
ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2025.01.034>

УДК 621.74:13.017

К.А. Сіренко*, канд. тех. наук; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

В.Л. Мазур*, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., гол. наук. співр.;
e-mail: prof.vlm@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8970-5389>

Д.О. Дереча*, **, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.¹, зав. лаб.²;
e-mail: dderecha@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2442-3759>

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

**Інститут магнетизму ім. В.Г. Бар'яхтара НАН України (Київ, Україна)

СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ШИХТИ

Актуальність праці визначена необхідністю уточнення й подальшого розвитку підходів до формування та розрахунків складу шихти, що пов'язано з розширенням факторів, які впливають на технологію ливарного виробництва та які потрібно враховувати при виконанні таких розрахунків. Обґрунтовано підходи до розвитку традиційного розв'язання задачі формування складу шихти для виплавлення чавуну, сталі, сплавів у зв'язку із введенням в експлуатацію сучасних плавильних агрегатів та застосуванням інших, ніж раніше, шихтових матеріалів. Проаналізовано традиційні методики розрахунку шихти із використанням комп'ютерної техніки. Доведено переваги й недоліки класичних, традиційних для ливарного виробництва підходів і методів. Показано, що відомі методи й комп'ютерні програми, розроблені для моделювання процедури вибору шихти та регулювання хімічного складу розплаву чавуну, сталі чи сплавів в процесі їх виплавлення, у більшості не враховують нестабільності хімічного складу компонентів шихти. Показано також, що за відомими методиками розрахунку шихти ведуться зазвичай у припущенні, що вміст хімічних елементів у кожному з її компонентів дорівнює їх середнім величинам із діапазонів значень, регламентованих стандартами, технічними умовами чи іншими нормативними документами на шихтові матеріали. Якщо керуватись таким принципом при формуванні шихти, існує ризик, що діапазон вмісту будь-якого хімічного елемента у складі виплавленого чавуну може бути ширшим і виходити за межі регламентованого діапазону в стандарті на готову продукцію з усіма негативними наслідками цього. На конкретному прикладі моделювання процедури визначення складу шихти для виплавлення сірого чавуну показано важливість удосконалення аналітичного способу розв'язання цієї задачі.

Ключові слова: ливарне виробництво, чавун, виплавка, шихта, розрахунки, методика, удосконалення.

Розвиток усіх галузей та комп'ютеризація промисловості відображаються і на ливарному виробництві. Серед суттєвих змін у цій сфері можна відзначити

поступову заміну вагранок для виплавлення чавуну на електричні печі. Суттєво змінилися й шихтові матеріали для виготовлення чавунного литва, й технологія плавки. Привиробництві синтетичного чавуну, зокрема, як шихтунині використовують не доменний чушковий чавун, як-от для плавки чавуну у вагранках, а металобрухт і різні добавки, що забезпечує необхідний вміст вуглецю, кремнію, марганцю, інших хімічних елементів у литві.

Вибір і розрахунок маси компонентів шихти для виплавлення чавуну заданого хімічного складу є однією із відповідальних технологічних операцій у ливарному виробництві. Методам розрахунку шихти для виплавлення чавуну, сталі, різних сплавів присвячено десятки, а може, й сотні наукових публікацій. Детальний огляд відомих робіт на цю тему представлено в наших статтях [1, 2]. Класичними методами розрахунку шихти прийнято вважати аналітичний, графічний та спосіб підбору [3–7 та ін.]. Значний внесок у розвиток методик розрахунку і способів оптимізації шихти для виплавлення чавуну, сталі, сплавів і коригування вмісту хімічного складу розплавленого металу безпосередньо в процесі плавки внесли, зокрема, автори монографій [3–5, 7], статей [8–15] та ін. робіт.

Переваги й недоліки найпоширеніших методик розрахунку шихти розглянуто в роботах [2, 16–18]. Результати аналізу технічної літератури показують, що відомі методи визначення шихти оперують в основному середніми величинами вмісту хімічних елементів у складі шихтових матеріалів, а також у чавуні, який виплавляють. Нестабільність і діапазони розкиду величин вмісту хімічних елементів зазвичай не враховують. Усе це може призвести до ситуації, коли середні величини вмісту хімічних елементів у складі виплавленого чавуну потрапляють у діапазони, регламентовані стандартами на готову продукцію. Але при цьому, внаслідок нестабільності хімічного складу компонентів шихти, інтервали розкиду вмісту хімічних величин у виплавленому чавуні деяких партій виходять за допустимі межі.

Для виключення таких ситуацій та з метою врахування нестабільності хімічного складу компонентів шихти у наших роботах [1, 2, 16, 18] було запропоновано методологію розрахунку шихти для виплавлення чавуну й коригування хімічного складу чавуну безпосередньо в процесі плавки, засновану на застосуванні ймовірнісного підходу та методу Монте-Карло. Конкретні розрахунки із застосуванням цієї методології при розв'язанні вказаної задачі на прикладі використання способу розрахунку шихти методом підбору були представлені в статті [18]. Очевидно, що таку методологію доцільно задіяти і для модернізації аналітичного способу розрахунку шихти. Розглядаючи цю можливість, будемо орієнтуватися на опис цього способу, викладений у монографіях [3, 5, 7].

Розрахунок шихти аналітичним методом передбачає визначення відсоткового вмісту компонентів шихти з урахуванням угару хімічних елементів у їх складі в процесі плавки. При цьому вихідними, початковими даними є потрібний хімічний склад сплаву, що має бути виплавлений із наявних на ливарному підприємстві шихтових матеріалів. Користуючись прийнятими у монографіях [3, 7] символами змінних, будемо вважати, що в загальному випадку шихта складається з i -компонентів ($i = 1 \dots n$), у кожному з яких є хімічний елемент e , а саме елементи C, Si, Mn та ін., $e = 1 \dots m$, де m — кількість елементів, концентрацією K_e . Елементи C, Si, Mn мають концентрацією K_C , K_{Si} , K_{Mn} тощо. Задача розрахунку полягає у визначенні необхідної масової долі (маси) кожного компонента у складі шихти.

На практиці при виробництві сірого чавуну у вагранках розрахунок шихти аналітичним способом виконують зазвичай стосовно двох елементів — кремнію й марганцю. Приклади розрахунку наведено в монографіях [3, 4, 7]. При виплавленні в індукційних печах синтетичного чавуну із металобрухту розрахунок шихти необхідно проводити також щодо забезпечення в її складі потрібного вмісту вуглецю, як це показано у статті [18]. Можливо, ще фосфору, сірки, інших елементів. Причина полягає в тому, що металобрухт, застосований у шихті для виплавлення чавуну, може мати у своєму складі відносно низький вміст вуглецю.

Вибір виду й обсягу брухту чорних металів (металобрухту) при формуванні шихти для виплавки чавуну в індукційних печах потребує особливої уваги. Згідно з ДСТУ 4121:2022 «Метали чорні вторинні. Загальні технічні умови», брухт чорних металів за характеристиками та показниками якості поділяється на 13 видів і позначок «старий брухт» і «новий брухт». При цьому обидві позначки передбачають види «брухт ливарного чавуну» розмірами $\leq 500 \times 500 \leq 1500$ мм при масових частках нешкідливих домішок, %, 1,5 у старому брухті й $\leq 0,3$ у новому. На практиці в шихті для виплавлення сірого чавуну використовують брухт усіх видів за винятком брухту легованих сталей. При цьому вид, розміри, хімічний склад металобрухту узгоджують між собою замовник та постачальник. У даній роботі при розгляді прикладів формування шихти для виплавлення синтетичного чавуну будемо орієнтуватися на використання брухту сталевих тонкого (виду 1), як це було зроблено у статті [18].

З огляду на сказане, для наочності підходу, що пропонується, і можливості порівняння його з методом підбору [18] розв'язання поставленої задачі будемо шукати стосовно трьох елементів у складі шихти: C, Si, Mn. Як і в роботі [18], розрахунки виконаємо на прикладі визначення шихти для виплавлення чавуну з хімічним складом згідно з ГОСТ 30249-97, а саме, %: C = 2,7...3,4; Si = 0,7...1,0; Mn = 0,4...0,9; P = 0,4...0,9; S $\leq$ 0,2. На ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ» [19], наприклад, шихту для виплавлення чавуну такого хімічного складу в індукційній тигельній печі місткістю 3000 кг формують із металобрухту, феромарганцю ФМн78, феросиліцію ФС65, карбюризатору у вигляді відходів та уламків електродів, звороту власного виробництва (літників, браку тощо).

За даними публікацій [1 та ін.], на більшості чавуноливарних підприємств вихід годного литва дорівнює 60–70 %, втрати на угар складають 4–5 %, зворот власного виробництва — 20–35 % від сумарної маси металевих компонентів шихти. На заводі «М-ЛИТ» втрати через угар хімічних елементів у шихті в процесі виплавлення чавуну орієнтовно становлять: вуглецю $\sim$ 5 %; кремнію $\sim$ 3 %; марганцю $\sim$ 10 %. Деякі публікації дають інформацію про більші величини угару. Тому в кожному прикладі слід орієнтуватися на досвід конкретного заводу щодо величин угару елементів і литва, яке там виробляють.

У подальших розрахунках будемо вважати [19], що вміст вуглецю у карбюризаторі (бою електродів) дорівнює 95 %; що масові долі хімічних елементів у звороті власного виробництва такі самі, як і у складі виплавленого чавуну. Масу звороту у складі шихти, загальною масою 3000 кг, що складає 100 %, приймаємо на рівні 1000 кг (33,4 %). Хімічний склад компонентів шихти для виплавлення вказаного чавуну представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад компонентів шихти для виплавлення чавуну

Номер <i>i</i> компонента шихти	Компоненти шихти	Матеріал, марка, тип	Масова частка елементів, %				
			K_C	K_{Si}	K_{Mn}	K_S	K_P
1.	Металобрухт	Сталь 08кп, 08Ю	0,07...0,10	0,01...0,04	0,20...0,45	до 0,03	0,20...0,25
2.	Феросиліцій	ФС65	0,2	63...68	0,5	0,02	0,05
3.	Феромарганець	ФМн78	7,0	6,0	75...82	0,03	0,7
4.	Карбюризатор	Бій електродів	95	—	—	—	—
5.	Зворот власного виробництва	літники, брак	2,7...3,4	0,7...1,0	0,4...0,9	до 0,20	0,4...0,9

Дотримуючись процедури розрахунку шихти аналітичним способом, викладеної в монографії [3], розрахунок будемо вести на 100 кг шихти. Приймаємо, що зворот власного виробництва складає у шихті 33,4 %. Тобто — 33,4 кг у шихті масою 100 кг. Для визначення масових відсотків кожного із зазначених у табл. 1 інших чотирьох компонентів (металобрухту, феросиліцію, феромарганцю, карбюризатору) шихти необхідно скласти чотири рівняння, оскільки кількість невідомих дорівнює чотирьом. Позначимо масу металобрухту в шихті через x , феросиліцію через y , феромарганцю через z , карбюризатора через u . Відповідно, рівняння (1), яке є балансом маси (кг) сумарно усіх компонентів у шихті масою 100 кг, наведених в табл. 1, має вигляд:

$$x + y + z + u + 33,4 = 100. \tag{1}$$

Три інших рівняння мають представляти вагові (за масою) баланси вуглецю, кремнію, марганцю, які вносяться у шихту її компонентами. Для складання цих рівнянь попередньо визначимо масові частки вуглецю, кремнію, марганцю, внесених у шихту кожним її компонентом, і сумарні маси цих елементів у шихті (табл. 2). При цьому масові частки елементів у шихті мають враховувати угар кожного елемента в процесі плавки чавуну. Вміст (концентрація) вуглецю, кремнію, марганцю у компонентах шихті внаслідок угару елементів зменшиться на величину, %:

$$K_{e(yr)} = K_e \cdot \frac{100 - Y_{r(e)}}{100}, \text{ де } Y_{r(e)} \text{ — величина угару } e\text{-того елемента в процесі плавки;}$$

$K_{(e)}$ — концентрація e -того елемента шихти. $K_{e(yr)}$ — вміст (концентрація) e -того хімічного елемента, зменшена на величину його угару в процесі плавки ($K_{C(yr)}$, $K_{Si(yr)}$, $K_{Mn(yr)}$).

Приймаємо, що угар вуглецю, кремнію, марганцю складає, %: $Y_{rC} = 5$; $Y_{rSi} = 3$; $Y_{rMn} = 10$. Враховуючи ці величини угару елементів, запишемо, %: $K_{C(yr)} = K_C \cdot \frac{100 - 5}{100}$; $K_{Si(yr)} = K_{Si} \cdot \frac{100 - 3}{100}$; $K_{Mn(yr)} = K_{Mn} \cdot \frac{100 - 10}{100}$. Індексом «УГ» позначено вміст e -того елемента у компоненті шихти після угару в процесі плавки.

Таблиця 2
Маси вуглецю, кремнію, марганцю, яку вносять у шихту її окремі компоненти

Номер і компонента шихти	Компоненти шихти	Маса компонента у шихті, кг	Маса елемента, яка вноситься у шихту компонентом, кг		
			C	Si	Mn
1.	Металобрухт	x	$xK_{C(1)}$	$xK_{Si(1)}$	$xK_{Mn(1)}$
2.	Феросиліцій	y	$yK_{C(2)}$	$yK_{Si(2)}$	$yK_{Mn(2)}$
3.	Феромарганець	z	$zK_{C(3)}$	$zK_{Si(3)}$	$zK_{Mn(3)}$
4.	Карбюризатор	u	$uK_{C(4)}$	$uK_{Si(4)}$	$uK_{Mn(4)}$
5.	Зворот власного виробництва	33,4	33,4 $K_{C(5)}$	33,4 $K_{Si(5)}$	33,4 $K_{Mn(5)}$

Примітка: У табл. 2 позначення $K_{C(i)}$, $K_{Si(i)}$, $K_{Mn(i)}$ представляють вміст (концентрації) C, Si, Mn у компонентах « i » шихти, %, без врахування угару елементів. Цифри в індексах визначають номер i компонента шихти: 1 — металобрухт; 2 — феросиліцій, 3 — феромарганець; 4 — карбюризатор; 5 — зворот власного виробництва.

Маси, кг, вуглецю, кремнію, марганцю, які вносять у шихту кожний компонент (металобрухт, феросиліцій, феромарганець, карбюризатор, зворот власного виробництва), дорівнюють добутку вмісту (концентрації) елемента Ke , %, у компоненті на масу (x, y, z, u , 33,4), кг, компонента у шихті масою 100 кг. Прирівнюючи суми добутків до маси відповідного елемента, яка необхідна у цілому в шихті для отримання заданого його вмісту $Ke_{(u)}$ у складі чавуну, запишемо три наступні рівняння, що відображають баланси вмісту C, Si, Mn у шихті масою 100 кг. Індексом «ч» позначено «чавун».

Баланс вуглецю:

$$K_{C(1)} \cdot x + K_{C(2)} \cdot y + K_{C(3)} \cdot z + K_{C(4)} \cdot u + K_{C(5)} \cdot 33,4 = 100 K_{C(u)}; \quad (2)$$

баланс кремнію:

$$K_{Si(1)} \cdot x + K_{Si(2)} \cdot y + K_{Si(3)} \cdot z + K_{Si(4)} \cdot u + K_{Si(5)} \cdot 33,4 = 100 K_{Si(u)}; \quad (3)$$

баланс марганцю:

$$K_{Mn(1)} \cdot x + K_{Mn(2)} \cdot y + K_{Mn(3)} \cdot z + K_{Mn(4)} \cdot u + K_{Mn(5)} \cdot 33,4 = 100 K_{Mn(u)}. \quad (4)$$

Підкреслимо, що в рівняннях (2)–(4) величини вмісту (концентрації) K_C , K_{Si} , K_{Mn} вуглецю, кремнію, марганцю у кожному компоненті шихти і в цілому в шихті масою 100 кг не враховують угар цих елементів в процесі виплавлення чавуну. Сумісним розв'язанням рівнянь (1)–(4) отримаємо шукані величини маси x, y, z, u компонентів у складі 100 кг шихти. Питання угару елементів при виплавленні чавуну буде розглянуто окремо.

При конкретному визначенні маси компонентів шихти для виплавлення чавуну, наприклад, із указаним вище хімічним складом за ГОСТ 30249-97 необхідно перед змінними в рівняннях (2)–(4) задати кількісні величини вмісту, концентрації елементів у компонентах шихти. У першому наближенні у показовому прикладі виконаємо розрахунки в припущенні, що вміст хімічних елементів у компонентах шихти має середні величини із можливих їх діапазонів, указаних у табл. 1. Водночас прийнято, що забезпечуються середні величини їх вмісту і у виплавленому чавуні. Таке припущення зазвичай приймається при застосуванні класичного методу розрахунку шихти [3, с. 69]. Орієнтуючись на дані, наведені у статті [18], при виконанні розрахунків приймаємо за «точки прицілювання» [1–2] середні величини вмісту елементів у складі компонентів шихти і у виплавленому чавуні, в якому середні величини мають дорівнювати, %: $K_{C(\text{чавуну})} = 3,05$; $K_{Si(\text{чавуну})} = 0,85$; $K_{Mn(\text{чавуну})} = 0,65$ (таблиця 3).

Підставляючи у рівняння (2), (3), (4) середні величини концентрацій, %, елементів у компонентах шихти і у складі виплавленого чавуну, наведені у табл. 3, отримуємо рівняння (2а), (3а), (4а) балансів вуглецю, кремнію, марганцю у складі 100 кг шихти, орієнтовані на середні величини вмісту у відсотках цих елементів у компонентах шихти і у чавуні, що виплавляють:

$$\text{баланс вуглецю } 0,085x + 0,2y + 7z + 95u + 3,05 \cdot 33,4 = 100 \cdot 3,05; \quad (2a)$$

$$\text{баланс кремнію } 0,025x + 65,5y + 6z + 0,85 \cdot 33,4 = 100 \cdot 0,85; \quad (3a)$$

$$\text{баланс марганцю } 0,3285x + 0,5y + 78,5z + 0,65 \cdot 33,4 = 100 \cdot 0,65. \quad (4a)$$

Величини x, y, z, u в цих рівняннях визначені у кг.

Розв'язання системи рівнянь (1), (2а), (3а), (4а) призводить до такого складу 100 кг шихти за масою кожного з її компонентів, кг:

1. Металобрухт	$x = 63,45$;	
2. Феросиліцій ФС65	$y = 0,81$;	
3. Феромарганець ФМн78	$z = 0,28$;	
4. Карбюризатор (бій електродів)	$u = 2,06$;	
5. Зворот власного виробництва	33,40.	
Разом	100,00.	(5)

Таблиця 3

Середні величини відсоткового вмісту вуглецю, кремнію та марганцю у складі компонентів шихти і у виплавленому чавуні

Номер і компонента шихти	Компоненти шихти	Середні величини вмісту (концентрації) елементів у складі компонентів шихти і у виплавленому чавуні, %		
		K_c	K_{Si}	K_{Mn}
1.	Металобрухт	0,085	0,025	0,3285
2.	Феросиліцій ФС65	0,2	65,5	0,5
3.	Феромарганець ФМн78	7,0	6,0	78,5
4.	Карбюризатор	95	–	–
5.	Зворот власного виробництва	3,05	0,85	0,65
	Виплавлений чавун	3,05	0,85	0,65

При врахуванні угару елементів у компонентах 100 кг шихти рівняння балансу вуглецю, кремнію, марганцю мають вигляд:

$$\text{баланс вуглецю } \frac{100-5}{100} (0,085x + 0,2y + 7z + 95u + 3,05 \cdot 33,4) = 100 \cdot 3,05; \quad (26)$$

$$\text{баланс кремнію } \frac{100-3}{100} (0,025x + 65,5y + 6z + 0,85 \cdot 33,4) = 100 \cdot 0,85; \quad (36)$$

$$\text{баланс марганцю } \frac{100-10}{100} (0,3285x + 0,5y + 78,5z + 0,65 \cdot 33,4) = 100 \cdot 0,65. \quad (46)$$

Розв'язання системи рівнянь (1), (26), (36), (46) призводить до таких величин компонентів маси шихти, кг: $x = 63,16$; $y = 0,85$; $z = 0,37$; $u = 2,22$.

Порівняння отриманих результатів розрахунків свідчить, що врахування угару 5 % вуглецю, 3 % кремнію і 10 % марганцю в процесі виплавлення вказаного чавуну призводить до необхідності збільшення маси компонентів у шихті, а саме суттєвого збільшення маси феросиліцію, феромарганцю, карбюризатору за рахунок незначного зменшення маси металобрухту. Такий результат є цілком логічним. Зауважимо, що у застосованому методі знехтувано угаром звороту власного виробництва (компонент 5 у табл. 1–3) в процесі виплавлення чавуну.

На доповнення до сказаного вище зазначимо, що збільшення угару будь-якого хімічного елемента в компонентах шихти чи застосування у шихті того ж самого за назвою компонента (металобрухту, феросплаву, карбюризатору), але з меншим вмістом, концентрацією контрольованого елемента потребує для компенсації ефекту від цього і збереження на тому ж самому рівні вмісту елемента у чавуні збільшення маси x , y , z , u компонента (компонентів) у шихті. У випадку, наприклад, коли вуглець у складі карбюризатора слабо засвоюється у розплаві при виплавленні чавуну і, крім того, вуглець угорає на ~ 5 %, то ці ефекти мають бути враховані у рівнянні (2) балансу вуглецю. Якщо вуглець, який вноситься карбюризатором у розплав, засвоюється лише на ~ 85 % із наявного у карбюризаторі його вмісту 95 %, то в рівнянні (2) коефіцієнт $K_{c(4)}$ має дорівнювати $K_{c(4)} = 95 \cdot 0,85 = 80,75$ %.

Результати розв'язання системи рівнянь (1), (2а), (3а), (4а) засвідчили, що величини маси, кг, компонентів у 100 кг шихти змінюються з $x = 63,45$; $y = 0,81$; $z = 0,28$; $u = 2,06$, коли засвоюється 95 % і немає угару, на $x = 62,77$; $y = 0,85$; $z = 0,38$; $u = 2,61$, коли вуглець засвоюється на 80,75 % і є угар. При вмісті вуглецю у карбюризаторі $K_{c(4)} = 95$ % і наявності угару в результаті рішення системи рівнянь (1), (26–46) отримали

$x = 63,16$; $y = 0,85$; $z = 0,37$; $u = 2,22$. Висновок полягає у тому, що в разі зменшення вмісту вуглецю у карбюризаторі, який вноситься у шихту, з 95 % до, наприклад, 80,75 %, та подальшого угару вуглецю на 5 % у процесі плавки, то для отримання однакового вмісту вуглецю у чавуні потрібно збільшити масу u карбюризатора у шихті з 2,22 до 2,61 %. Виникає також необхідність коригування маси інших компонентів у складі шихти.

Якщо при моделюванні процедури визначення складу шихти для виплавлення чавуну гіпотетично прийняти, що в процесі плавки замість угару елементів із шихти збільшиться їх вміст (назвемо це «пригаром»), то для забезпечення заданого вмісту зазначених елементів у чавуні розв'язання задачі, яка розглядається, дасть інший результат щодо необхідної маси компонентів у складі шихти. Коли ж унаслідок «пригару» вміст вуглецю буде збільшуватись орієнтовно на 5 %, кремнію — на 3 %, марганцю — на 10 %, у шихті масою 100 кг має бути, кг: $x = 63,72$; $y = 0,78$; $z = 0,20$; $u = 1,90$. У порівнянні з результатом, отриманим у розв'язанні (5) маси феросиліцію феромарганцю, карбюризатора, що вливають на вміст C, Si, Mn у виплавленому чавуні, мають зменшуватись.

Представлене вище розв'язання, здійснене на підставі середніх величин вмісту елементів у матеріалах компонентів шихти, у науковій літературі [5–17 та ін.] зазвичай рекомендують посилити сумісним розв'язанням задачі оптимізації методом лінійного програмування. За критерій оптимізації найчастіше вибирають мінімум вартості шихти в цілому. Але такий традиційний, можна сказати, класичний підхід, як бачимо, не враховує нестабільності хімічного складу компонентів шихти, що, безумовно, впливає на надійність та інформативність результату розрахунку їх маси. При чому похибка розрахунку шихти для виплавлення чавуну заданого хімічного складу є неконтрольованою і непрогнозованою.

Для усунення цього недоліку класичних методів розрахунку складу шихти в наших роботах [1–2, 16–18] було запропоновано метод розрахунку шихти та регулювання хімічного складу розплаву чавуну безпосередньо в процесі плавки із застосуванням імовірнісного підходу та методу Монте-Карло. Такий підхід дозволяє вдосконалити також і аналітичний спосіб розрахунку шихти. Розглянемо шляхи реалізації зазначеної можливості.

Насамперед у кожному конкретному прикладі необхідно оцінити ступінь нестабільності, непостійності вмісту хімічних елементів у складі компонентів шихти. У прикладі, що розглядається, у шихті для виплавки в індукційній печі сірого чавуну з хімічним складом за вимогами ГОСТ 30249-97, зокрема в партіях феросиліцію ФС65, що постачається на ливарні заводи за ДСТУ 4127:2002, масова частка Si може бути різною в межах від 63 до 68 %. При тому що в чавуні вміст Si має складати (0,7...1,0) %. У партіях феромарганцю ФМн78, відповідно до ДСТУ 3547-97, вміст Mn може дорівнювати будь-якій величині з діапазону (75...82) %. При тому що в нашому прикладі у виплавленому чавуні вміст цього елемента обмежено діапазоном (0,4...0,9) %. Погіршує ситуацію те, що в названих ДСТУ діапазони розкиду окремих елементів, зокрема вуглецю й кремнію у феромарганці ФМн78 та вуглецю й марганцю у феросиліції ФС65, зовсім не визначені. У виробничій практиці феросплави надходять на ливарні заводи партіями, у яких вміст зазначених хімічних елементів суттєво відрізняється від їх середніх величин, наведених у табл. 3. Саме тому при розрахунках шихти вміст Si та Mn у хімічному складі феросиліцію і феромарганцю слід вважати випадковими величинами, діапазони розподілу яких дорівнюють визначеним у ДСТУ 4127:2002 і ДСТУ 3547-97. А характеристики їх розподілів можна вважати такими, що відповідають нормальному закону Гаусса. Можна прийняти також інший закон розподілу змінних, наприклад рівномірний. Суть методу від цього не змінюється.

При реалізації ймовірнісного підходу в процедурі розрахунку шихти величини K_C , K_{Si} , K_{Mn} концентрацій вуглецю, кремнію, марганцю в усіх компонентах шихти (відповідно, й у рівняннях (2)–(4)) мають розглядатися як випадкові величини і визначатися методом Монте-Карло за їх розподілами (діапазонами), вказаними у табл. 1. Діа-

пазони розподілу вмісту вуглецю, кремнію, марганцю, не визначені у вказаних ДСТУ, потрібно приймати на підставі результатів відповідних досліджень. При генерації методом Монте-Карло випадкових величин доцільно прийняти, що розмах розподілів цих величин, передбачений у названих вище стандартах, дорівнює їх шести середньо квадратичним відхиленням від середнього значення (табл. 3). Відповідно до нормального закону Гаусса.

Висловлені міркування свідчать, що можливості викладеного аналітичного методу розрахунку шихти не вичерпані і повною мірою не реалізуються. Резерви його вдосконалення та розвитку полягають в таких підходах. Насамперед під час моделювання процедури визначення складу шихти необхідно перевірити, який результат щодо вмісту вуглецю, кремнію, марганцю слід очікувати у виплавленому чавуні при використанні в складі шихти розрахованих «по середньому» маси її компонентів. Для цього в рівняння (2)–(4) ліворуч потрібно внести розраховані величини (5) маси x , y , z , u металобрухту, феросиліцію, феромарганцю, карбюризатору. Далі із застосуванням методу Монте-Карло розіграти як випадкові величини значення концентрацій $K_{C(ij)}$, $K_{Si(ij)}$, $K_{Mn(ij)}$ та шляхом розв'язання вказаних рівнянь розрахувати концентрації елементів $K_{C(qj)}$, $K_{Si(qj)}$, $K_{Mn(qj)}$ у виплавленому чавуні. Цю процедуру повторити j разів, де j – номер — повторення розв'язання. $j = 1 \dots m$. Кожний j -тий варіант розв'язання виконати з новими j -тими випадковими величинами концентрацій елементів у компонентах шихти. У результаті отримаємо масиви розмірами m значень концентрації $K_{C(qj)}$, $K_{Si(qj)}$, $K_{Mn(qj)}$ у складі виплавленого чавуну. Ці дані дають можливість визначити діапазони та гістограми можливого відсоткового вмісту вуглецю $K_{C(\text{чавуні})}$, кремнію $K_{Si(\text{чавуні})}$, марганцю $K_{Mn(\text{чавуні})}$ у чавуні, виплавленому із шихти розрахованого складу (5). Зазначена інформація є підґрунтям для внесення технологіями ливарного виробництва коректив до складу шихти, якщо це необхідно чи бажано, виходячи з певних виробничих, економічних та ін. міркувань.

Друга можливість посилення інформативності аналітичного способу розрахунку шихти полягає в тому, що вихідні, початкові значення вмісту хімічних елементів у компонентах шихти і у складі виплавленого чавуну не обов'язково приймати на рівні середніх величин, як було продемонстровано вище (табл. 3). Викладена методика дозволяє моделювати процедуру визначення шихти, орієнтуючись, наприклад, на максимальні чи мінімальні вихідні показники хімічного складу як компонентів шихти, так і виплавленого чавуну. Зокрема рішення про прийняття за орієнтири в розрахунках шихти максимальних величин вмісту елементів, що контролюються, схоже, меншою мірою спричиняє ризик перевищення вмісту будь-якого елемента, порівняно з вимогами стандарту на чавун і необхідністю зливу цього розплаву з ванни печі. Можлива нестача вмісту хімічного елемента в розплаві чавуну усувається його корекцією безпосередньо в процесі плавки без значних труднощів за запропонованою у роботах [1–2] методологією.

Розрахунки масової долі вуглецю, кремнію, марганцю у чавуні, виплавленого із шихти, склад і маса компонентів якої представлені в системі (5), засвідчили ймовірність отримання таких мінімальних і максимальних величин зазначених елементів.

У разі, коли концентрації вуглецю у складі металобрухту і звороту власного виробництва за даними табл. 1 мають максимальні величини, а саме %, $K_{C(1)} = 0,10$ і $K_{C(5)} = 3,4$, розрахунки за рівнянням (2а) при масі компонентів шихти відповідно до системи (5) показують величини вуглецю у складі шихти 3,177 і чавуну 3,018 %. Ця величина вмісту вуглецю у чавуні не виходить за межі діапазону (2,7...3,4) %, регламентованому в стандарті.

Мінімальну величину вмісту вуглецю можна очікувати, якщо концентрації С у металобрухті й звороті власного виробництва в шихті будуть мінімальними. А саме при, %, $K_{C(1)} = 0,10$ і $K_{C(5)} = 2,7$. У результаті розрахунків із використанням рівняння (2а) при масі компонентів шихти за (5) отримали вміст вуглецю в шихті $K_{C(\text{ш})\min} = 2,924$ і у чавуні 2,778 %. Таким чином, імовірний діапазон вмісту вуглецю у складі чавуну, ви-

плавленого із шихти, хімічний склад компонентів якої відповідає даним табл. 1, а маса кожного компонента — даним системи (5), дорівнює приблизно (2,778...3,0184) %.

Розраховані аналогічним способом із застосуванням рівнянь (3а), (4а) і системи (5) можливі мінімальна й максимальна величини вмісту Si і Mn у чавуні, виплавленому з тієї самої шихти, дорівнюють: розрахований діапазон кремнію (0,744...0,899) %, діапазон у стандарті (0,7...1,0) %; розрахований діапазон марганцю (0,427...0,738) %, у стандарті (0,4...0,9) %.

Представлені результати засвідчили, що в прикладі, який розглядається, застосування аналітичного методу розрахунку шихти для виплавлення чавуну дало прийнятний результат щодо прогнозованого вмісту Si і Mn у чавуні. Розрахований аналітичним методом очікуваний діапазон (2,778...3,018)% вмісту вуглецю у складі виплавленого чавуну є звуженим стосовно діапазону (2,7...3,4) %, передбаченого у стандарті. На підставі цих даних оператор ливарного об'єкта має прийняти рішення про необхідність коригування складу шихти, розрахованого й наведеного у системі (5).

На завершення зазначимо, що аналітичний метод розрахунку шихти для виплавлення чавуну передбачає спочатку задаватися відсотковим вмістом звороту у її складі. Застосування такого прийому зумовлене виробничою практикою. Зворот, відходи власного виробництва розглядають як матеріальний ресурс ливарного підприємства, що постійно поновлюється. Водночас масову частку звороту у складі шихти можна змінювати, якщо це необхідно, навіть кожний раз при виготовленні нових партій чавуну замовленого сортаменту, марки, залежно від поточної виробничої ситуації. Перерахунок складу шихти для умов іншої ситуації з масовою часткою звороту не створює на практиці принципових труднощів при застосуванні викладеного ймовірнісного підходу. На кожному підприємстві можуть бути попередньо прораховані за викладеною вище методикою декілька типових зразків складу шихти для виплавлення чавуну різного сортаменту.

Запропонований підхід дозволяє розглядати у ймовірнісному аспекті, з урахуванням ступеня нестабільності вмісту хімічних елементів у шихтових матеріалах можливі варіанти розподілу масової частки компонентів шихти для виплавлення чавуну заданого складу. Гістограми розподілу масової долі компонентів шихти у прикладі, що розглядається (табл. 1), представлені на рис. 1. На додачу до інформації стосовно нестабільності хімічного складу шихтових матеріалів в розрахунках прийнято: діапазон вмісту C у феросиліції дорівнює (0,15...0,25) %, у феромарганці — (6,5...7,5) %; діапазон вмісту Si у феромарганці — (5,5...6,5) %; Mn у феросиліції — (0,45...0,55) %. При цьому вважали, що хімічний склад (розподіл вмісту хімічних елементів) чавуну, що виплавляють, відповідав зазначеному ГОСТ 30249-97. У кожному j -тому варіанті рішення системи рівнянь (1), (2), (3), (4) масові частки кожного елемента вважали випадковими величинами і розігрували методом Монте-Карло із зазначених вище діапазонів. Загальна кількість варіантів розрахунків дорівнювала $m = 10000$.

Результати розрахунків, виконаних із застосуванням ймовірнісного підходу до визначення маси компонентів шихти для виплавлення чавуну з хімічним складом за ГОСТ 30249-97, представлені у вигляді гістограм на рис. 1. Порівняння розподілу ймовірних величин маси часток металобрухту, феросиліцію, феромарганцю, карбюризатору у шихті (рис. 1), склад якої відповідає вихідним умовам задачі, яка розв'язується, із даними її розв'язання в припущенні, що вміст C, Si, Mn у компонентах шихти має середні величини (система 5), свідчить про багатоваріантність можливих рішень. Зазначене дає інформацію персоналу ливарного підприємства для внесення уточнень чи додаткових обмежень у початкові умови задачі.

Розраховані з використанням викладеного вище ймовірнісного підходу та методу Монте-Карло гістограми, представлені на рис. 2, повною мірою узгоджуються з розглянутими вище мінімальними та максимальними величинами вмісту C, Si, Mn у шихті, склад якої проведені у системі (5). Зазначимо, що преведені на рис. 1 і 2 гіс-

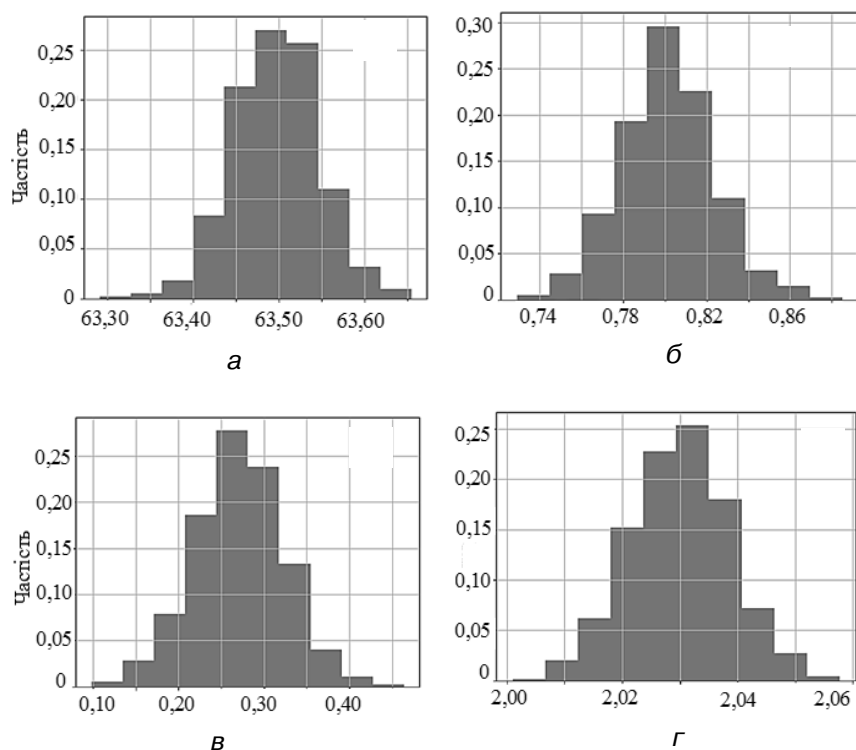


Рис. 1. Гістограми розподілу масових часток, %, металобрухту (а), феросиліцію (б), феромарганцю (в), карбюризатору (г) в шихті, розраховані із застосуванням імовірнісного підходу та методу Монте-Карло до вибору випадкових величин вмісту С, Si, Mn у зазначених компонентах шихти й чавуні, який виплавляють

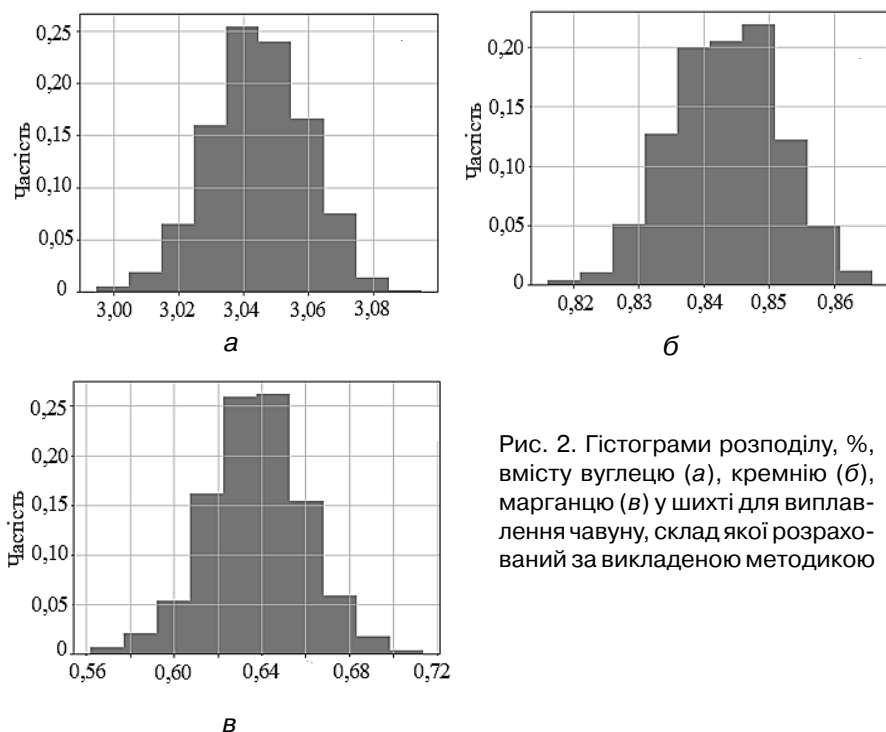


Рис. 2. Гістограми розподілу, %, вмісту вуглецю (а), кремнію (б), марганцю (в) у шихті для виплавлення чавуну, склад якої розрахований за викладеною методикою

тограми, розраховані у припущенні, що розподіли випадкових величин, які розглядаються, відповідають нормальному Закону Гаусса. Розрахунки, виконані у припущенні, наприклад рівномірного розподілу величин у їх діапазонах, дали ті самі результати.

Викладена вище процедура визначення аналітичним методом складу шихти для виплавлення чавуну заданого хімічного складу представлена у загальному вигляді. При цьому застосована методика передбачає можливість врахування угару хімічних елементів у компонентах шихти в процесі виплавлення чавуну. Але кількісні розрахунки у статті виконані без детального врахування угару елементів. На практиці прийнято, що при визначенні складу шихти для виплавлення чавуну величини угару однакових елементів приймають незмінними щодо усіх компонентів шихти. У загальному ж підході при розв'язанні задачі, яка розглядається, угар будь-якого елемента у складі компонентів шихти можна вважати різним і залежним від умов плавки. Так фактично відбувається у промисловій практиці. Причина в тому, що величина угару конкретного елемента у процесі виплавлення чавуну в принципі залежить від багатьох факторів, зокрема від черговості внесення компонента шихти у розплав, тривалості його перебування при високій температурі тощо. Можливість врахування цих технологічних нюансів при визначенні складу шихти передбачена в рівняннях (2)–(4).

Наведені приклади не вичерпують резерви вдосконалення класичних методів і безпосередньо аналітичного способу розрахунку шихти для виплавлення чавуну, сталі, сплавів на базі застосування ймовірнісних підходів.

Висновки

На сучасному етапі розвитку ливарного виробництва у зв'язку з широким впровадженням комп'ютерної техніки в промисловій практиці створені передумови для вдосконалення класичних способів розрахунку шихти для виплавлення чавуну, у тому числі й аналітичного методу, шляхом застосування ймовірнісного підходу та методу Монте-Карло. Застосування такого підходу дає змогу оцінювати при моделюванні процедури визначення складу шихти з компонентів, матеріалів з апіорі нестабільним хімічним складом, вплив цієї нестабільності на якість чавуну, що виплавляють, і вносити необхідні корективи в реалізовану на практиці технологію. Результати розрахунків наочно демонструють неоднозначність можливого розв'язання задачі щодо вибору маси компонентів у шихті при намаганні враховувати нестабільність хімічного складу шихтових матеріалів, а також наявність різних розв'язань задачі, яка розглядається. Застосування ймовірнісного підходу в аналітичному методі розрахунку шихти посилює його інформативність. Показана можливість удосконалення аналітичного способу розрахунку шихти шляхом індивідуального врахування ступеня угару кожного елемента в компонентах шихти залежно від технологічних особливостей їх застосування.

Список літератури

- 1 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Ідеологія коригування хімічного складу синтетичного чавуну в процесі виготовлення литва. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29. № 4 (327). С. 30–40.
- 2 Сіренко К.А., Дереча Д.О., Мазур В.Л. Застосування методу Монте-Карло в розрахунках шихти й регулювання хімічного складу чавуну в процесі його виплавлення. *Процеси лиття*. 2023. № 4 (153). С. 44–57.
- 3 Орешкин В.Д. Основы литейного производства. Москва: Машгиз. 1961. 327 с.
- 4 Габерцеттель А.И. Плавка и разливка чугуна. Ленинград: Машиностроение. 1969. 92 с.
- 5 Курдюмов Д.Я., Тэн Э.Б. Расчет оптимального состава шихты на ЭВМ. Москва: Металлургия. 1984. 73 с.

- 6 Виноградов Олег. Расчет шихты для получения серого чугуна СЧ20 методом подбора. <https://on-v.com.ua/novosti/tehnologii-i-nauka/raschet-shixty-dlya-polucheniya-serogochug/>
- 7 Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. Москва: Машиностроение, 1984. 432 с.
- 8 Архангельский А.В., Писаренко Л.З., Аверкин С.И. Компьютерная программа расчета состава шихты. *Литейное производство*. 2000. № 12. С. 26–27.
- 9 Селівьорстов В.Ю. Програмний засіб розрахунку шихти з урахуванням економічного показника ефективності. *Наукові праці. Комп'ютерні технології*. Вип. 161. Т. 173. С. 154–157.
- 10 Пономаренко О.И., Пелих В.Ф., Никифоров А.В. Методы расчета шихты для выплавки литейных сплавов. Системный подход. Киев: ИСИО Украины. 1993. 74 с.
- 11 Рибак В.М., Чорнозем Д.С. Розрахунок шихти за допомогою пакету пошуку рішення середовища MS EXCEL. *Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра»*. Київ, НТУУ «КПІ». 2011. С. 308–321.
- 12 Кириченко В.М. Расчет оптимального состава шихтовых материалов методами линейного программирования. <http://masters.donntu.ru/2007/kita/kirichenko/library/b7.html>
- 13 Соколов Д.Д., Приходько О.В. Алгоритм і програма розрахунку та корекції складових шихти при отриманні високоміцного чавуну для виливниць. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2017. № 2 (41). С. 145–149.
- 14 Рубинштейн Э.Г., Зайцев М.В. Оптимизация состава шихты и свойств высокопрочного чугуна. *Литейное производство*. 1989. № 10. С. 14–15.
- 15 Малыхин И.А., Вдовин К.Н., Милюков С.В. Расчет на ЭВМ оптимального состава шихты. *Литейное производство*. 1980. № 10. С. 15–16.
- 16 Сіренко К.А. Розвиток методики визначення складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах. *Метал та лиття України*. 2022. Т. 30. № 2 (329). С. 20–29.
- 17 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка стабільності хімічного складу і властивостей промислових партій синтетичного чавуну. *Процеси лиття*. 2021. № 4 (146). С. 66–75. <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.066>
- 18 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Переваги та недоліки методів розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну в ливарному виробництві. *Процеси лиття*. 2023. № 3 (153). С. 49–60.
- 19 Мазур В.Л., Найдек В.Л., Попов Є.С. Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29. № 2 (325). С. 80–89. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.080>

Надійшла 16.12.2024

References

- 1 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2021). Ideology of adjusting the chemical composition of synthetic cast iron in the process of casting production. *Metal and casting of Ukraine*. vol. 29, no. 4 (327), 30–40 [in Ukrainian].
- 2 Sirenko, K.A., Derecha, D.O., Mazur, V.L. (2023). Application of the Monte Carlo method in the calculation of the charge and regulation of the chemical composition of cast iron in the process of its smelting. *Casting processes*, no. 4 (153), 44–57 [in Ukrainian].
- 3 Oreshkin, V.D. (1961). Fundamentals of Foundry Production. Moskva: Mashgiz. 327 p. [in Russian].
- 4 Gabertsettel A.I. (1969). Smelting and casting of pig iron. Leningrad: Mashinostroenie. 92 p. [in Russian].

- 5 Kurdyumov, D.Ya., Tan, E.B. (1984). Calculation of optimal charge composition on the computer. Moskva: Metallurgy. 73 p. [in Russian].
- 6 Vinogradov, Oleg. Calculation of charge for production of C420 grey iron by the selection method. <https://on-v.com.ua/novosti/texnologii-i-nauka/raschet-shixty-dlya-polucheniya-serogo-chug/> [in Russian].
- 7 Vozdvizhensky, V.M., Grachev V.A., Spassky V.V. (1984). Casting alloys and the technology of their melting in mechanical engineering. Moskva: Mashinostroenie. 432 p. [in Russian].
- 8 Arkhangelskiy, A.V., Pisarenko, L.Z., Averkin, S.I. (2000). Computer programme for calculation of charge composition. Foundry production, no. 12 pp, 26–27 [in Russian].
- 9 Selivorstov, V.Y. Software tool for calculating the charge with regard to the economic efficiency indicator. Scientific works. Computer technologies. Issue 161, vol. 173, pp. 154–157 [in Ukrainian].
- 10 Ponomarenko, O.I., Pelikh, V.F., Nikiforov, A.V. (1993). Methods of charge calculation for foundry alloys smelting. System approach. Kyiv.: ISIO of Ukraine. 74 p. [in Russian].
- 11 Rybak, V.M., Chornozem, D.S. (2011). Calculation of the charge using the MS EXCEL solution search package. Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Special Metallurgy: Yesterday, Today, Tomorrow». Kyiv, NTUU «KPI», pp. 308–321 [in Ukrainian].
- 12 Kirichenko, V.M. Calculation of optimal composition of charge materials by methods of linear programming. <http://masters.donntu.ru/2007/kita/kirichenko/library/b7.html> [in Russian].
- 13 Sokolov, D.D., Prikhodko, O.V. (2017). Algorithm and programme for calculating and correcting the components of the charge when producing high-strength cast iron for foundries. Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy, no. 2 (41) pp. 145–149 [in Russian].
- 14 Rubinstein, E.G., Zaitsev, M.V. (1989). Optimisation of charge composition and properties of high-strength cast iron. Foundry, no. 10, pp. 14–15 [in Russian].
- 15 Malykhin, I.A., Vdovin, K.N., Milyukov, S.V. (1980). Computer calculation of the optimum charge composition. Foundry production, no. 10, pp.15–16 [in Russian].
- 16 Sirenko, K.A. (2022). Development of the methodology for determining the composition of the charge for iron smelting in induction crucible furnaces. *Metal and casting of Ukraine*, vol. 30, no. 2 (329). pp. 20–29 [in Ukrainian].
- 17 Sirenko, K. A., Mazur, V. L. (2021). Assessment of stability of chemical composition and mechanical properties of industrial lots of synthetic iron. *Casting processes*, no. 4 (146),pp. 66–75. <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.066> [in Ukrainian].
- 18 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2023). Advantages and disadvantages of methods for calculating the charge for smelting synthetic cast iron in foundry. *Casting processes*, no. 3 (153), pp. 49–60 [in Ukrainian].
- 19 Mazur, V.L., Naidek, V.L., Popov, Ye.S. (2021). Comparison of cast-iron and composite brake pads with cast-iron inserts for rolling stock of railways. *Metal and Casting of Ukraine*, vol. 29, no. 2 (325), pp. 80–89. <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.02.080> [in Ukrainian].

Received 16.12.2024

K.A. Sirenko^{*}, PhD (Engin); e-mail: thermoexp.metal@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

V.L. Mazur^{*}, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Chief Researcher; e-mail: prof.vlm@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8970-5389>

D.O. Derecha^{*,**}, PhD (Phys. & Math), Senior Research Scientist.¹, Head of the Lab.²; e-mail: dderecha@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2442-3759>

^{*} Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

^{**} Baryakhtar Institute of Magnetism of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

A MODERN APPROACH TO THE ANALYTICAL METHOD OF CHARGE CALCULATION

The relevance of the work is determined by the need to clarify and further develop approaches to the formation and calculation of the composition of the charge, which is associated with the expansion of factors that affect the technology of foundry production and which must be taken into account when performing such calculations. The article substantiates approaches to the development of traditional solutions to the problem of forming the composition of the charge for smelting iron, steel, and alloys in connection with the commissioning of modern smelting units and the use of different charge materials than before. Traditional methods of charge calculation using computer technology are analysed. The advantages and disadvantages of classical approaches and methods traditional for foundry production are proved. It is shown that the known methods and computer programs developed for modelling the procedure for selecting the charge and regulating the chemical composition of the melt of iron, steel or alloys in the process of their smelting do not take into account the instability of the chemical composition of the charge components. It is also shown that, according to well-known methods, charge calculations are usually carried out under the assumption that the content of chemical elements in each of its components is equal to their average values from the ranges of values regulated by standards, specifications or other regulatory documents for charge materials. If the charge is formed on the basis of this principle, there is a risk that the range of content of any chemical element in the smelted iron may be wider and go beyond the regulated range in the standard for finished products with all the negative consequences.

Keywords: foundry, cast iron, smelting, charge, calculations, methodology, improvement.