
ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2025.04.054>

УДК 621.74.001.2

В.М. Сажнів, канд. техн. наук, доцент; e-mail: sajhnev@zp.edu.ua;
<https://orcid.org/0000-0002-2095-4958>

В.В. Наумик, докт. техн. наук, професор; e-mail: naumik@zp.edu.ua;
<https://orcid.org/0000-0002-0657-4510>

Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЄКТНИХ РОЗРАХУНКІВ ПЛАВИЛЬНИХ ВІДДІЛЕНЬ ЦЕХІВ ЧАВУННОГО І СТАЛЕВОГО ЛИТТЯ В ОБ'ЄМНІ РАЗОВІ ПІЩАНІ ФОРМИ

Виготовлення якісних виливків із високим рівнем фізико-механічних та експлуатаційних властивостей є основною задачею ливарного виробництва, і особливо це стосується процесів плавки ливарних сплавів. Для її вирішення в плавильних відділеннях повинно застосовуватися сучасне обладнання й прогресивні методи плавки, при чому при проєктуванні нових і технічному переозброєнні діючих ливарних цехів обов'язковим є економічне обґрунтування як вибору технологічних процесів плавки, так і коректності проєктних розрахунків. У проєкті плавильного відділення основні проєктні розрахунки стосуються двох основних виробничих дільниць: дільниці плавки і дільниці набирання і підготовки шихти. Для дільниці плавки проводяться проєктні розрахунки, які забезпечать узгодження роботи плавильного і формувального обладнання. Розраховується місткість печей та їх кількість для забезпечення достатньої кількості рідкого металу для заливки форм на всіх формувальних потоках. При цьому температура металу в заливальному ковші при заливанні форм повинна знижуватися нижче технологічно припустимої. Для дільниці набирання і підготовки шихти проводяться розрахунки річної потреби в шихтових матеріалах для кожного сплаву. У статті запропоновано оптимізацію проєктних розрахунків дільниці плавки і дільниці набирання та підготовки шихти, яка забезпечить якісне виконання проєкту за спрощеною методикою.

Ключові слова: дугова електропіч, індукційна тигельна електропіч, продуктивність плавильного агрегата, металева шихта, вигар металу.

У загальній структурі машинобудівної галузі ливарне виробництво, як правило, є найбільш витратним, тому що повністю залежить від цінової політики на ринку сировини, палива, електроенергії, транспорту. На сьогодні в собівартості виливків найбільші витрати (50–60%) припадають на енергоносії, і, за прогнозами, в подальшому вони будуть тільки збільшуватися. Основним споживачем енергоносіїв в ливарних цехах є плавка металу, тому при виконанні проєктів нових і технічного переозброєння діючих ливарних цехів слід приділяти найбільшу увагу раціональному проєктуванню плавильних відділень для зниження енерговитрат при виготовленні

Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

виливків. Особливо важливо це для цехів чавунного й сталевих лиття в об'ємні разові піщані форми, які є основною заготівельною базою машинобудування.

Проектний розрахунок плавильних відділень здійснюється в такій послідовності. Визначається склад відділення за виробничими й допоміжними підрозділами, проводиться обґрунтований підбір обладнання для виконання технологічних операцій у кожному підрозділі, розрахунок кількості обладнання та планування підрозділів.

Рекомендований склад плавильного відділення цехів чавунного і сталевих лиття в разові об'ємні піщані форми за підрозділами та операціями, які в них виконуються, такий:

Виробничі підрозділи.

1. Дільниця плавки:

- завантаження шихти, палива, флюсів у піч;
- плавка;
- відбирання проб для контролю якості сплаву;
- видача рідкого металу й шлаку з плавильної печі;
- позапічна обробка рідкого сплаву;
- передача рідкого сплаву на розливу.

2. Дільниця набирання і підготовки шихти:

- приймання зі складу і розвантаження шихтових матеріалів, палива, флюсів у видаткові ємності;
- подача шихтових матеріалів, палива, флюсів до дозуючих пристроїв;
- набирання доз компонентів шихтових матеріалів, палива, флюсів відповідно до розрахунку шихти;
- підготовка шихтових матеріалів, палива, флюсів до завантаження у піч (прожарювання, підігрів, просіювання, подрібнення та ін.).

Допоміжні підрозділи.

1. Дільниця ремонту ковшів і футеровки печей.

2. Дільниця переробки відходів.

3. Експрес-лабораторія.

4. Дільниця контролю за параметрами плавки й рідкого металу.

Проектування основних і допоміжних підрозділів плавильного відділення передбачає виконання наведених далі робіт.

Проектування дільниці плавки починається з розподілу на потоки.

Основний розподіл — на технологічні потоки за видами сплавів: чавун, сталь. У свою чергу, кожен технологічний потік може бути поділений на групові потоки за масою виливків у випадку їх великої різниці.

У кожному технологічному та груповому потоці є різниці за складом шихт, вимогами до фізико-механічних властивостей металу, показниками балансу металу (відсотками ливників, браку, безповоротних втрат), відповідно, є відмінності в переліку та масі доз компонентів шихти.

Якщо планується плавити метал для різних групових потоків в одному виді печей, необхідно передбачити, як це буде реалізуватися: паралельно чи послідовно.

Для кожного потоку проводиться вибір технологічного процесу плавки й виду печі, визначення марки печі, складання балансу металу та розрахунок кількості печей.

Основні фактори, які впливають на вибір технологічного процесу плавки і виду печі:

- вид сплаву;
- тип виробництва;
- маса виливків;
- вимоги до якості металу.

Рекомендації з вибору технологічних процесів для плавки чавуну в сучасних умовах такі.

Монопроцеси:

- індукційні тигельні печі промислової або середньої частоти: для чавунів всіх марок у всіх типах виробництва;

Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

- дугові електропечі змінного або постійного струму: для сірого чавуну при використанні металовідходів нестабільного хімічного складу і для високоміцного чавуну.

Дуплекс-процеси:

- індукційна тигельна піч промислової або середньої частоти - індукційна канална піч: для чавунів всіх марок у всіх типах виробництва;

- дугова електропіч змінного або постійного струму - індукційна канална електропіч: для чавунів всіх марок при використанні металовідходів нестабільного хімічного складу;

- вагранка закритого типу з підігрівом дуття, очищенням газів, що відходять, тривалим міжремонтним циклом роботи, — індукційна канална або тигельна піч промислової частоти, індукційна піч середньої частоти: для сірого чавуну у всіх типах виробництва.

Для плавки сталі:

- дугові плавильні печі змінного або постійного струму: для плавки сталей всіх марок у всіх типах виробництва;

- індукційні тигельні печі високої частоти: для спеціальних високолегованих сталей.

Відповідно до обраного технологічного процесу плавки визначається марка печі та її місткість і продуктивність. З точки зору зниження витрат електричної енергії, вогнетривких матеріалів, електродів та ін. доцільним був би вибір печі максимальної місткості. Але для нормального функціонування плавильного відділення велике значення мають такі показники, як потреба цеху в рідкому металі в одиницю часу для своєчасного забезпечення всіх формувальних потоків і ритм видачі рідкого металу, щоб розплав був залитий у форми до зниження його температури нижче технологічно припустимої. Визначення оптимальної місткості плавильної печі, яка забезпечить виконання вказаних вимог, проводиться такими розрахунками [4].

Годинна потреба цеху у рідкому металі:

$$P_M = \frac{Q_{PM} \cdot K_H}{F_e},$$

де P_M — годинна потреба цеху у рідкому металі, т/год; Q_{PM} — маса рідкого металу на рік, т; K_H — коефіцієнт нерівномірності споживання; K_e — ефективний фонд роботи печей, год.

Оптимальна одноразова видача рідкого металу з плавильної печі (місткість зливного ковша):

$$E_K = P_M \cdot K_C \cdot K_P E_K = P_M \cdot K_C \cdot K_P, \text{ т,}$$

де E_K — місткість зливного ковша, т; P_M — годинна потреба цеху у рідкому металі, т/год; K_C — коефіцієнт, що враховує максимально припустимий час видачі металу із зливного ковша (при $P_M < 35$ т/год, $K_C = 0,5-0,7$; при $P_M > 35$ т/год, $K_C = 0,7-1,0$); K_P — коефіцієнт резерву на непередбачені втрати часу, $K_P = 0,5-0,7$.

Оптимальна місткість печі E_{II} :

- для індукційних печей промислової частоти, які працюють «на болоті» і в яких кількість металу, що зливається за один раз (одна плавка), складає $1/3-1/4$ частину місткості печі:

$$E_{II} = (25 - 3,0) E_K$$

- для дугових печей змінного і постійного струму та індукційних печей середньої і високої частоти, із яких метал зливається повністю:

$$E_{II} = E_K$$

За розрахованою оптимальною місткістю печі за технічними характеристиками

Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

вибирається марка печі, місткість якої найближча до оптимальної, при цьому перевіряється, щоб кількості металу, який зливається з печі за один раз, було достатньо для заливки форми найбільшої металоемності.

Основний показник технічної характеристики плавильної печі, що буде використаний у подальших проектних розрахунках, — це продуктивність печі в тоннах металу в годину. При цьому для індукційних печей це паспортний показник, а для дугових — розрахунковий, залежно від тривалості плавки, яка визначається видом сплаву і типом футеровки печі.

Продуктивність дугових печей:

$$q = \frac{E_{\text{п}}}{t},$$

де q — розрахункова продуктивність дугової печі, т/год; $E_{\text{п}}$ — місткість печі, т; t — тривалість плавки, год.

Після вибору марки плавильного агрегата проводиться складання балансу металу за виплавлюваними марками. Баланс металу є програмою плавильного відділення. Розраховується баланс для кожної марки сплаву окремо з визначенням у відсотках і тоннах показників: придатне литво; ливники і додатки; брак виливків; маса рідкого металу; вигар і безповоротні втрати; маса металозавалювання

Коли при заповненні відомості балансу металу є повні дані по всіх виливках, тобто для проектування використовується точна виробнича програма цеху у вигляді «Відомість кількості і маси виливків на річну програму», значення мас придатного литва, ливників і додатків, браку виливків у тоннах для кожного сплаву визначають з цієї відомості. Значення вигару і безповоротних втрат вибирають у відсотках за довідковими даними.

Якщо при проектуванні використовується приведена або умовна програма ливарного цеху, коли по виливках є тільки укрупнені дані, то з цієї відомості вибирається тільки маса придатного литва в тоннах для кожного сплаву, вигар і безповоротні втрати у відсотках вибираються за довідковими даними, маса металозавалювання розраховується через відсоток виходу придатного за нормами проектування, брак виливків — до 5 %, ливники і додатки — останнє до 100 %.

Після складання балансу для кожного виду печі проводиться розрахунок їх потрібної кількості. Розрахункова кількість електричних плавильних агрегатів одної марки визначається за формулою:

$$n_{\text{р}} = \frac{Q_{\text{рм}} \cdot K_{\text{н}}}{E_{\text{е}} \cdot q},$$

де $n_{\text{р}}$ — розрахункова кількість печей, шт; $Q_{\text{рм}}$ — маса рідкого металу на рік, т; $K_{\text{н}}$ — коефіцієнт нерівномірності споживання; $E_{\text{е}}$ — ефективний фонд часу роботи печей, год; q — продуктивність печі, т/год.

Прийнята кількість печей $n_{\text{пр}}$ повинна забезпечити коефіцієнт використання продуктивності печей $K_{\text{в}}$ у межах 0,75-0,85. $K_{\text{в}}$ розраховується за формулою:

$$K_{\text{в}} = \frac{n_{\text{р}}}{n_{\text{пр}}},$$

Найкраще узгодження роботи плавильного й формувального обладнання досягається при проведенні заливки форм на багатогілкових накопичувально-заливальних дільницях.

При використанні вагранок спочатку задаються кількістю блоків вагранок, які планується встановити в плавильному відділенні, і розраховують потрібну годинну продуктивність:

$$q_{\text{р}} = \frac{Q_{\text{рм}} \cdot K_{\text{н}}}{E_{\text{е}} \cdot n},$$

Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

де q_p — розрахункова продуктивність вагранки, т/год; Q_{pm} — маса рідкого металу на рік, т; K_m — коефіцієнт нерівномірності споживання; F_e — ефективний фонд часу роботи вагранок, год; n — прийнята кількість блоків вагранок, шт.

Потім за технічними характеристиками вибирають марку вагранки з прийнятою продуктивністю $q_{пр}$ більше розрахункової q_p на 15–25 %.

Проектування дільниці набирання та підготовки шихти починається з визначення норм витрат шихтових матеріалів, розкислювачів і модифікаторів на одну тонну придатного для кожного сплаву, який буде виплавлятися в плавильному відділенні. Норми витрат можна визначити методом підбору на основі практичних даних передових підприємств, наприклад даних, зібраних співробітниками кафедри «Машини і технологія ливарного виробництва» Національного університету «Запорізька політехніка» на підприємствах криворізького басейну (табл. 1, 2).

Метод підбору для визначення норм витрат шихтових матеріалів реалізується так. У рекомендованих нормах витрат для відповідного сплаву стаття «Вороття» (ливники і добавки + брак) змінюється на відсоток, що був розрахований в балансі металу на цей сплав. Для забезпечення кількості металевої шихти 100 % коригується стаття «Брухт»: для виливків зі сталі та зносостійкого хромистого чавуну — «Брухт сталевий», для виливків із сірого та високоміцного чавунів — «Брухт чавунний».

Норми витрат є вихідними даними для розрахунку річної потреби в шихтових матеріалах.

Для підготовки шихти і подачі її до печей вибирають обладнання: чушколами, дробарки, копри, галтувальні барабани, грохоти, ваги, печі, сушила, бункери з траковими або вібраційними живильниками, мостові, консольні крани. Передбача-

Таблиця 1

Норми витрат матеріалів на 1 т придатних сталевих виливків

Найменування матеріалів	Марка	ДСТУ, ISO, ТУ	Норми витрат, %			
			15-55Л	35ХГСЛ	110Г13Л (окисл)	110Г13Л (перепл)
I. Металева шихта						
Чавун переробний	ПЛ1,ПЛ2	3133-95	3,7	3,7	–	–
Брухт сталевий	№1, №2	4121-2002	65,5	61,6	83,3	–
Брухт сталевий	вид 322	4121-2002	–	–	–	67,5
Вороття	–	–	29,0	31,0	–	26,5
Феромарганець	ФМн75	3547-97	0,8	1,0	11,5	–
Феромарганець	ФМн05	3547-97	–	–	1,7	3,0
Сілікомарганець	СМн17	ISO 5447-80	1,0	–	3,5	3,0
Феросіліцій	ФС45	4127:2002	–	1,8	–	–
Ферохром	ФХ650	5448-81	–	0,9	–	–
Усього	–	–	100	100	100	100
II. Розкислювачі і модифікатори, понад 100%						
Алюміній	АВ91	3753-98	0,15	0,15	0,06	0,06
Сілікокальцій	СК25	2551-94	0,15	0,15	0,15	0,15
Феротитан	Ти1, Ти2	ISO 5454-80	–	–	0,8	0,8
Усього	–	–	0,30	0,30	1,01	1,01
III. Відходи виробництва						
Вороття(ливники)	–	–	29,0	31,0	26,5	26,5
Вигар і втрати	–	–	8,0	8,0	9,0	9,0
Усього	–	–	37,0	39,0	35,5	35,5
IV. Придатне	–	–	63,0	61,0	64,5	64,5

Таблиця 2

Норми витрат матеріалів на 1 т придатних чавунних виливків

Найменування матеріалів	Марка	ДСТУ, ISO, ТУ	Норми витрат, %			
			СЧ ел. печі	СЧ вагранка	ВЧ	ГЧХ28Н2
I. Металева шихта						
Чавун переробний	ПЛ1,ПЛ2	3133-95	20,0	4,5	30,0	10,0
Чавун ливарний	Лк2,Лк3	3132-95	—	30,0	—	—
Брухт сталевий	№1, №2	4121-2002	23,0	6,0	15,0	25,3
Брухт чавунний	17А-19А	4121-2002	35,0	36,7	30,0	-
Вороття	-	-	20	21,0	20,0	28,0
Феромарганець	ФМн75	3547-97	—	0,2	0,4	0,4
Феросіліцій	ФС45	4127:2002	2,0	-	3,8	0,5
Феросіліцій	ФС20	4127:2002	—	1,6	—	—
Ферохром	ФХ650	5448-81	—	—	0,8	27,0
Ферохром	ФХ200	5448-81	—	—	—	7,0
Нікель	Н3, Н4	3211:2009	—	—	—	1,8
Усього	-	-	100	100	100	100
II. Розкислювачі, модифікатори і карбюризатори, понад 100%						
Алюміній	АВ91	3753-98	—	—	—	0,15
Сілікокальцій	СК25	2551-94	0,3	—	—	0,15
Феросиліцій	ФС75Л	4127:2002	1,0	—	—	—
Лігатура	ЛКМ-2	ТУ 4-5-37-74	—	—	3,0	—
Карбюризатори (коксова дрібниця, бій електродів)	-	-	5,0	—	4,0	—
Усього	—	—	6,3	—	7,0	0,3
III. Відходи виробництва						
Вороття(ливники)	—	—	20,0	21,0	20,0	28,0
Вигар і втрати	—	—	6,0	6,0	6,0	9,0
Усього	—	—	26,0	27,0	26,0	37,0

ють їх розміщення на площах плавильного відділення у безпосередній близькості до плавильних агрегатів.

Дільниця ремонту ковшів і футеровки печей призначена для ремонту ковшів, тиглів індукційних печей, футеровки і склепінь дугових печей, сушки та підігріву ковшів, підготовки футерувальних мас тощо. Для виконання всіх операцій необхідно передбачити обладнання і пристрої: сушила, печі, розмелюючі бігуни, шаблони (для склепінь), візки, мостові крани, монорельсові шляхи та ін.

Дільниця переробки відходів призначена для газоочищення, освітлення і нейтралізації води, переробки твердих відходів. Необхідно визначити, які операції будуть виконуватися на площах плавильного відділення, вибрати обладнання, передбачити його розміщення.

Експрес-лабораторія призначена для хімічного та спектрального аналізу виплавлюваних сплавів в процесі плавки для коригування технологічного процесу. За нормами проєктування треба визначити її площу, передбачити розміщення.

Дільниця контролю за параметрами плавки й рідкого металу призначена для контролю за температурним режимом та електричними показниками процесу плавки, керування плавильними агрегатами. Необхідно визначити і передбачити розміщення приміщень, площадок для пультів управління і контрольно-вимірювальних приладів.

Висновки

Запропоновано структуру плавильних відділень за основними і допоміжними підрозділам, яка забезпечить отримання рідкого металу високої якості при використанні сучасних технологічних процесів плавки чорних сплавів і нового високоефективного обладнання.

Надано рекомендації з вибору технологічних процесів для плавки чавуну й сталі в сучасних умовах. Для плавки чавуну слід передбачати електричні печі, використання дугових електропечей змінного та постійного струму для плавки сталі є переважним при використанні металовідходів нестабільного хімічного складу і для отримання високоміцного чавуну.

У проектних розрахунках дільниці плавки для визначення оптимальної місткості плавильного агрегата, яка забезпечить узгодження роботи формувального і плавильного відділень без простоїв, пропонується підтверджена практикою емпірична залежність між потребою цеху в рідкому металі в одиницю часу і ритмом видачі рідкого металу. Традиційно в таких розрахунках, крім організаційно-планувальних, вирішується і низка технічних задач, таких як місткість і продуктивність печей, місткість заливального або роздавального ковшів, будуються графіки заливки в координатах шлях-час тощо. Усі ці розрахунки доволі складні і, найголовніше, не завжди забезпечують отримання потрібних результатів, особливо в сучасних умовах роботи ливарних цехів, які працюють не у велико-серійному або масовому виробництві, а навпаки, у дрібно-серійному, яке потребує частоті зміни номенклатури виливків у потоці, що приводить до зміни ритму подачі рідкого металу.

Найкраще узгодження роботи плавильного й формувального обладнання досягається при проведенні заливки форм на багатогілкових накопичувально-заливальних дільницях.

Запропоновано метод розрахунку річної потреби цеху в шихтових матеріалах, розкислювачах і модифікаторах на основі оригінальних норм витрат шихтових матеріалів на одну тонну придатних виливків. Зазвичай річну потребу в шихтових матеріалах визначають на основі розрахунків шихти різними способами (графічним, аналітичним та ін.), при цьому розрахунки проводять по кожному з основних хімічних елементів, що входять у склад сплаву. Такі розрахунки доволі об'ємні, але все одно не дають точних результатів по року, тому що не враховується наявне становище в балансі країни по металобрухту, переробним і доменним чавунам.

Список літератури

- 1 Проектування ливарних цехів. Ч. 1: підручник / Г.Є. Федоров, М.М. Ямшинський, В.Г. Могилатенко та ін. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 588 с.
- 2 Проектування ливарних цехів. Ч. 2: підручник / Г.Є. Федоров, М.М. Ямшинський, В.Г. Могилатенко та ін. Київ: НТУУ «КПІ», 2011. 316 с.
- 3 Туманський Б.Ф. Проектування ливарних цехів: навч. посібник / Б.Ф. Туманський. Київ: НМК ВО, 1992. 192 с.
- 4 Пелих В.Ф. Вибір та розрахунок обладнання плавильних відділень ливарних цехів: навч. посібник / В.Ф. Пелих, О.І. Пономаренко. Київ: ІСДО, 1993. 224 с.

Надійшла 10.08.2025

References

- 1 Design of foundries. Part 1 / G.E. Fedorov, M.M. Yamshinsky, V.G. Mohylatenko et al. Kyiv: NTUU "KPI", 2011. 588 p.
- 2 Design of foundries. Part 2 / G.E. Fedorov, M.M. Yamshinsky, V.G. Mohylatenko et al. Kyiv: NTUU "KPI", 2011. 316 p.
- 3 Tumansky B. F. Design of foundries. Kyiv: NMK VO, 1992. 192 p.
- 4 Pelykh V. F., Ponomarenko O. I. Selection and calculation of equipment for melting departments of foundries Kyiv: ISDO, 1993. 224 p.

Received 10.08.2025

V.M. Sazhnev, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;*
e-mail: sajhnev@zp.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-2095-4958>

V.V. Naumyk, *Doctor of Technical Sciences, Professor;*
e-mail: naumik@zp.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-0657-4510>

National University «Zaporizhzhia Polytechnic» (Zaporizhzhia, Ukraine)

OPTIMIZATION OF DESIGN CALCULATIONS OF MELTING DEPARTMENTS OF IRON AND STEEL CASTING SHOPS IN ONE-TIME SAND MOULDS

The production of high-quality castings with a high level of physical, mechanical and operational properties is the main task of foundry production, and this especially applies to the processes of melting of foundry alloys. To solve it, modern equipment and progressive melting methods must be used in melting departments, and when designing new and technically re-equipping existing foundries, an economic justification of both the choice of technological melting processes and the correctness of design calculations is mandatory. In the design of a melting department, the main design calculations relate to two main production sections: the melting section and the section for charging and preparing the charge. For the melting section, design calculations are carried out to ensure coordination of the operation of the melting and forming equipment. The capacity of the furnaces and their number are calculated to ensure a sufficient amount of liquid metal for pouring molds on all forming streams. At the same time, the temperature of the metal in the pouring ladle when pouring molds must drop below the technologically permissible one. For the charge collection and preparation section, calculations are made of the annual need for charge materials for each alloy. The article proposes optimization of design calculations for the smelting section and the charge collection and preparation section, which will ensure high-quality project implementation using a simplified methodology.

Keywords: *electric arc furnace, induction crucible electric furnace, melting unit performance, metal charge, metal burnout.*