можливих рішень:

- виключити цей перелік форм з аналізу;
- зливати залишок металу з ковша для наступного переплавлення;
- заповнювати j -й ківш металом не повністю;
- між заливанням окремих форм ківш повинен не стояти, а рухатися назустріч конвеєру.

В останньому випадку потрібна довжина заливальної зони буде меншою, а саме:

$$L_{з. j} = v_k \cdot \sum \tau_{з. i} - \frac{a\phi \cdot v_{ков}}{v_k + v_{ков}} \cdot (p_j - 1), \quad (8)$$

де $v_{ков}$ – швидкість переміщення ковша назустріч конвеєру.

Слід мати на увазі, що друге рішення пов'язане з додатковою витратою енергії на переплавлення металу, а третє вимагає наявності кранових ваг.

Нарешті слід з'ясувати, чи буде забезпечена заливка форм у заданому температурному інтервалі. З цією метою слід для кожної j -ї комбінації форм визначити максимально допустиму $T_{з. max. j}$ та мінімально допустиму $T_{з. min. j}$ температуру заливання, а також допустимий інтервал $\Delta T_{з. j} = T_{з. max. j} - T_{з. min. j}$. Отже повинна виконуватись нерівність

$$t_k \cdot (\tau_{рк. j} - \tau_{з. j}^{\prime\prime}) \leq \Delta T_{з. j}, \quad (9)$$

де t_k – швидкість спадання температури металу в ковші;

$\tau_{з. j}^{\prime\prime}$ – тривалість заливання останньої форми з ковша.

Важливим є питання про використання металу, який майже завжди залишається в ковші після заливання останньої форми. Тут може бути декілька варіантів: а) злити залишок металу у виливницю і використати його як шихтовий матеріал; б) не зливати метал, а поповнити ківш

рідким металом з плавильного агрегату або стендового ковша; в) злити залишок металу назад у піч; г) випускати в кожний ківш різну кількість металу в залежності від сумарної металомісткості форм, що з нього заливаються.

Варіант (а) найпростіший, але пов'язаний з додатковою витратою енергії на повторний переплав зливу та вигаром під час переплаву. Варіант (б) пов'язаний з поступовим зниженням температури металу в ковші, яка за певних умов може вийти за допустимі межі. Варіант (в) при плавці у вагранці неможливий. Варіант (г) дозволяє значно зменшити масу зливів і є оптимальним, якщо ковші обладнані крановими вагами.

Частку металу, що буде зливатися з ковшів і підлягає переплаву, можна визначити за формулою:

$$\lambda = \frac{\sum g_j}{\sum q'_{pk.j}}, \quad (10)$$

де $q'_{pk.j}$ – маса металу, що випускається в j -й ківш.

Беручи до уваги, що злив переплавляється так само, як решта шихтових матеріалів, приблизно можна вважати, що такою самою буде відносна додаткова витрата теплоти.

Виходячи з того, що для кожної j -ї комбінації форм максимальна температура $T_{в.max.j}$ випуску чавуну з вагранки відповідає заливанню першої форми при максимально допустимій температурі, а мінімальна температура випуску $T_{в.min.j}$ – початку заливання останньої форми при мінімально допустимій температурі, отримуємо формули:

$$T_{в.max.j} = T_{з.max.j} + \Delta T_{стп} + t_k \cdot \tau'_{mp}; \quad (11)$$

$$T_{в.min.j} = T_{з.min.j} + \Delta T_{стп} + t_k \cdot (\tau'_{mp} + \tau_{pk} - \tau''_{з.j}), \quad (12)$$

де $\Delta T_{стп}$ – втрата температури при випуску металу з вагранки в ківш;

τ'_{mp} – тривалість транспортування ковша з металом від вагранки до заливальної зони конвеєра.

Інтервал, в якому необхідно підтримувати температуру випуску чавуну з вагранки, повинен бути спільним для всіх m комбінацій.

Переконавшись, що для даного переліку форм, що планується на контрольний період, забезпечуються необхідні умови, слід визначити потрібну середню розрахункову продуктивність $q_{в.p}$ вагранки. Вона дорівнює:

$$q_{в.p} = \frac{\sum q'_{pk.j}}{\sum \tau_{пк.j}}. \quad (13)$$

Підставляючи в останнє рівняння вираз для $\tau_{пк}$, маємо:

$$q_{в.p} = \frac{\sum q'_{pk.j}}{\tau_{нф} \cdot \sum p_j}. \quad (14)$$

Якщо розрахункова продуктивність вагранки не більше за її номінальну продуктивність $q_{в.ном}$, визначають очікуваний коефіцієнт завантаження, з яким вона працюватиме протягом планового періоду:

$$\eta_{\text{в}} = \frac{q_{\text{в.р}}}{q_{\text{в.ном}}} \quad (15)$$

У протилежному випадку, коли продуктивність вагранки недостатня, кількість металу в копильнику буде поступово зменшуватись і, врешті, доведеться періодично зупиняти конвеєр, щоб знову наплавити повний копильник.

Будемо вважати, що в кожний ківш випускається однакова маса металу, яка дорівнює $q_{\text{рк}}$. Тоді з кожним ковшем кількість металу в копильнику буде зменшуватись на $(q_{\text{рк}} - q_{\text{в.ном}} \cdot \tau_{\text{нк}})$. Перед черговим випуском в копильнику повинно залишатися не менше $q_{\text{рк}}$ металу. Отже кількість ковшів, які можна заповнити з копильника, дорівнює:

$$n_{\text{ков}} = \frac{Q_{\text{коп}} - q_{\text{рк}}}{q_{\text{рк}} - q_{\text{в.ном}} \cdot \tau_{\text{нк}}}, \quad (16)$$

де $Q_{\text{коп}}$ – місткість копильника.

Відповідно, тривалість безперервної роботи конвеєра буде дорівнювати, а тривалість його вимушеної зупинки:

$$\tau_{\text{конв}} = \frac{\tau_{\text{нк}} \cdot (Q_{\text{коп}} - q_{\text{рк}})}{q_{\text{рк}} - q_{\text{в.ном}} \cdot \tau_{\text{нк}}}; \quad (17)$$

$$\tau_{\text{зуп}} = \frac{Q_{\text{коп}} - q_{\text{рк}}}{q_{\text{в.ном}}}. \quad (18)$$

Користуючись отриманими даними, визначають очікуваний випуск придатних виливків протягом планового періоду. Для приблизного розрахунку можна скористатися формулою:

$$M_{\text{вил}} = 0,01 \cdot q_{\text{в.р}} \cdot C \cdot П \cdot (1 - \lambda), \quad (19)$$

де C – тривалість планового періоду;

$П$ – середній вихід придатного литва, %.

Точніше цю величину можна визначити, враховуючи різний вихід придатного для кожного виливка.

Піддавши такому аналізу усі попередньо вибрані переліки форм на плановий період, можна порівняти між собою їх очікувані показники і вибрати оптимальний варіант, враховуючи важливість того чи іншого показника в конкретних умовах цеху.

Розглянемо результати застосування методу до чавуноливарного цеху продуктивністю 10000 тонн придатних виливків на рік з конвеєром, що має крок форм 1,26 м, швидкість руху 2,4 м/хв., довжину заливальної зони 10 м. Місткість розливного ковша 200 кг, швидкість спадання температури металу в ковші 8 К/хв. Температура заливання форм 1320–1370 °С; номінальна продуктивність вагранки 5 т/год; проектний випуск придатних виливків за робочу зміну $M_{\text{ном}} = 20$ т; середній вихід придатного литва 80 %. Паралельно виготовляються виливки двох найменувань. Функція бажаності для порівняння вибраних переліків форм має вигляд:

$$\Phi = 2 \cdot m_{\text{в}} - 0,5 \cdot \eta_{\text{в}} - 5,0 \cdot \lambda; \quad (20)$$

$$m_{\text{в}} = \frac{M_{\text{вил}}}{M_{\text{ном}}}. \quad (21)$$

В даному прикладі порівнювались три переліки виливків для випуску протягом однієї робочої зміни. Результати розрахунків зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння варіантів поточного планування випуску виливків

Варіант	q_{ϕ} , кг	τ_3 , хв.	m	L_3 , м	ΔT_6 , °C	$\tau_{пер}$, %	m_6	η_6	λ	Φ
1	20; 30	0,2; 0,3	1	4,8	7	0	0,91	0,57	~ 0	1,535
2а	35; 45	0,33; 0,67	1	4,8	27	12	1,28	1,0	0,2	1,060
2б	«	«	«	«	0	0	1,46	0,96	0,02	2,420
2в	«	«	«	«	27	0	1,46	0,91	~ 0	2,465
3а	20; 50	0,2; 0,83	2	6,9	17	0	1,28	0,91	0,13	1,455
3б	«	«	«	«	0	0	1,28	0,84	0,04	1,940
3в	«	«	«	«	17	0	1,28	0,80	~ 0	2,160

Примітка: $\tau_{пер}$ – частка вимушених простоїв конвеєра (від загального фонду часу) через недостатню продуктивність вагранки.

Варіанти, позначені літерою «а», передбачають зливання та переплав залишків металу в ковшах; літерою «б» – доповнення ковшів рідким металом (при цьому у варіанті «2а» зливається залишок з кожного десятого ковша, у варіанті «3б» – з кожного п'ятого; вважається, що температура випуску з вагранки підтримується на максимальному рівні). Варіанти «в» передбачають використання кранових ваг.

Як видно з табл. 1, в даному випадку слід віддати перевагу переліку виливків «2» з використанням кранових ваг.

ВИСНОВКИ

На основі розробленої методики узгодження роботи формувального та плавильно-заливального устаткування ливарного цеху [4] запропонована методика аналізу та порівняння варіантів поточного планування виробництва виливків у ливарному цеху, яка дає можливість вибрати оптимальний варіант з точки зору очікуваної продуктивності цеху, завантаження устаткування, витрати матеріальних та енергетичних ресурсів, а також розробити графік узгодженої роботи формувального та плавильно-заливального устаткування протягом планового періоду.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кнорре Б. В. Основы проектирования литейных цехов и заводов / Б. В. Кнорре. – М. : Машиностроение, 1979. – 375 с.
2. Логинов И. З. Проектирование литейных цехов : учебное пособие / И. З. Логинов. – Минск : Высшая школа, 1975. – 319 с.
3. Аксенов П. Н. Оборудование литейных цехов : учебник для вузов / П. Н. Аксенов. – М. : Машиностроение, 1979. – 510 с.
4. Могилевцев О. А. Проектирование согласованной работы формовочного и плавильного оборудования литейного цеха / О. А. Могилевцев // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2009. – № 1 (15). – С. 225–231.