
ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2023.03.049>

УДК 621.74:669.13.017

К.А. Сіренко, мол. наук. співроб.; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com;
ORCID 0000-0003-2613-8094

В.Л. Мазур, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., гол. наук. спів-
роб.; e-mail: prof.vlm@ukr.net; ORCID 0000-0001-8970-5389

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

ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ШИХТИ ДЛЯ ВИПЛАВКИ СИНТЕТИЧНОГО ЧАВУНУ В ЛИВАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Проаналізовано переваги й недоліки відомих методів розрахунку відсоткового вмісту компонентів шихти для виплавлення сірого синтетичного чавуну різного призначення. Показано, що відомі методики в більшості вирішують задачу вибору оптимального складу компонентів шихти для виплавлення чавуну із заданим хімічним складом при мінімальних витратах на необхідні компоненти шихти. Наведено інформацію щодо шихтових матеріалів, що є найпоширенішими у виробничій практиці ливарних підприємств. Викладено принципи та методики наближеного розрахунку шихти. На конкретному прикладі представлено послідовність розрахунку складу шихти методом підбору. Ця методика поширилась у виробничій практиці завдяки її простоті й спроможності забезпечити доволі прийнятні в першому наближенні результати щодо формування складу шихти для виплавлення сірого синтетичного чавуну в індукційних тигельних печах. Суттєвий недолік відомих методик розрахунку шихти полягає в тому, що всі вони не враховують нестабільності хімічного складу і властивості компонентів шихти. Відомі методики не дають можливості на етапі розрахунку складу шихти прогнозувати діапазони розкиду вмісту хімічних елементів у складі виплавленого чавуну й оцінювати небезпеку виходу їхнього вмісту за межі діапазонів, визначених стандартами на ливарну продукцію. Висвітлено резерви й перспективи вдосконалення методик розрахунку складу шихти шляхом застосування вірогіднісного підходу до оцінки нестабільності вмісту хімічних елементів у складі компонентів шихти шляхом застосування методу Монте-Карло. Запропоновану методику розрахунку шихти слід розглядати як складову комплексного двоетапного підходу до моделювання процедури забезпечення необхідного хімічного складу чавуну, який виплавляють в індукційних печах.

Ключові слова: чавун, шихта, металобрухт, феросплави, плавка.

У нашій статті [1] на підставі огляду літературних джерел розглянуто стан і основні напрямки розвитку методів визначення складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах. Показано, що забезпечення заданого хімічного складу чавуну, сталі, будь-яких металевих сплавів при їх виплавленні починають із розрахунку шихти. Ця тема широко висвітлена в технічній літературі [2–9 та ін.].

Проблеми автоматизації, механізації та комп'ютеризації процесів лиття

У цих та багатьох інших працях запропоновано різні підходи й методи розрахунку складу шихти для виплавлення синтетичного чавуну в ливарному виробництві. Найвідомішими методами розрахунку складу шихти є [2–6; 7, с. 158 та ін.]: метод підбору, аналітичний, графічний, графоаналітичний, метод трикутників, метод лінійного програмування тощо. Усі вказані методи розрахунку шихти для виплавлення чавуну та інших сплавів мають свої переваги й придатні для застосування на практиці. Головний недолік відомих методів визначення шихти для виплавлення чавуну полягає в тому, що всі вони орієнтуються при розрахунках на забезпечення середніх величин відсоткового вмісту елементів у складі готового чавуну. Але випадки хімічного складу готового чавуну за межі, регламентовані стандартом, зумовлюються відхиленнями вмісту будь-якого елемента в менший бік від його мінімального значення у стандарті чи внаслідок відхилення в бік перевищення максимально допустимої величини його вмісту. Навіть при тому що середні величини відсоткового вмісту елементів можуть збігатися із середніми значеннями відповідних діапазонів їхнього вмісту, визначеними в стандартах чи технічних умовах на чавунні вироби. Саме тому відомі методи потребують розвитку в напрямку, який позбавляє їх зазначеного недоліку.

З огляду на сказане, проаналізуємо можливості запропонованого в наших статтях [1, 10–11] напрямку розвитку відомих методик [2–9 та ін.] розрахунку складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах. За базовий приймаємо принцип розрахунку шихти методом підбору, що викладений у статті [2]. Розрахунки виконаємо на прикладі визначення складу шихти для виплавлення в індукційній тигельній печі місткістю 3000 кг чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок типу «М» залізничного транспорту згідно з вимогами ГОСТ 30249-97 до хімічного складу чавуну. Будемо дотримуватися порядку й схеми представлення результатів розрахунку складу шихти методом підбору, рекомендованого в праці [2].

У табл. 1 представлено необхідні для розрахунку початкові дані. Використовуючи досвід ливарного заводу ТОВ «М-ЛИТ» [9], в першому наближенні приймаємо, що в шихті масою 3000 кг частка металобрухту складає 2000 кг (66,6 %), частка

Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунку шихти масою 3000 кг для виплавлення сірого чавуну з хімічним складом відповідно до вимог ГОСТ 30249-97

№	Компоненти шихти тощо	Марка, тип	Відсотковий вміст елементів у складі компонентів шихти, %					Вміст у складі шихти, %
			C	Si	Mn	S	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	66,6
2.	Зворот власного виробництва	Відходи виробництва чавуну	2,7...3,4	0,7...1,0	0,4...0,9	до 0,20	0,4...0,9	33,4
3.	Феросиліцій ДСТУ 4117-2002	ФС65	0,2	63–68	0,5	0,02	0,05	–
4.	Феромарганець ДСТУ 3547-97	ФМн78	7,0	6,0	75–82	0,03	0,7	–
5.	Карбюризатор	бій електродів	95	–	–	–	–	–
6.	Втрати від угару в процесі плавки, %	–	5	3	10	–	–	–

звороту власного виробництва такого чавуну — 1000 кг (33,4 %). При цьому як металобрухт вибираємо обрізь штабової сталі 08кп і 08Ю, яку використовують для виготовлення кузовів автомобілів. Хімічний склад цих сталей відповідає ГОСТ 9045-70 [12]. Підкреслимо, що прийняті орієнтовні обсяги металобрухту і звороту власного виробництва у розрахунках складу шихти можуть бути іншими. Їх вибір визначається різними факторами (наявністю на підприємстві металобрухту певного класу, його вартістю, наявністю достатньої кількості звороту тощо). Далі ці обсяги будуть уточнюватися.

Для зменшення обчислювальних операцій у прикладі, що розглядається, корекцію вмісту фосфору й сірки виключаємо з розрахунків. Розрахунки будемо виконувати відносно вмісту трьох елементів у шихті: C, Si, Mn.

Хімічний склад готового чавуну приймаємо за даними ГОСТ 30249-97, %: C = 2,7...3,4; Si = 0,7...1,0; Mn = 0,4...0,9; S = до 0,20; P = 0,4...0,9. Вважаємо, що хімічний склад звороту власного виробництва відповідає таким самим показникам відсоткового вмісту елементів.

Відповідно до методики, запропонованої у роботі [2], на першому етапі підбір складу шихти є таким.

Спочатку приймаємо, що для отримання готового чавуну з необхідним хімічним складом не потрібно додавати у розплав феросплави й карбюризатори. Тобто вважаємо, що шихта загальною масою 3000 кг складається тільки з металобрухту (2000 кг, 66,6 % від загальної маси завалки) і звороту власного виробництва (1000 кг, 33,4 %). Розраховуємо вміст хімічних елементів у складі готового чавуну, виплавленого з такої шихти. Дані заносимо у табл. 2.

Далі на підставі відомого досвіду ливарних підприємств щодо виплавлення чавуну аналогічного типу приймаємо величини «точок прицілювання» при коригуванні вмісту трьох головних елементів (C, Si, Mn) у його розплаві. Зазвичай у виробничій практиці за «точки прицілювання» приймають середні величини відсоткового вмісту цих елементів у діапазонах, визначених у стандартах. У нашому прикладі скористуємося результатами статистичних досліджень хімічного складу партій-плавок чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок залізничного транспорту, зафіксованими у

Таблиця 2
Результати першого етапу розрахунків складу шихти

№	Компоненти шихти	Середні величини вмісту елементів у складі компонентів шихти, %					Вміст у складі шихти, %, кг					Вміст елементів у складі чавуну, згідно з розрахунками, %				
		C	Si	Mn	S	P	C	Si	Mn	S	P	C	Si	Mn	S	P
1.	Металобрухт, сталь 08кп, 08Ю	0,085	0,025	0,3285	до 0,03	0,225	66,6; 2000	0,017	0,22	до 0,02	0,15	0,057	0,017	0,22	до 0,02	0,15
2.	Зворот ГОСТ 30249-97	3,05	0,85	0,65	до 0,20	0,65	33,4; 1000	0,28	0,22	до 0,07	0,22	1,02	0,28	0,22	до 0,07	0,22
3.	Сумарно	—	—	—	—	—	100; 3000	0,297	0,43	до 0,09	0,37	1,077	0,297	0,43	до 0,09	0,37
4.	Втрати від угару, %	5	3	10	—	—	—	0,009	0,043	—	—	0,054	0,009	0,043	—	—
5.	Разом	—	—	—	—	—	—	0,288	0,387	—	—	1,023	0,288	0,387	—	—
6.	Склад чавуну, прийнятий у розрахунках	—	—	—	—	—	—	1,17	0,87	до 0,20	0,7	2,9	1,17	0,87	до 0,20	0,7

виробничій практиці ливарного заводу ТОВ «М-ЛИТ» [13]. Приймаємо такі значення, %: C = 2,9; Si = 1,17; Mn = 0,87; P = 0,70; S до 0,03. Ці величини вносимо у табл. 2. Звертаємо увагу, що зазначений вміст кремнію суттєво перевищує середню величину діапазону цього елемента в ГОСТ 30249-97, яка дорівнює 0,85 %.

Результати розрахунків складу чавуну, що буде отриманий при виплавленні його із прийнятої шихти, представлено в табл. 2. Виконані розрахунки потребують уточнення, оскільки хімічний склад чавуну суттєво відрізняється від визначеного у стандарті.

Розрахунок вмісту карбюризатора у шихті. У роботі [2] та ін. показано, що вуглець, який вводиться у чавун із карбюризатором, засвоюється в розплаві на ~ 85 %. Відповідно, з наявного у складі карбюризатора (бою електродів) вмісту вуглецю на рівні 95 % в чавун буде переходити менший відсоток вуглецю, а саме: $C = 95 \cdot 0,85 = 80,75$ % від внесеної у шихту маси карбюризатора. Тому в подальших розрахунках будемо оперувати відсотковим вмістом вуглецю, що вноситься (і засвоюється) у склад чавуну карбюризатором, на рівні 80,75 %, а не 95 %, як зазначено у табл. 1, рядок 5. З огляду на це, уточнюємо масу карбюризатора, який має бути внесений до складу шихти.

Вміст вуглецю у чавуні прийняли для попередніх розрахунків на рівні $C = 2,9$ %. За результатами розрахунків, наведеними в табл. 2 (рядок 5), вміст вуглецю у складі чавуну дорівнює 1,023 %. Виходить, що до складу шихти треба додати: $2,9 - 1,023 = 1,877$ % вуглецю. Тобто у складі шихти не вистачає C 1,9 %. Відповідно, у шихту необхідно додати $100 \cdot \frac{1,9}{80,75} = 2,35$ % карбюризатора.

Розрахунок вмісту кремнію у шихті. У першому наближенні було прийнято, що вміст кремнію у чавуні має складати 1,17 %. За результатами розрахунків (табл. 2, рядок 5) отримали, що вміст кремнію у складі чавуну дорівнює 0,288 %. Не вистачає $Si = 1,17 - 0,288 = 0,882$ %. Далі вважаємо, що у складі феросиліцію ФС65 вміст кремнію складає 65 %. Тобто приймаємо середнє значення вмісту кремнію з діапазону, визначеного у ДСТУ 4117-2002. Відповідно, для отримання у чавуні вмісту кремнію на рівні 1,17 % в шихту треба внести $100 \cdot \frac{0,882}{65} \approx 1,35$ % феросиліцію ФС65.

Розрахунок вмісту марганцю у шихті. Вище було прийнято, що в розрахунках відсотковий вміст марганцю у готовому чавуні має дорівнювати 0,87 %. Згідно з розрахунками (табл. 2, рядок 5), вміст марганцю складає 0,387 %. Виходить, що необхідно збільшити вміст марганцю у чавуні на $0,87 - 0,387 = 0,483$ %. У феромарганцю ФМн78 вміст марганцю складає в середньому ~ 78 %. Для отримання в чавуні вмісту марганцю на рівні 0,87 % необхідно у склад шихти внести $100 \cdot \frac{0,483}{78} \approx 0,62$ % ФМн78.

На підставі результатів цих розрахунків скоригуємо відсотковий вміст компонентів у складі шихти. Передбачаємо введення до складу шихти додатково 2,35 % карбюризатору (бою електродів), 1,35 % феросиліцію ФС65 і 0,62 % феромарганцю ФМн78. Як зазначалося вище, для скорочення обсягів розрахунків вміст фосфору й сірки у складі шихти не коригуємо.

Другий етап підбору складу компонентів шихти. У зв'язку з уведенням у шихту карбюризатора і феросплавів її маса перевищує 3000 кг. Для виключення цього перевищення з розрахунків зменшуємо вміст металобрухту в шихті на величину відсотків, внесених у шихту карбюризатора (2,35 %), феросиліцію (1,35 %), феромарганцю (0,62 %). Отримуємо відсотковий вміст металобрухту на рівні $66,6 - 2,35 - 1,35 - 0,62 = 62,28$ %. Унаслідок зазначених змін часток компонентів у складі шихти перераховуємо вміст кожного елемента у складі чавуну. Результати перерахунку вносимо в табл. 3. Звертаємо увагу, що замість зменшення відсотка металобрухту в шихті можна було зменшити в шихті на той самий відсоток вміст звороту власного виробництва. Методика розрахунків від цього б не змінилася.

Аналіз даних табл. 3 свідчить, що хімічний склад чавуну, отриманий у результаті

Таблиця 3
Зведені результати другого етапу розрахунку складу шихти

№	Компонен-ти шихти	Середні величини вмісту елементів у складі компонентів шихти, %					Вміст у складі шихти, %; кг	Вміст елементів у складі чавуну, згідно з розрахунками, %				
		C	Si	Mn	S	P		C	Si	Mn	S	P
1.	Металобрухт, сталь 08кп, 08Ю	0,085	0,025	0,3285	до 0,03	0,225	62,28; 1868,4	0,053	0,016	0,20	до 0,02	0,14
2.	Зворот власного виробництва	3,05	0,85	0,65	до 0,20	0,65	33,4; 1000	1,02	0,28	0,22	до 0,07	0,22
3.	Феросиліцій ФСС65	0,2	63–68	0,5	0,02	0,05	1,35	0,0027	0,876	0,007	0,0003	0,0007
4.	Феромарга-нець ФМн78	7,0	6,0	75–82	0,03	0,70	0,62	0,043	0,037	0,484	0,0002	0,0043
5.	Карбюризатор (бій електродів)	80,75	–	–	–	–	2,35	1,898	–	–	–	–
6.	Сумарно	–	–	–	–	–	–	3,017	1,21	0,911	до 0,09	0,365
7.	Втрати від угару, %	5	3	10	–	–	–	0,1254	0,036	0,091	–	–
8.	Разом	–	–	–	–	–	–	2,892	1,174	0,819	0,09	0,365
9.	Склад чавуну, прийнятий у розрахунках	–	–	–	–	–	–	2,9	1,17	0,87	до 0,20	0,4–0,9
10.	Склад чавуну, згідно з вимогами ГОСТ 30249-97	–	–	–	–	–	–	2,7...3,4	0,7...1,0	0,4...0,9	до 0,20	0,4...0,9

використання розрахункового вмісту компонентів шихти (строка 8, табл. 3), відповідає складу чавуну, визначеному в стандарті. Виняток становить вміст кремнію у чавуні, що перевищує на 0,174 % вимоги ГОСТ 30249-97 (рядок 10, табл. 3), але не виходить за межі допуску 0,2 %, передбаченого в цьому стандарті. Це пов'язано із завищеним вмістом кремнію, прийнятим як орієнтир у розрахунках (рядок 9, табл. 3). У цілому, як бачимо, розрахунок відсоткового вмісту кожного компонента у складі шихти,

виконаний за простою, запропонованою в роботі [2] схемою, призводить до прийнятних у першому наближенні результатів.

Розрахунок маси кожного компонента шихти. У нашому прикладі повна маса (100 %) завалки шихти становить 3000 кг. Відповідно, маса завалки металобрухту, яка у відсотковому вимірі дорівнює 62,28 %, у ваговому еквіваленті становить $3000 \cdot \frac{62,28}{100} = 1868,4$ кг. Вміст звороту – 1000 кг. Вміст феросиліцію ФС65 – $3000 \cdot \frac{1,35}{100} = 40,5$ кг. Вміст феромарганцю ФМн78 – $3000 \cdot \frac{0,62}{100} = 18,6$ кг. Вміст карбюризатора – $3000 \cdot \frac{2,35}{100} = 70,5$ кг. Застосована методика розрахунку шихти [2] дозволяє при бажанні виконати ще одне коло підбору для уточнення вмісту кремнію. Але для прикладу моделювання розрахунку складу шихти, який розглядаємо, це очевидно є зайвим.

У наших статтях [10–11, 13] показано, що на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ» при виплавленні синтетичного сірого чавуну для виробництва гальмових колодок металева шихта складається орієнтовно з брухту сталі ~ 70 % і відходів чавунного литва (ливників, браку тощо) ~ 30 %. Шихту на одну плавку масою 3000 кг формують приблизно з 2000 кг металобрухту, 1000 кг звороту, 85 кг карбюризатора (бою електродів), 65 кг феросиліцію ФС65 і 22 кг феромарганцю ФМн78. Ці показники дещо вищі, ніж результати розрахунків, наведені у табл. 3, але одного порядку величин. Різниця у запропонованих величинах маси компонентів шихти зумовлена різними частками металобрухту й звороту в шихті, різним вмістом хімічних елементів у складі металобрухту, перебільшенням на заводі орієнтовної величини сумарної маси шихти на 172 кг, враховуючи її уточнення в подальшому, тощо. Головне, виконані розрахунки засвідчили, що застосований метод підбору маси компонентів у шихті, призначеної для виплавки синтетичного чавуну, в першому наближенні приводить до задовільних результатів при орієнтації на середні величини вмісту елементів у складі чавуну, виплавленого з цієї шихти. Але при цьому відкритим залишається питання щодо діапазонів вмісту елементів у складі виплавленого чавуну і наскільки ці діапазони збігаються чи не збігаються з аналогічними діапазонами, регламентованими у стандартах на чавун. І як у цих випадках потрібно діяти.

Суттєве посилення ефективності викладеного методу підбору складу шихти та інших подібних методів полягає у врахуванні нестабільності хімічного складу компонентів шихти, зокрема металобрухту й феросплавів. При позитивному в цілому ставленні до визначення складу шихти методом підбору слід зазначити, що результати виконаних розрахунків не дають відповіді на низку важливих запитань. Зокрема, немає відповіді стосовно впливу нестабільності компонентів шихти (металобрухту, феросплавів тощо) на діапазони розкиду відсоткового вмісту хімічних елементів у складі виплавленого чавуну. А попри те, може так статися, що при отриманих розрахункових величинах вмісту компонентів шихти діапазони розподілу вмісту елементів у чавуні виходять за межі діапазонів, регламентованих у стандартах на чавунну продукцію. Зазначені питання важливі, оскільки навіть у межах однієї марки феросиліцію чи феромарганцю різні партії цих феросплавів суттєво різняться за вмістом Si, Mn. Зрозуміло, що виробничники при виплавленні чавуну намагаються застосовувати феросплави у мінімальних обсягах. Але результати розрахунку методом підбору та іншими наближеними методами маси феросплавів у шихті не виключають небезпеку випадку відсоткового вмісту елементів у складі чавуну за межі, регламентовані стандартом. Найпроблемнішим для виробничників є питання нестабільності хімічного складу в різних партіях металобрухту навіть одного класу, марки, оскільки скрупульозного підбору металобрухту за показником стабільності його хімічного складу постачальники цієї сировини не здійснюють.

У табл. 4 представлено результати розрахунків складу шихти для прикладу, що розглядається в даній статті (табл. 1–3). Показано мінімально й максимально можливі величини вмісту Si, які можуть бути внесені до складу чавуну металобрухтом, зворотом власного виробництва, феросиліцієм і феромарганцем. У першому рядку табл. 4 наведено орієнтовні діапазони розподілу кремнію в партіях металобрухту,

Таблиця 4
Результати розрахунку мінімальної, максимальної та вірогідних величин вмісту Si у складі шихти і виплавленого чавуну

Варіант розрахунку	Компоненти шихти, вміст у складі шихти (% , кг), вміст Si , %						Втрати Si від угару (Y _r), %	Вміст Si у чавуні, %		
	Металобрухт, 62,28; 1868,4. Si = 0,01...0,04	Зворот, 33,4; 1000. Si = 0,7...1,0	ФС65, 1,35; 40,5. Si = 63...68	ФМн78, 0,62; 18,6. Si = 5...7						
Si _{min} , %	Si _{min} = 0,01 · 0,6228 = 0,006228	Si _{min} = 0,7·0,334 = 0,2338	Si _{min} = 63·0,0135 = 0,8505	Si _{min} = 5 · 0,0062 = 0,031	Y _r = 4,0	ΣSi _{min} = [0,006228 + 0,2338 + 0,8505 + 0,031] · (1 – 0,04) = 1,1215 · 0,96 = 1,0766				
Si _{max} , %	Si _{max} = 0,04 · 0,6228 = 0,0249	Si _{max} = 1,0 · 0,334 = 0,334	Si _{max} = 68 · 0,0135 = 0,918	Si _{max} = 7 · 0,0062 = 0,0434						
Розрахунки з використанням методу Монте-Карло у припущенні, що вміст кремнію в компонентах шихти є величиною випадковою										
1.	0,0163	0,01015164	0,872	0,291248	65,5	0,88425	5,78	0,035836	2,17	1,194979402
2.	0,0289	0,01799892	0,703	0,234802	63,4	0,8559	5,13	0,031806	3,04	1,10583551
3.	0,02	0,012456	0,811	0,270874	67,8	0,9153	6,72	0,041664	3,15	1,201224739
.										
998.	0,0155	0,009653	0,993	0,331662	65,5	0,88425	6,34	0,039308	3,97	1,214658
999.	0,0372	0,023168	0,963	0,321642	63,1	0,85185	5,8	0,03596	3,66	1,187506
1000.	0,0388	0,024165	0,937	0,312958	64,6	0,8721	5,3	0,03286	2,96	1,205317

Примітка табл. 4. Позначки min і max свідчать про результати розрахунків при мінімальних і максимальних величинах вмісту Si у складі компонентів шихти. Вміст Si у складі феромарганцю ФМн78 в середньому становить 6 %. У розрахунках прийняли, що діапазон вмісту Si становить від 5,0 % до 7,0 %. Цифрами 1, 2, 3...998, 999, 1000 позначено варіанти випадкових величин вмісту Si у складі компонентів шихти, розіграних методом Монте-Карло із зазначених діапазонів вмісту Si. Прийняли, що втрати Si в процесі плавки внаслідок угару (Y_r) становлять в середньому $Y_r = 3$ % і перебувають у межах діапазону $Y_r = (2...4)$ %. Випадкові величини вмісту Si, визначені методом Монте-Карло, позначено жирним кольором. У таблиці позначено: Ме — металобрухт; Зв — зворот; ФС — феросиліцій; ФМн — феромарганець; Уг — угар.

звороту, феросплавів та їхній відсотковий вміст у складі шихти. При цьому прийняли, що діапазон розкиду вмісту Si у складі феросиліцію ФС65 становить від 63 до 68 %. Діапазон вмісту Si у феромарганцю ФМн78 дорівнює (5...7 %). При середньому відсотку угару кремнію на рівні 3 % при виплавленні чавуну вважали, що мінімальний угар складає 2,0 %, максимальний — 4 %. У розрахунках Si_{min} угар цього елемента в процесі плавки умисно приймали максимальним $Y_r = 4$ %, а при розрахунках Si_{max} угар приймали на рівні $Y_r = 2$ %. Звісно, це відобразилося в результатах розрахунків. Відповідно, у розрахунках мінімально можливого вмісту кремнію у складі виплавленого чавуну враховували мінімальні величини Si з указаних діапазонів. При розрахунках максимальних величин — максимальні значення Si у наведених діапазонах (табл. 4, рядок 1). Відповідно, отримали $Si_{min} = 1,0766$ %, $Si_{max} = 1,2939$ %. Діапазон (1,0766...1,2939) % можливого вмісту кремнію у виплавленому чавуні суттєво зміщений у бік завищених величин порівняно з діапазоном (0,7...1,0) %, визначеним у стандарті. При цьому максимальна величина вмісту Si в чавуні, хоч і мало ймовірна, виходить за межі визначеного стандартом діапазону кремнію у чавуні навіть з урахуванням допуску $\pm 0,2$ %. Розраховане мінімальне значення $Si_{min} = 1,0766$ % суттєво перевищує величину ($Si = 0,7$ %) вмісту кремнію у чавуні. Таким чином, навіть ці орієнтовні розрахунки схилиють до висновку, що прийнятий за точку прицілювання у попередніх розрахунках методом підбору вміст кремнію у чавуні $Si = 1,17$ % не є прийнятним. За наведеними у табл. 4 даними Si_{min} і Si_{max} при розрахунку складу шихти точку прицілювання щодо відсоткового вмісту Si треба змістити в бік менших величин приблизно на (0,30...0,35) %.

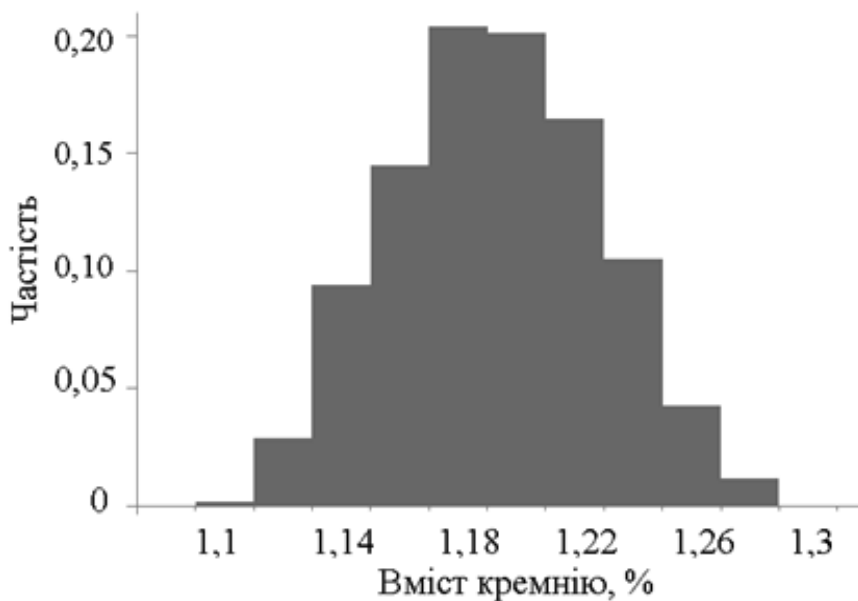
Детальніше вплив нестабільності вмісту кремнію у компонентах (металобрухті, звороті власного виробництва, феросплавах) висвітлюють розрахунки, виконані у вірогіднісному підході з використанням методу Монте-Карло. На рис. 1 представлена гістограма розподілу вмісту кремнію в чавуні, побудована на вірогіднісному підході щодо врахування нестабільності вмісту цього елемента у компонентах шихти. Методика розрахунків, результати яких представлено у вигляді цієї гістограми, показана у табл. 4.

Згідно з розрахованими даними, середня арифметична величина (середнє значення $\bar{x}$ вмісту кремнію у складі чавуну $\bar{x} = Si_{cp} = 1,183$ %). Середнє лінійне відхилення

l вмісту Si у масиві даних становить $l = \frac{1}{N} \sum |x_i - \bar{x}| = 0,029$ %, середнє квадратичне відхилення дорівнює $\sigma_{si} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})^2} = 0,035$ %. Де $\bar{x}_i$ — індивідуальні значення

окремої ознаки (вмісту у складі компонента шихти чи виплавленого чавуну); $\bar{x}$ — середня арифметична (середнє значення ознаки); i — варіант розрахунку; N — обсяг сукупності варіантів розрахунку методом Монте-Карло (сумарна кількість варіантів). У нашому прикладі $N = 1000$.

Якщо прийняти, що розподіл розрахованих методом Монте-Карло величин вмісту



Гістограма розподілу кремнію у в партіях чавуну, визначена при вірогіднісному підході до врахування нестабільності вмісту цього елемента в компонентах шихти і застосуванні методу Монте-Карло

кремнію у виплавленому чавуні, як і в компонентах шихти, відповідає нормальному закону Гаусса (табл. 4, рисунок), то діапазон розкиду вмісту Si дорівнює $Si_{cp} \pm 3\sigma_S$. Тобто становить $(1,183 \pm 0,035)\%$. Відповідно, $Si_{min} = Si_{cp} - 3\sigma_{Si} = 1,183 - 3 \cdot 0,035 =$

$= 1,175\%$ і $Si_{max} = Si_{cp} + 3\sigma_{Si} = 1,183 + 3 \cdot 0,035 = 1,288\%$. Таким чином, розрахований діапазон вірогідних величин вмісту кремнію у виплавленому чавуні дорівнює $(1,178...1,288)\%$.

Розраховані з використанням методу Монте-Карло вірогідні величини середнього вмісту кремнію у виплавленому чавуні $Si_{cp} = 1,183\%$ і діапазону можливого розкиду $Si = (1,178...1,288)\%$ не збігаються з наведеними вище орієнтовними величинами цих показників, визначеними для екстремально можливих мінімального й максимального значень. Розрахунки з використанням вірогіднісного підходу і застосуванням методу Монте-Карло засвідчили, що діапазон розкиду вірогідних величин вмісту кремнію у виплавленому чавуні вужчий порівняно з регламентованим у стандарті. При цьому діапазон суттєво зміщений у бік більших величин вмісту кремнію у чавуні. Отримані результати в цілому указують напрям корекції відсоткового вмісту й маси компонентів шихти при моделюванні визначення її складу.

На завершення підкреслимо, що наведені викладки є показовим прикладом можливого уточнення відомих методик визначення складу шихти для виплавлення чавуну, сталі, сплавів. Застосування методу Монте-Карло в методиці визначення складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних печах відповідає сучасному напрямку [4, 9, 14 та ін.] використання кібернетичних моделей в управлінні технологічними процесами в ливарному виробництві.

Висновки

Відомі методи вибору компонентів і розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну дозволяють у першому наближенні визначати відсотковий вміст кожного компонента у складі шихти, виходячи з вимог стандарту до хімічного складу чавунного литва і технічних можливостей ливарного виробництва на конкретних підприємствах. Деякі з названих методів передбачають можливість оптимізувати витрати на шихту. Суттєвим недоліком розповсюджених на практиці методів визначення складу шихти є те, що в розрахунках не враховується нестабільність

хімічного складу компонентів шихти (металобрухту, феросплавів, карбюризаторів тощо). Це суттєво погіршує достовірність, точність розрахунків шихти і, відповідно, ступінь надійності прогнозування хімічного складу виплавленого чавуну. Врахування впливу нестабільності хімічного складу компонентів шихти на вміст хімічних елементів у складі виплавленого чавуну забезпечує методика моделювання процедури визначення складу шихти, заснована на вірогіднісному підході із застосуванням методу Монте-Карло.

Список літератури

- 1 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. <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>
- 2 Виноградов Олег. Расчет шихты для получения серого чугуна СЧ20 методом подбора. <https://on-v.com.ua/novosti/tehnologii-i-nauka/raschet-shixty-dlya-polucheniya-serogo-chuga/>
- 3 Булгакова А. И., Гильманшина Т. Р., Баранов В. Н., Лыткина А. И. Основы получения отливок из сплавов на основе железа (методические указания по циклу практических работ). Красноярск. Сибирский федеральный университет, 2022. 91 с.
- 4 Рафальский И.В., Довнар Г. В., Лущик П. Е. Решение задачи оптимизации состава шихты методом линейного программирования. *Литье и металлургия*, 2006. № 2 (38). Ч. 1. С. 154–157.
- 5 Ивлев А. В. Оптимизация состава шихты в высокотемпературных теплотехнических агрегатах методом линейного программирования. *Молодежь и наука. Сборник материалов VI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mm2010/section2.htm1>
- 6 Соболев Б.М., Куриный В.В. Расчеты в технологических процессах плавки сталей (углеродистых, легированных, высоколегированных). Комсомольский-на-Амуре гос. технич. университет, 2015. 112 с.
- 7 Худокормов Д. Н. Производство отливок из чугуна. Минск: Вышейшая школа, 1987. 198 с.
- 8 Ямшинський М. М. Жаростійкі та зносостійкі ливарні сплави на основі заліза для роботи в екстремальних умовах: Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Київ, ФТІМС НАН України, 2019. 510 с.
- 9 Ямшинський М. М., Грядовський І. О. Програмне забезпечення для розрахунку шихти для сталей. *V Міжнародна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні»*. Київ. 28–29 травня 2013. С. 144–146.
- 10 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. 44–54.
- 11 Сіренко К.А. Удосконалення технології коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційних тигельних печах. *Процеси лиття*. 2022. № 1 (147). С. 3–10. <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.003>
- 12 Беньковский М.А., Мазур В.Л., Мелешко В.И. Производство автомобильного листа. Москва: Металлургия, 1979. 256 с.
- 13 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка стабільності хімічного складу і властивостей промислових партій синтетичного чавуну. *Процеси лиття*, 2021. № 4 (146). С. 66–75.
- 14 Пелых С.Г., Пономаренко О.И. Кибернетические модели в управлении качеством отливок. Оборудование и инструмент для профессионалов. *Металлообработка*, 2006. № 1. С. 36–39.

Надійшла 23.06.2023

References

- 1 Sirenko, K.A. (2022). Development of the method of determining the composition of the charge for smelting cast iron in induction crucible furnaces. *Met. lit'e Ukr.*, 2022. Vol. 30. No. 2 (329). P. 20–29. <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005> [in Ukrainian].
- 2 Vinogradov, Oleg. Calculation of charge for production of C420 grey iron by the selection method / <https://on-v.com.ua/novosti/tehnologii-i-nauka/raschet-shixty-dlya-polucheniya-serogo-chug/> [in Russian].
- 3 Bulgakova, A. I., Gilmanshin T. R., Baranov V. N., Lytkina A. I. Fundamentals of making castings from iron-based alloys (guidelines for a cycle of practical works). Krasnoyarsk. Siberian Federal University. 2022. 91 p. [in Russian].
- 4 Rafalski, I. V., Dovnar, G.V., Lushchik, P.E. Solving of the problem of the burden composition optimization by means of linear programming. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy)*. 2006. No. 2. Vol. P. 154–157 [in Russian].
- 5 Ivlev, A. V. Optimization of charge mixture composition in high-temperature thermal units by linear programming method. *Youth and Science. Proceedings of VI All-Russian scientific-technical conference of students, graduate students and young scientists*. Krasnoyarsk. Siberian Federal University. 2011. <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mm2010/section2.htm1> [in Russian].
- 6 Sobolev, B. M., Kuriny, V. V. Calculations in technological processes of steel melting (carbon, alloyed, high-alloyed). Komsomolsk-on-Amur State Technical University. 2015. 112 p. [in Russian].
- 7 Khudokormov, D. N. Manufacture of cast iron castings. Minsk: Higher School. 1987. 198 p. [in Russian].
- 8 Yamshynskiy, M. M. Heat resistant and wear resistant iron based casting alloys for work under extreme conditions: The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Kyiv, 2019. Physico-technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine. 510 p. [in Ukrainian].
- 9 Yamshynskiy, M. M., Gryadovskiy, I. O. Software for calculating the charge for steels. *V International Conference «New Materials and Technologies in Mechanical Engineering»*. Kyiv. 28–29 May 2013. P. 144–146 [in Ukrainian].
- 10 Sirenko, K. A., Mazur, V. L. Ideology of adjustment of the chemical composition of synthetic cast iron in the manufacturing process of casting. *Met. lit'e Ukr.* 2021. Vol. 29. No. 4 (327). P. 44–54 [in Ukrainian].
- 11 Sirenko K. A. Improvement of technology of adjustment of chemical composition of iron during melting in crucible induction furnaces. *Casting Processes*, 2022. No. 1 (147). P. 3–10 <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.003> [in Ukrainian].
- 12 Beniakovskiy, M. A., Mazur, V. L., Meshko, V. I. Production of automotive sheet. Moskva: Metallurgy, 1979. 256 p. [in Russian].
- 13 Sirenko, K. A., Mazur, V. L. Ideology of adjustment of the chemical composition of synthetic cast iron in the manufacturing process of casting. *Casting Processes*, 2021. No. 4 (146). P. 66–75. <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005> [in Ukrainian].
- 14 Pelykh, S.G., Ponomarenko, O.I. Cybernetic models in casting quality management. Equipment and Tools for Professionals. *Metallroobrabotka*, 2006. No. 1. P. 36–39 [in Russian].

Received 23.06.2023

K.A. Sirenko, Junior Researcher; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com;

ORCID 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; ORCID 0000-0001-8970-5389

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF METHODS FOR CALCULATING THE CHARGE FOR SMELTING SYNTHETIC IRON IN THE FOUNDRY

The article analyses the advantages and disadvantages of the known methods for calculating the percentage of charge components for smelting grey synthetic pig iron for various purposes. It is shown that the known methods mostly solve the problem of choosing the optimal composition of charge components for smelting cast iron with a given chemical composition at minimal costs for the necessary charge components. The article provides information on the charge materials that are most common in the production practice of foundries. The principles and methods of approximate calculation of the charge are outlined. The sequence of calculating the charge composition by the selection method is presented on a specific example. This technique has become widespread in production practice due to its simplicity and ability to provide sufficiently acceptable results in the first approximation for the formation of the charge composition for the smelting of grey synthetic iron in induction crucible furnaces. A significant drawback of the known methods of charge calculation is that they do not take into account the instability of the chemical composition and properties of the charge components. The known methods do not provide an opportunity at the stage of calculating the composition of the charge to predict the ranges of variation of the content of chemical elements in the composition of smelted iron and to assess the danger of their content going beyond the ranges defined by the standards for foundry products. The article highlights reserves and prospects for improving the methods of calculating the composition of the charge by applying a probabilistic approach to assessing the instability of the content of chemical elements in the components of the charge using the Monte Carlo method. The proposed methodology for calculating the charge should be considered as an integral part of a comprehensive two-stage approach to modelling the procedure for ensuring the required chemical composition of pig iron smelted in induction furnaces.

Keywords: cast iron, charge, scrap metal, ferroalloys, melting.