

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

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

Розвиток методики визначення складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах¹

Реалізовано можливість посилення ефективності регулювання вмісту хімічних елементів у чавуні, що виплавляється в індукційних тигельних печах, шляхом врахування нестабільності хімічного складу компонентів шихти. Сформульовано ідеологію і алгоритм визначення маси компонентів шихти для виплавлення чавуну, які засновані на врахуванні ймовірнісних оцінок розподілу хімічних елементів у складі компонентів і застосуванні методу Монте-Карло для врахування нестабільності вмісту хімічних елементів у шихті. Розглянуто проблеми, пов'язані з постачанням металобрухту та іншої металевої сировини на ливарні підприємства і використанням їх при виплавленні чавуну. Наведено результати дослідження розподілу хімічних елементів у складі феромарганцю і феросиліцію, які використовують в шихті при виплавленні чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок та «клину Ханіна» залізничного транспорту. Розвинуто методику врахування в ймовірнісному аспекті нестабільності хімічного складу металобрухту, феросплавів, інших компонентів шихти при визначенні їх кількості. Розроблено підходи до оптимізації процесу коригування хімічного складу чавуну при його виплавленні, які передбачають застосування «коефіцієнтів вагомості» вмісту кожного хімічного елемента у складі чавуну і дозволяють враховувати їх вплив на якість литва і на техніко-економічні показники його виробництва. Запропоновано при виплавленні чавуну, призначеного для виготовлення зазначених ливарних виробів, надавати найбільші коефіцієнти вагомості кремнію і марганцю. Рекомендовано ступінь угару елементів у процесі плавки чавуну прогнозувати і враховувати ще на стадії формування шихти. Визначено орієнтовний склад шихти для виплавлення сірого чавуну відповідного призначення і порядок завантаження шихтових матеріалів в індукційні тигельні печі. Головні цілі й завдання на нинішньому етапі розвитку ливарного виробництва в частині удосконалення технології, порядку, процедури, алгоритму регулювання хімічного складу чавуну при його виплавленні полягають у зменшенні собівартості литва. Зокрема й за рахунок впровадження на практиці методів коригування вмісту хімічних елементів у розплаві чавуну та врахування у ймовірнісному аспекті нестабільності якості компонентів шихти, насамперед феросплавів і металобрухту.

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

Основним напрямом подальшого розвитку виробництва високоякісного ливарного чавуну є перехід на виплавлення його у електричних індукційних печах. При цьому висока якість чавуну забезпечується шляхом впровадження ефективних технологічних рішень, що передбачають оптимізацію складу шихтових матеріалів і температурних режимів плавки, створення умов, необхідних для формування заданих структури, механічних властивостей, службових характеристик чавунного литва. В зазначеній послідовності домінуючим фактором, який надає підстави формування необхідної мікроструктури чавуну і готових виробів, є його хімічний склад. При виробництві чавуну з жорсткими вимогами до хімічного складу, механічних і експлуатаційних характеристик, наприклад призначеного для виготовлення гальмових колодок рухомого складу залізничного транспорту, постає задача тонкого регулювання вмісту хімічних елементів безпосередньо у розплаві металу, який виплавляється в електричних тигельних печах. Ключовим питанням при вирішенні цієї задачі є виявлення і врахування в реальних промислових умовах впли-

ву непостійності хімічного складу матеріалів, з яких формується шихта для виплавлення чавуну. Шихта для виготовлення чавуну, а далі литва відповідального призначення, значною мірою впливає не тільки на якість продукції, а й на техніко-економічні показники її виробництва. Небезпека при виплавленні ливарного чавуну пов'язана з наявністю домішкових хімічних елементів в металобрухті, частка якого у шихті найбільша. Саме тому створювати умови для виготовлення литва заданої якості необхідно ще на стадії підготовки шихти для виплавлення чавуну. Це завдання потребує постійного вдосконалення методики визначення оптимального складу компонентів шихти з максимально можливим врахуванням їх походження і реальних властивостей. В першу чергу зазначене стосується металобрухту та феросплавів у складі шихти. Діюча практика вирішення зазначеної задачі на виробництві потребує вдосконалення, і ця тема актуальна [1].

В технічній літературі є інформація щодо методології прогнозування якості розплавів чавунів та сталей різного сортаменту за результатами першого хімічно-

¹Роботу виконано під керівництвом В.Л. Мазура, чл.-кор. НАН України, д-ра техн. наук, проф., гол. наук. співр., e-mail: prof.vlm@ukr.net

го аналізу металу у виливках та комп'ютерного розрахунку шихти. Так у ґрунтовних роботах [2–3 та ін.] М.М. Ямшинського достатньо докладно представлено розроблені методологію, алгоритми, програмне забезпечення щодо прогнозування властивостей розплаву жаростійких та зносостійких ливарних сплавів, зокрема, хромомарганцевих чавунів та хромоалюмінієвих сталей, за результатами хімічного аналізу проби металу, відібраної із розплаву у процесі плавки. Гідність запропонованого підходу полягає в його системності та багатогранності.

Забезпечення заданого хімічного складу будь-якого металевого сплаву завжди починають з розрахунку шихти для його виплавлення. При цьому використовують інформацію з попередньо сформованих баз даних відносно хімічного складу сталевих брухт різних марок, якості та вартості феросплавів тощо. Представлена в роботі [2] комп'ютерна програма має, на думку її автора, надавати технологу можливість перевіряти правильність розрахунку шихти за вмістом усіх елементів у хімічному складі сплаву, що розглядається. При відхиленні вмісту якогось елемента від заданих меж технолог здійснює перерахунок і, якщо потрібно, то змінює вихідні дані. Слід погодитися з автором роботи [2], що запропонована методика надає можливість прогнозування хімічного складу чавуну чи сталі в багатовимірному просторі незалежних змінних величин і реалізувати «властивості динамічності, багатофакторності та стохастичності».

Стосовно перспектив подальшого розвитку цієї теми, то доцільно зазначити наступне.

Судячи з тексту роботи [2] і навіть зважаючи на згадування про можливість реалізувати в запропонованих імітаційних моделях властивості стохастичності ця тема, схоже, всебічно ще не опрацьована. Зокрема відносно врахування у вірогіднісному форматі нестабільності хімічного складу матеріалів, які входять у шихту і використовуються для корекції хімічного складу розплаву чавуну або сталі, є певні труднощі. У промисловій практиці складно заготовляти потрібний для виплавки конкретного чавуну сталевий брухт з декількох десятків його марок [4].

В роботі [5, с. 158] зазначено, що при розрахунках складу шихти для виплавлення чавуну використовують різні методи – аналітичний, графічний, графо-аналітичний та метод підбору. У вигляді прикладу в цій роботі розглянуто розрахунки складу шихти для виплавлення чавуну з використанням методу лінійного програмування. За критерій оптимальності приймалася мінімальна вартість шихти. Слід зазначити, що при позитивному відношенні в цілому до цього критерію визначення оптимального складу шихти він ніяк не враховує фізико-хімічні характеристики компонентів у її складі, які мають вирішальний вплив на техніко-економічні показники процесу плавки чавуну та на якість і, відповідно, вартість ливарної продукції, виготовленої з чавуну. В результаті при такому критерії оптимальності складу шихти може виникати ситуація, коли вартість шихти буде мінімальною, але собівартість ливарних виробів мінімальною не буде, внаслідок завищених витрат на виплавку чавуну.

Незважаючи на наявність беззаперечно позитивних рис методик прогнозування якості розплавів ливарних сплавів, викладених в роботах [2, 4–5], можливості їх удосконалення не є вичерпаними. В статтях [6–7], наприклад, представлена дещо інша ідеологія коригування хімічного складу чавуну безпосередньо в процесі його виплавлення. Запропоновано напрям удосконалення методики корекції хімічного складу чавуну при виплавленні в електричних тигельних печах, яка передбачає врахування в ймовірнісному аспекті нестабільності матеріалів, що додаються у розплав при коригуванні в ньому конкретних хімічних елементів за результатами експрес-аналізу проб металу, відібраних з розплаву. Алгоритм визначення необхідної кількості легувального матеріалу для внесення у розплав при коригуванні вмісту конкретного хімічного елемента, представлений у статтях [6–7], передбачає застосування методу Монте-Карло [8] для врахування ймовірнісних оцінок вхідних даних відносно нестабільності властивостей (вмісту хімічних елементів) матеріалів, які використовують для регулювання складу чавуну. Очевидно, що такий підхід раціонально використовувати і при визначенні конкретної кількості компонентів у шихті з врахуванням вартості і наявних на ливарному підприємстві металобрухту, феросплавів, карбюризаторів, інших легуючих матеріалів.

Зазначену тему будемо розглядати далі переважно на прикладі синтетичного сірого чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок і «клину Ханіна» залізничного транспорту. При цьому під поняттям «синтетичний чавун» будемо розуміти сплав, синтезований з простих за складом компонентів – вуглецю, заліза, сталевих металобрухт, феросплавів тощо [5, с. 180]. При розгляді методики визначення шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах перш за все зазначимо, що задача прогнозування вмісту хімічних елементів у складі чавуну на підставі кількісного розрахунку необхідних компонентів шихти значно складніша ніж регулювання хімічного складу розплаву чавуну, який коригують за результатами контролю вмісту хімічних елементів у металі відібраної з розплаву проби. При цьому, набір матеріалів (феросплавів, карбюризаторів), які використовують для регулювання вмісту хімічних елементів в чавуні, є заздалегідь відомим. Тобто умови для вирішення задачі забезпечення заданого вмісту хімічного складу розплаву чавуну є повністю визначеними і саму задачу можна кваліфікувати як задачу з повною інформацією.

Визначення шихти для виплавлення чавуну заданого хімічного складу є задачею з неповною вхідною (початковою) інформацією. Перш за все, невизначеність стосується основного компоненту шихти – металобрухту, його хімічного складу, забрудненості, вмісту в ньому шлаку, окислини тощо. На практиці насипна вага сталевих брухт складає 0,35...0,5 т/м³. По-друге, невизначеність задачі пов'язана з технологією плавки. А саме, треба відрізнати процес виплавлення чавуну в умовах наявності залишків рідкого металу в печі, так званого «болота», від плавки, яка відбувається без

залишків у ній розплав. Згідно з даними монографії [4, с. 28–29] в процесі виплавки чавуну при наявності в печі залишку рідкого металу (такий процес більше розповсюджений на практиці) необхідно, в першу чергу, завантажувати у піч карбюризатор і сталевий брукхт. Після їх розплавлення слід завантажити чавунний брукхт, якщо передбачено його використання, та відходи, зворот власного виробництва, який фактично також є брукхтом чавуну. Феросплави необхідно вносити у розплав в останню чергу, бажано в процесі його перегріву при інтенсивному перемішуванні рідкого металу. Відповідно співвідношення маси залишку рідкого металу («болота») і маси шихти, яка завантажується у піч, склад шихти, маса її порцій, розміри окремих кусків металобрукхту тощо, впливають не тільки на енергетичні втрати, температурний режим плавки, а й на вміст хімічних елементів у чавуні.

Сучасні індукційні тигельні печі промислової частоти працюють з повним зливом розплаву (без «болота»). При виплавленні чавуну в піч спочатку завантажують зворот власного виробництва, який являє собою чавунний брукхт (ливникові системи тощо). Після розплавлення цієї частки шихти у рідкий метал завантажують карбюризатор, сталевий брукхт і феросплави по мінімуму, щоб меншими були їх втрати внаслідок угару.

Стосовно забезпечення ливарних підприємств металобрукхтом необхідно торкнутися ще одного суттєвого питання у цій темі. Слід зазначити, що при виплавленні високоякісних чавунів і сталей, одним із можливих видів сировини, окрім металобрукхту, може бути гаряче брикетоване залізо (ГБЗ). Нині основним споживачем ГБЗ є електросталеплавильне виробництво. Доля ГБЗ у металлошихті для електросталей може досягати 70 %. Переваги ГБЗ відносно інших компонентів металлошихти полягають у стабільності хімічного складу; низькому вмісті небажаних домішок (сірки, фосфору); відсутності супутніх елементів, зокрема, кольорових металів; у високій насипній щільності; можливості завантаження в електропіч без зупинки процесу плавлення. Згідно з літературними джерелами, використання ГБЗ в електропечах має і недоліки. А саме, ГБЗ збільшує витрати електроенергії та тривалість плавки, знижує продуктивність виробництва.

Перспективи заміщення у ливарному виробництві металобрукхту гаряче-брикетованим залізом визначається технологічними і економічними обставинами – цінами на металобрукхт, чавун, ГБЗ, які на світових ринках постійно змінюються. В Україні ціна брукхту чорних металів зазвичай нижче, ніж в інших країнах. Дефіциту металобрукхту на внутрішньому українському ринку не очікується. Можна прогнозувати лише збільшення обсягів брукхту високолегованої сталі (військового металобрукхту). В цих умовах постає задача щодо використання брукхту високолегованої сталі замість феросплавів для коригування хімічного складу чавуну. Але ця задача виходить за межі даної статті.

З технологічної точки зору необхідність заміни металобрукхту на ГБЗ при виготовленні литва може виникнути лише при виготовленні високоякісної сталі, в

хімічному складі якої жорстко обмежено вміст шкідливих домішок кольорових металів. В загальному обсязі металопродукції, що виробляється в Україні, високоякісна спецсталь, яка потребує при виплавленні особливо чистої шихти, складає малий процент. Однозначно, що використання ГБЗ спростило б виплавлення високоякісного чавуну. Але даних про використання у промисловості ГБЗ для виплавки ливарного чавуну, схоже, немає. Організація виробництва ГБЗ в Україні в найближчі роки не планується. Не виключено, що в довгостроковій перспективі виробництво ГБЗ у світі буде розширено, і цей продукт будуть застосовувати при виплавленні високоякісних сталей та чавуну, призначених для виготовлення литва відповідального призначення. На нинішньому етапі розвитку промисловості України проблем із забезпеченням ливарних підприємств брукхтом чорних металів не виникає і не передбачається.

При вирішенні завдання забезпечення заданого складу чавуну доцільно (рекомендується) запровадити поняття «коефіцієнти вагомості» кожного хімічного елемента. Залежно від вхідних умов, виробничої ситуації на підприємстві, сортаменту ливарної продукції, яка виготовляється, та вимог до її якості, параметрів індукційної тигельної печі, наявності сировини, необхідної для виплавлення чавуну, режимів плавки, які застосовуються, та інших факторів, можливі різні підходи до визначення коефіцієнтів вагомості кожного хімічного елемента в складі чавуну. Зокрема, при визначенні коефіцієнтів вагомості (впливу, значущості) хімічних елементів у чавуні, призначеному для виготовлення деталей рухомого залізничного транспорту (гальмових колодок, «клину Ханіна» тощо), під час регулювання їх вмісту у розплаві слід орієнтуватися, наприклад, на один чи декілька наступних пріоритетів.

1. Трудність забезпечення вимог стандарту щодо необхідної точності вмісту хімічного елемента в складі чавуну.

2. Вплив вмісту хімічного елемента в складі чавуну на його структуру (розміри і форму включень графіту та ін.), властивості (твердість, міцність), експлуатаційні характеристики (коефіцієнти тертя, зносостійкості) тощо.

3. Техніко-економічні показники використання конкретного елемента. А саме – його вартість, витрати на застосування при формуванні шихти і безпосередньо у процесі плавки чавуну. Стосовно шихти – то оцінку витрат на закупівлю більш якісної й, відповідно, вартісної сировини. Тобто витрат, пов'язаних із закупівлею та використанням різних феросплавів та їхньою ціною на ринку.

4. Застереження щодо ризиків, пов'язаних з можливим непопаданням (невідповідністю) одного конкретного чи декількох хімічних елементів у складі чавуну в діапазон значень, регламентованих стандартом на ливарну продукцію. Це застереження стосується умов, коли коригування хімічного складу чавуну відбувається безпосередньо в процесі плавки на підставі результатів контролю вмісту хімічних елементів у пробі металу, відібраної з розплаву. Найбіль-

шим ризиком, скоріше за все, слід вважати перевищення вмісту будь-якого хімічного елемента в чавуні, яке потребує зливу з ванни певної частки розплаву, щоб створити умови для продовження коригування складу рідкого металу шляхом внесення у розплав додаткової порції металобрухту чи іншої сировини. Досвід одного із ливарних заводів України свідчить, що при виплавленні чавуну, призначеного, наприклад, для виготовлення гальмових колодок і «клин» Ханіна» для залізничного рухомого складу, вміст кремнію тримають близько до верхньої межі [6].

З урахуванням ступеня важливості кожного елемента у чавуні за критерій оптимальності доцільно приймати середньозважену похибку його хімічного складу, отриманого в результаті доводки, корекції розплаву чавуну до певної кондиції відносно заданих «точок прицілювання». Похибка визначається з урахуванням коефіцієнту вагомості кожного елемента у складі чавуну згідно з попередньою оцінкою його важливості у виробництві конкретної продукції. Тобто відхилення (похибка) по кожному хімічному елементу помножується на відповідний коефіцієнт вагомості. Далі розраховується середнє значення. Коефіцієнти вагомості нормуються. Сума усіх коефіцієнтів по елементам, які контролюються, дорівнює одиниці. Зазначений критерій оптимізації має вигляд:

$$K_{\text{опт}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{l=m} p_i \cdot \varepsilon_i,$$

де $K_{\text{опт}}$ – критерій оптимізації процесу корекції хімічного складу чавуну або складу шихти; ΔE_i – відхилення вмісту E_i i -того елемента від «точки прицілювання» E_q , яким є бажаний вміст елемента в чавуні; $\Delta E_i = |E_q - E_i|$; ε_i – похибка розрахунку, $\varepsilon_i = \Delta E_i / E_q$; p_i – коефіцієнт вагомості i -того хімічного елемента у складі чавуну. Величини E_q , E_i , ΔE_i вмісту елементів визначені у відсотках; i – номер хімічного елемента, що контролюється, де $i = 1 \dots m$; m – кількість елементів у чавуні (шихті), які враховуються в аналізі; $[\varepsilon_i]$ – припустиме значення похибки розрахунку. Значення критерію $K_{\text{опт}}$ визначаються вибором величин p_i і розрахунковими величинами ε_i , $K_{\text{опт}} \rightarrow 0$ при $\varepsilon_i \rightarrow 0$. При цьому має виконуватися умова, що $\varepsilon_i \leq [\varepsilon_i]$.

Процес чисельного моделювання розрахунку хімічного складу шихти або розплаву чавуну закінчується за умови, що різниця між останнім і попереднім значеннями коефіцієнта $K_{\text{опт}}$ не перевищує заданої похибки його визначення. В результаті використання наведеного критерію оптимізації здійснюється перевірка попадання вмісту усіх хімічних елементів, які контролюються у складі чавуну, в їх діапазони, що регламентовані стандартом на продукцію. Отримана інформація про розмір похибки в хімічному складі розплаву чавуну дозволяє технологу обґрунтовано приймати рішення про закінчення процесу чисельного регулювання хімічного складу розплавленого металу. В разі невідповідності різниці послідовно отриманих величин критерію оптимізації $K_{\text{опт}}$ заданому значенню допустимої похибки розрахунків, корекцію

вмісту хімічних елементів продовжують. Водночас в разі непопадання в заданий діапазон вмісту будь-якого важливого, на погляд технолога, елемента, він має можливість внести корективи у значення вагових коефіцієнтів і повторити процедуру оптимізації. Передбачається можливість уточнення точок прицілювання при регулюванні вмісту хімічних елементів, значень вагових коефіцієнтів, заміни матеріалів, які використовують для корекції складу розплаву чавуну, на більш ефективні. Стосовно запропонованого вище критерію оптимізації $K_{\text{опт}}$ підкреслимо, що завдяки застосуванню коефіцієнтів вагомості він набуває властивості економічного характеру наряду з іншими перевагами. Наприклад, порівняно з критерієм оптимальності у вигляді мінімальної вартості шихти [5, с. 159].

Зазначимо, що за точки прицілювання при корекції конкретного хімічного елемента у чавуні приймаються попередньо вибрані, виходячи з технологічних, економічних чи будь-яких інших міркувань [6–7], значення вмісту цього елемента. Зокрема на першому етапі процедури формування шихти за точку прицілювання доцільно приймати середні значення вмісту елементів у діапазонах, передбачених стандартами на чавун, на ливарні вироби з чавуну та феросплави і карбюрізатори. При наявності бази даних, накопленої ливарним підприємством щодо хімічного складу раніше виготовлених партій чавуну відповідного чи аналогічного сортаменту, слід орієнтуватися на цю інформацію. Далі – точки прицілювання уточнюються відповідно до результатів розрахунків.

При поточному виробництві чавуну в індукційних тигельних печах попереднього покоління, технологія виплавлення може передбачати неповний злив рідкого металу по завершенню плавки. Тим самим створюється стартовий залишок розплаву чавуну в печі, так зване «болото» [5 та ін.]. Нова порція шихти завантажується на цей залишок розплаву. В першому наближенні залишок розплаву з печі можна віднести до складу шихти, призначеної для виплавки чергової партії металу. Таким чином, у шихту для виплавлення чавуну входять металобрухт, зворот власного виробництва (ливникові системи тощо), феросплави, карбюрізатори.

Хімічний склад залишку розплаву («болота») в печі є відомим. Зворот ливарного виробництва продукції однакового сортаменту зберігається на заводах окремо. Тому хімічний склад звороту, який займає значну частку (30–35 %) у шихті, також є відомим. При цьому кожне ливарне підприємство встановило для себе орієнтовний склад шихти відносно виплавлення чавуну конкретного сортаменту і виготовлення з нього ливарних виробів. Зазначене спрощує розрахунок обсягу компонентів шихти.

На сучасних ливарних заводах, зокрема на ТОВ «М-ЛИТ», технологія виробництва чавуну передбачає повне зливання розплаву з 3-хтонної індукційної тигельної печі. На цьому заводі шихта для виплавлення чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок, складається з (приблизно) 1 т звороту власного виробництва, 2 т сталевих брухту, 85 кг карбюрізатора (бою електродів), 65 кг феросиліцію ФС65 і

22 кг феромарганцю ФМн78. Відповідно при конкретизації, уточненні складу шихти відносно її орієнтовного складу задача постає у врахуванні непостійності вмісту хімічних елементів в металобрухті, карбюризаторі, феросплавах та їх угару в процесі плавки.²

Хімічний склад феромарганцю визначений державним стандартом України ДСТУ 3547-97. Феросиліцію – ДСТУ 4127:2002. При виплавленні в індукційних тигельних печах чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок і «клин Ханіна», використовують зазвичай феросиліцій ФС65 і феромарганець ФМн78. В табл. 1 показано вимоги до хімічного складу феросиліцію ФС65 відповідно до ДСТУ 4127:2002 та хімічний склад трьох партій-плавков феросиліцію такої марки, який вироблено на одному з феросплавних заводів України.

Дані табл. 1 свідчать, що вміст вуглецю, сірки, фосфору в феросиліції не буде суттєво впливати на хімічний склад чавуну, який виплавляється. Вміст марганцю має той самий порядок, що й його вміст у чавуні, призначеному для виготовлення, зокрема, гальмових колодок типу «М» та «клин Ханіна» рухомого складу залізниці [6]. Але враховуючи, що частка феросиліцію в шихті для виплавлення чавуну є відносно невеликою ~ 2...3 %, то на першому етапі підготовки шихти достатньо орієнтуватися на середні значення вмісту Mn у складі феросиліцію. В той самий час, діапазон розкиду значень вмісту кремнію у складі феросиліцію є суттєвим порівняно з середніми значеннями його вмісту. Судячи із даних табл. 1, діапазон розподілу величин вмісту кремнію повною мірою використовується при виробництві феросиліцію в промисловості. Саме тому при удосконаленні методики визначення складу шихти для виплавлення

чавуну бажано і доцільно враховувати нестабільність вмісту кремнію у феросиліції.

В табл. 2 надано інформацію відносно вимог ДСТУ 3547-97 щодо хімічного складу феромарганцю електrolітичного високовуглецевого ФМн78 та трьох партій – плавков промислового виробництва цього сплаву.

Згідно з даними табл. 1 і 2 вміст сірки у складі феросиліцію ФС65 і феромарганцю ФМн78 не є загрозливим з позицій якості чавуну і виробів з нього. Вимоги ДСТУ 3547-97 до вмісту фосфору (не більше 0,7 %) відповідають діапазону (0,4...0,9) %, передбаченому ГОСТ 30249-97 на чавун для гальмових колодок типу «М». Тому при визначенні складу шихти для виплавлення такого чавуну достатньо орієнтуватися на результати контролю вмісту фосфору та інших хімічних елементів у складі чавуну конкретної плавки – партії або приймати за точку «прицілювання» граничне значення 0,7 % вмісту P згідно з ДСТУ (табл. 2).

Величини вмісту Mn, C, Si мають широкі діапазони розподілу, і це треба враховувати при формуванні складу шихти. Варто зазначити, що ДСТУ 3547-97 не обмежує вміст C і Si мінімально допустимими величинами у складі феромарганцю. Відповідно з метою посилення точності визначення обсягів (маси) Mn, C, Si при формуванні шихти для виплавлення чавуну необхідно враховувати в ймовірнісному підході параметри розподілу вмісту цих елементів у феросплавах.

При застосуванні критерію $K_{\text{опт}}$ для визначення маси компонентів шихти немає ризику перебільшення вмісту будь-якого елемента в складі чавуну і зливу розплаву, оскільки оптимізація шихти відбувається шляхом моделювання процесу виплавки, і завжди є можливість уточнити вхідні дані, точки прицілювання, вагові коефіцієнти і перерахувати результат ще до початку плавки.

Таблиця 1

Масова частка елементів у складі феросиліцію ФС65, не більше, %

Елементи	Si	C	S	P	Al	Mn	Cr	Fe
ДСТУ	63...68	0,2	0,02	0,05	2,5	0,5	0,5	–
1	68	0,03	0,01	0,04	1,0	0,2	0,2	29
2	65	0,05	0,01	0,04	1,5	0,3	0,2	32
3	63	0,20	0,02	0,05	2,5	0,5	0,5	33

Примітка: Згідно з ДСТУ вміст Si складає від 63 до 68 % включно; Fe – все інше. Цифрами 1, 2, 3 позначено партії-плавки феросиліцію.

Таблиця 2

Масова частка елементів у складі феромарганцю ФМн78, не більше, %

Елементи	Mn	C	Si	P		S	Fe
				А	Б		
ДСТУ	75...82	7,0	6,0	0,05	0,70	0,03	–
1	81	6,0	0,5	0,55		0,02	11
2	77	6,5	1,0	0,6		0,02	14
3	75	5,5	4,5	0,7		0,02	14

Примітка: Згідно з ДСТУ 3547-97 вміст Mn складає понад 75 до 82 % включно; Fe – інше.

²Автор статті вдячна директору заводу Є.С. Попову за консультації та допомогу в проведенні досліджень.

Висловлені аргументи і досвід ливарних підприємств дозволяють рекомендувати зокрема для виплавлення синтетичного чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок типу «М», згідно з вимогами ГОСТ 30249-97 (вміст елементів, %: C = 2,7...3,4; Si = 0,7...1,0; Mn = 0,4...0,9; P = 0,4...0,9; S – не більше 0,20) наступний, орієнтовний у першому наближенні (прицілюванні), склад шихти. Так, залишок розплаву в печі (болото) плюс зворот власного виробництва мають дорівнювати ~ (30...35) % в обсязі шихти; сталевий брухт (60...65) %; карбюризатори (2,5...3,0) %; феросиліцій ФС65 (2,0...2,5) %; феромарганець ФМн78 ~ 1 %. Звертаємо увагу, що «болото» у печі, як і зворот власного виробництва, вважаються матеріалами з відомим хімічним складом. В шихті має бути не менше (2,5...3,0) % карбюризатора, необхідного для науглецювання розплаву при плавленні чавуну в індукційних тигельних печах, враховуючи його угар і відносно повільне засвоєння в розплаві. В разі виробництва чавуну за технологією з повним зливом розплаву, то (30...35) % в шихті складає зворот власного виробництва, і цей зворот завантажується у піч в першу чергу. Карбюризатор подається вже у розплавлений метал. У зв'язку з тим, що науглецювання чавуну шляхом внесення карбюризатора в розплав утруднено, то вміст карбюризатора в шихті слід підтримувати на верхній межі, а саме на рівні ~ 3 %. Підкреслимо, що карбюризатор завантажується у розплав в першу чергу. Також відзначимо, що засвоєння карбюризатора (бою електродів) дорівнює (90...95) %, а швидкість його засвоєння у розплаві – (0,1...0,13) %/хв [5].

При визначенні складу шихти для виплавлення чавуну будь-якого сортаменту необхідно враховувати угар хімічних елементів під час плавлення, перш за все вуглецю, кремнію, марганцю. Дослідженнями, виконаними на ливарному заводі «М-ЛИТ», встановлено, що при розрахунках шихти для виплавлення чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок і «кліну Ханіна», угар вуглецю слід очікувати на рівні ~ 5 %, кремнію ~ 3 %, марганцю ~ 10 % [8].

На відміну від процедури регулювання складу чавуну на підставі результатів хімічного аналізу проби металу, відібраної безпосередньо з розплаву, коли відомо скільки не вистачає вмісту конкретного елемента в чавуні, то при корекції складу шихти за вхідну інформацію щодо Mn і Si слід приймати вимоги стандарту до вмісту цих елементів у продукції, яка буде виготовлятися з виплавленого чавуну.

Дана робота розвиває ідеї, висловлені в статтях [6, 7]. Тому за аналогією використаємо ті ж самі позначення, що і в цих статтях. Масу коригуючої добавки позначимо Δq_M , кг; масу розплаву чавуну в печі q , кг; необхідний вміст хімічного елемента в чавуні E_c , %; вміст елемента в матеріалі, який застосовується для коригування складу чавуну, E_m , %; величина, на яку необхідно збільшити вміст елемента, ΔE , %; величина угару – Y_r , %.

Розглянемо такий підхід на прикладі вмісту марганцю в чавуні для гальмових колодок залізничного транспорту. Згідно з вимогами ГОСТ 30249-97 діапа-

зон вмісту Mn у чавуні для виготовлення цих ливарних виробів складає (0,4...0,9) %, вуглецю – (2,7...3,4), кремнію – (0,7...1,0) відсотків.

При виплавленні, зокрема, трьох тонн чавуну у сучасній 3-хтонній індукційній тигельній печі за технологією з повним зливом розплаву будемо вважати, що зворот власного виробництва важить 1 т у шихті і не потребує коригування його хімічного складу. Приблизно 2 т з 3-х тонн загального обсягу шихти – це сталевий брухт, хімічний склад якого оцінюється лише орієнтовно. Таким чином, для забезпечення в 2-х тоннах шихти вмісту вуглецю на рівні ~ 3,0 % необхідно передбачити в ній 66,5 кг карбюризатора, в якому вміст вуглецю складає 95 %, а угар очікується на рівні ~ 5 %.

Формула розрахунку маси матеріалу, який вноситься в шихту або розплав для забезпечення в чавуні необхідного вмісту конкретного елемента, має вигляд [6, 7]:

$$\Delta q_M = \frac{100 \cdot q \cdot E_c}{E_m(100 - Y_r)} \quad (1)$$

У прикладі, що розглядається, при визначенні необхідної маси карбюризатора в шихті, який буде завантажуватися в піч після завантажування звороту власного виробництва, приймаємо масу шихти, що коригується, на рівні $q = 2000$ кг. Вміст вуглецю в карбюризаторі $E_m = 95$ %, угар $Y_r = 5$ %. Вміст вуглецю в чавуні має дорівнювати $E_c = 3$ % (тілда над змінною тут і далі означає середнє значення показника). За цих вхідних даних в шихті має бути $\Delta q_M = 66,5$ кг карбюризатора. Зазначимо, якщо орієнтуватися на мінімальну величину вмісту вуглецю в чавуні $E_{cmin} = 2,7$ %, то $\Delta q_M = 59,8$ кг. При $E_{cmax} = 3,4$ % маємо $\Delta q_M = 99,7$ кг. Якщо орієнтуватися на $q = 3000$ кг, але на мінімальний вміст вуглецю в чавуні $E_{cmin} = 2,7$ %, то отримаємо $\Delta q_M = 89,8$ кг. В разі, коли вміст вуглецю розраховується на масу шихти $q = 3000$ кг, то за формулою (1) для тих самих вхідних даних і $E_c = 3$ %, отримаємо $\Delta q_M = 89,8$ кг. Тобто величину, близьку до маси 85 кг карбюризатора в шихті, якої дотримуються на ливарному заводі «М-ЛИТ».

При розрахунку в першому приближенні маси феромарганцю ФМн78 в шихті приймаємо такі вхідні дані: $q = 2000$ кг; $E_c = 0,65$ %, $E_m = 78,5$ %, $Y_r = 10$ %. В результаті за формулою (1) отримуємо $\Delta q_M = 18,4$ кг. При $q = 3000$ кг, $\Delta q_M = 27,6$ кг. Якщо приймати мінімальний вміст марганцю в чавуні $E_{cmin} = 0,4$ %, то $\Delta q_M = 17$ кг. При $E_{cmax} = 0,9$ %, $\Delta q_M = 38,3$ кг. Якщо розрахунок здійснюється на масу шихти 2000 кг, то останні величини Δq_M треба помножити на 2/3. Вочевидь, величина 22 кг феромарганцю в шихті, яка приймається за орієнтир при формуванні шихти на заводі «М-ЛИТ», згідно з формулою (1), має забезпечувати при $q = 3000$ кг і $E_m = 78,5$ % вміст Mn в чавуні приблизно 0,5 %.

Подальша процедура визначення маси феромарганцю у шихті передбачає оцінку впливу його нестабільності. Відповідно до методики, викладеної в наших роботах [6, 7], формулу (1) визначимо відносно

вмісту E_c хімічного елемента в чавуні, що розглядається:

$$E_c = \frac{\Delta q_M \cdot E_M (100 - Y_r)}{100q} \quad (2)$$

Формула (2) призначена для використання при розрахунках складу шихти. Вона відрізняється від аналогічної формули зі статті [6] відсутністю показника E_s вмісту елемента в пробі чавуну, відібраної з розплаву.

Нестабільність вмісту елемента, зокрема Mn в феромарганці ФМн78, оцінюємо у ймовірнісному підході з використанням методу Монте-Карло за алгоритмом, запропонованим в нашій роботі [7]. Величину маси Δq_M феромарганцю, вибрану за точку прицілювання з наведених вище значень, спочатку будемо вважати постійною, як і величини q та Y_r . До речі, величину угару Y_r можна вважати випадковою, якщо відомий діапазон її розподілу (коливань) при виплавленні чавуну певного сортаменту. Але бажано, у алгоритмі, що розглядається, величину угару Y_r представити як функцію параметрів процесу плавлення чавуну (температури розплаву, тривалості процесу тощо). Такий підхід буде опосередковано враховувати ще на стадії підготовки шихти вплив режимів плавки на хімічний склад чавуну, що виробляється.

Для оцінки прийнятності орієнтовно вибраної у першому наближенні величини маси Δq_M феромарганцю в шихті організуємо цикл розрахунків методом Монте-Карло значень E_{c_i} при ймовірнісних величинах E_{M_i} вмісту марганцю в межах діапазону його можливих величин в партіях цього сплаву; i – номер варіанта розрахунку E_{c_i} , $i = 1 \dots N$, де N – кількість циклів розрахунків із змінною i . В результаті отримаємо поле розподілу величини E_{c_i} для якого визначено середнє значення $\bar{E}_{c_i}$, середнє квадратичне відхилення σE_{c_i} , інші параметри розподілу. Тут і далі σ – середнє квадратичне відхилення. Діапазон розподілу величини E_{c_i} дорівнює від $E_{c_{i \min}}$ до $E_{c_{i \max}}$. При нормальному розподілі Гаусса величини E_{c_i} будемо мати $E_{c_{i \min}} = \bar{E}_{c_i} - 3\sigma E_{c_i}$ і $E_{c_{i \max}} = \bar{E}_{c_i} + 3\sigma E_{c_i}$. Далі порівнюємо величини $\bar{E}_{c_i}$, $E_{c_{i \min}}$ і $E_{c_{i \max}}$ з аналогічними показниками поля розподілу величини E_c в стандарті на вироби з чавуну і вирішуємо прийнятна чи неприйнятна вибрана маса Δq_M феромарганцю в шихті. Якщо величина є прийнятною, тоді переходимо до розрахунку маси в шихті матеріалу, який забезпечує вміст іншого елемента в чавуні. В прикладі, що розглядається, це кремній.

Якщо результат співставлення розрахункових показників поля розподілу величини E_{c_i} з аналогічними показниками маси розподілу E_c , регламентованому стандартом не влаштовує, то уточнення величини Δq_M феромарганцю у шихті продовжується. Згідно з розробленим алгоритмом для такого випадку передбачено цикл розрахунків за змінною j . Тобто цикл розрахунків по змінній i будемо вважати внутрішнім, а за змінною j – зовнішнім, де $j = 1 \dots k$. При такому підході викладені вище розрахунки по змінній i будемо вважати виконаними при $j = 1$. Далі будемо використовувати подвійні індекси i, j при позначенні змінних.

В розрахунках при $j = 2$ будемо користуватися уточненою в більший чи менший бік величиною $\Delta q_{M, j=2}$. Величини q і Y_r пропонуємо вважати незмінними (Const). В результаті розрахунків величини E_{c_i} у внутрішньому циклі за змінною $i = 1 \dots n$ отримаємо масив значень величини $E_{c_{i, j=2}}$. Далі розраховуємо параметри поля розподілу, а саме середнє значення $\bar{E}_{c_{i, j=2}}$, середнє квадратичне відхилення $\sigma E_{c_{i, j=2}}$, мінімальне і максимальне значення величини $E_{c_{i, j=2}}$ і зіставляємо їх з аналогічними показниками E_c , регламентованими стандартом. Врешті-решт цикл розрахунків продовжуємо при $j = 3$ і так далі, поки підібрана величина маси феромарганцю Δq_{M_j} нас буде влаштовувати. Тобто при використанні якої в розрахунках за формулою (2) і наявній нестабільності вмісту E_M марганцю в феросплаві не буде забезпечуватися необхідний вміст E_c цього елемента в чавуні.

Аналогічним чином за формулою (2) розраховується маса феросиліцію ФС65 в шихті, необхідна для отримання в чавуні вмісту кремнію заданої величини в межах діапазону (0,7...1,0) %. При розрахунках маси феросиліцію в шихті слід враховувати обсяг кремнію, який буде внесений в шихту з феромарганцем. Нагадаємо, що згідно з табл. 2 у складі феромарганцю ФМн78 налічується до 6 % кремнію.

На кожному черговому етапі викладеного алгоритму розрахунки маси компонентів у шихті завершуються оцінкою величини критерію оптимізації $K_{\text{опт}}$. Попередньо необхідно визначити (встановити) коефіцієнти вагомості кожному елементу в складі чавуну. Наприклад, при виплавленні чавуну для виготовлення гальмових колодок раціонально присвоїти такі коефіцієнти вагомості вуглецю, кремнію і марганцю: $p_C = 0,3$; $p_{Mn} = 0,3$; $p_{Si} = 0,4$. Надання кремнію більшої величини коефіцієнта вагомості p_{Si} обумовлено тим, що в промисловій практиці гістограма розподілу кремнію суттєво зміщена у бік максимально допустимих величин вмісту Si і не рідкісні випадки, коли вміст кремнію в чавуні перевищує граничне значення 1 % [6]. Тому вмісту цього елемента у складі чавуну доцільно приділяти посилену увагу.

Підкреслюємо, що збільшення коефіцієнта вагомості конкретного елемента має передбачати підвищення точності його визначення порівняно з точністю розрахунків вмісту інших елементів.

По-друге, при розрахунку маси компонентів шихти, як і при корекції вмісту хімічних елементів у розплаві в процесі плавки, необхідно правильно визначити «точки прицілювання» щодо вмісту кожного елемента в складі чавуну. Прицілювання можна вести за середнім значенням вмісту елемента (елементів) в його діапазоні, регламентованому нормативними документами (стандартом, технічними умовами, тощо). За точки прицілювання можна приймати також мінімальні чи максимальні величини вмісту елемента в обумовленому стандартом діапазоні. В таких випадках необхідно зазначати мінімальні $E_{i, j \min} = \bar{E}_{i, j} - 3\sigma E_{i, j}$ та максимальні $E_{i, j \max} = \bar{E}_{i, j} + 3\sigma E_{i, j}$ величини, отримані в результаті розрахунків. В будь-якому разі до величин вмісту кожного елемента, який розраховується, застосовують обмеження:

$$E_{\text{чн}} \leq E_{ij} \leq E_{\text{чв}}, \quad (3)$$

де E_{ij} – вміст хімічного елемента, визначений в результаті розрахунків; $E_{\text{чн}}$ і $E_{\text{чв}}$ – нижня і верхня межі вмісту елемента, регульовані стандартом на чавун, $E_{\text{чн}} = E_{\text{чнmin}}$, $E_{\text{чв}} = E_{\text{чнmax}}$.

По кожному елементу точки прицілювання і обмеження встановлюють індивідуально.

При моделюванні різних варіантів формування шихти не обов'язково дотримуватися умов (3), оскільки похибка ε , враховує модуль величини ΔE_{ij} . При корекції хімічного складу чавуну безпосередньо у процесі його плавки умови (3) діють жорстко без будь-яких виключень чи пом'якшення.

Особливої уваги потребує питання вибору величини коефіцієнтів важливості (вагомості) хімічних елементів при визначенні маси компонентів у шихті чи при регулюванні складу чавуну в процесі плавки.

Чотири елементи, а саме: С, Si, Mn, P можна вважати домінуючими при регулюванні хімічного складу чавуну різного сортаменту. Меншу увагу серед них, в цьому аспекті привертає фосфор, оскільки при виготовленні, зокрема «кліну Ханіна», діапазон (0,019...0,059) % його вмісту згідно з даними табл. 3 статті [6], на практиці знаходиться відносно далеко від граничного значення (не більше 0,2 %). При виготовленні іншої ливарної продукції висновки щодо цього питання можуть бути іншими. Взагалі, ведучим елементом при регулюванні хімічного складу чавуну доцільно визнавати той елемент, вміст якого в розплаві найбільше відрізняється від необхідного рівня, а тому потребує додавання в розплав найбільшого обсягу коригуючого матеріалу. Окрім того, важче інших регулюється, оскільки, наприклад, матеріал характеризується великою тривалістю розплавлення і засвоєння.

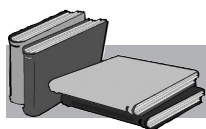
Нерідко ведучий (домінуючий) елемент треба визначати на підставі сумісного впливу двох або більшої кількості факторів. Така оцінка передбачена викладеною вище процедурою регулювання хімічного складу чавуну. Домінуючим елементом, який потребує першочергового розрахунку необхідного обсягу коригуючого матеріалу, що додається в розплав, доцільно визначити той, при коригуванні вмісту якого вимушено змінюється вміст інших елементів у чавуні, оскільки в легуючому матеріалі вони присутні.

При визначенні домінуючого елемента і наданні йому найбільшого коефіцієнта вагомості можна виходити також з позиції мінімізації витрат на виготовлення продукції. Наприклад, як зазначено вище, на одному з ливарних заводів для виплавлення в індукційній тигельній печі 3-х тонн чавуну, використовують 65 кг феросиліцію ФС65 і 28 кг феромарганцю ФМн78. Тобто феросиліцію витрачають в ~ 3 рази більше, ніж феромарганцю. При цьому враховують, що ФС65 дорожче ФМн78 за цінами на кінець 2021 – початок 2022 року в 1,4 рази. В таких умовах, для зменшення сумарних витрат на феросплави при виплавленні чавуну, найбільшу увагу слід приділяти кремнію ще на стадії формування складу шихти.

Викладений алгоритм передбачає можливість уточнення вхідних параметрів (характеристик матеріалів шихти, точок прицілювання, коефіцієнтів вагомості тощо) автоматично і вручну. Оптимізувати можна не тільки вміст окремих хімічних елементів у чавуні, а й відношення вмісту певних елементів, наприклад відношення C/Si. Алгоритм дозволяє моделювати і оптимізувати параметри процесу модифікування чавуну та сталі. Зазначена оптимізація виконується протягом декількох секунд.

Висновки

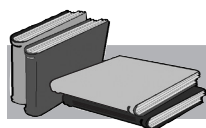
Розроблено ідеологію і алгоритм визначення маси компонентів у шихті для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах і виготовлення з нього гальмових колодок та «кліну Ханіна» залізничного транспорту. Сформульовано основні підходи щодо врахування в ймовірнісному аспекті зі застосуванням методу Монте-Карло нестабільності вмісту хімічних елементів у шихті. Введено поняття «коефіцієнти вагомості», які характеризують відносний ступінь важливості кожного хімічного елемента у чавуні, а також поняття «точки прицілювання» при корекції його хімічного складу. Запропоновано критерій оптимізації (оптимальності), який базується на застосуванні коефіцієнтів вагомості вмісту кожного хімічного елемента у складі чавуну та дозволяє враховувати їх вплив на якість литва і на техніко-економічні показники виробництва. Запропоновано при виплавленні чавуну, призначеного для виготовлення зазначених ливарних виробів, надавати найбільші коефіцієнти вагомості кремнію і марганцю. Рекомендовано ступінь угару елементів у процесі плавки чавуну враховувати ще на стадії формування шихти. Представлено орієнтований склад шихти для виплавлення синтетичного чавуну відповідного призначення і порядок завантаження шихтових матеріалів в індукційні тигельні печі.



ЛІТЕРАТУРА

1. Сіренко К.А. Ливарне виробництво: невирішені задачі та перспективи розвитку. «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві». Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції. Краматорськ: ДДМА, 21–24 вересня 2021. С. 109–111.
2. 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.
3. Ямшинський М.М., Грядовський І.О. Програмне забезпечення для розрахунку шихти для сталей. V Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». Київ, 28–29 травня 2013. С. 144–146.
4. Шумихин В.С., Кутузов В.П., Храмченков А.И., Дибров И.А., Александров Н.Н., Бобро Ю.Г., Пузырьков-Уваров О.В., Блошко Н.К. Высококачественные чугуны для отливок. Москва: Машиностроение, 1982. 222 с.
5. Худокормов Д.Н. Производство отливок из чугуна. Минск: «Высшая школа», 1987. 198 с.
6. 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. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.044>
7. Сіренко К.А. Удосконалення технології коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційних тигельних печах. *Процеси лиття*. 2022. № 1 (147). С. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.003>
8. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. Москва: Наука, 1978. 64 с.
9. Сиренко Е.А. Особенности литейного чугуна для тормозных колодок железнодорожного транспорта. *Литье и металлургия*. 2022. № 1. С. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-43-48>

Надійшла 10.06.2022



REFERENCES

1. Sirenko, K.A. (2021). Foundry production: unsolved problems and prospects of development. "Prospective technologies, materials and equipment in foundry production". *Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference*. Kramatorsk: DDMA, September 21–24, 2021, pp. 109–111 [in Ukrainian].
2. Yamshinsky, M.M. (2019). Heat-resistant and wear-resistant foundry alloys based on iron for work in extreme conditions. Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Kyiv: PTIMA NAS of Ukraine, 510 p. [in Ukrainian].
3. Yamshinsky, M.M., Hryadovsky, I.O. (2013). Software for calculating the charge for steels. V *International Scientific and Technical Conference "New Materials and Technologies in Mechanical Engineering"*. Kyiv, May 28–29, 2013, pp. 144–146 [in Ukrainian].
4. Shumikhin, V.S., Kutuzov, V.P., Khranchenkov, A.I., Dibrov, I.A., Aleksandrov, N.N., Bobro, Yu.G., Puzyr'kov-Uvarov, O.V., Bloshko, N.K. (1982). High quality cast irons. Moscow: Mashinostroenie, 222 p. [in Russian].
5. Khudokormov, D.N. (1987). Manufacture of cast iron castings. Minsk: "Higher School", 198 p. [in Russian].
6. Sirenko, K.A., Mazur, V.L. (2021). Ideology of adjustment of the chemical composition of synthetic cast iron in the manufacturing process of casting. *Metal and Casting of Ukraine*, vol. 29, no. 4 (327), pp. 44–54, doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.04.044> [in Ukrainian].
7. Sirenko, K.A. (2022). Improving of technology of adjustment of chemical composition of iron during melting in crucible induction furnaces. *Casting processes*, no. 1 (147), pp. 3–10, doi: <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.003> [in Ukrainian].
8. Sobol, I.M. (1978). Monte-Carlo method. Moscow: Nauka, 64 p. [in Russian].
9. Sirenko, E.A. (2022). Features of cast iron for railway brake pads. *Foundry production and metallurgy*, no. 1, pp. 43–48, doi: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-1-43-48> [in Russian].

Received 10.06.2022

Summary

K.A. Sirenko, Junior Researcher, e-mail: thermoexp.metal@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-2613-8094>

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

Development of the method of determining the composition of the charge for smelting cast iron in induction crucible furnaces³

The possibility of increasing the efficiency of regulating the content of chemical elements in cast iron, which is smelted in induction crucible furnaces, by taking into account the instability of the chemical composition of the charge components is realised. The ideology and algorithm for determining the mass of charge components for cast iron smelting are formulated, which are based on taking into account probabilistic estimates of the distribution of chemical elements in the composition of the components and the application of the Monte Carlo method to take into account the instability of the content of chemical elements in the charge. Problems related to the supply of scrap metal and other metal raw materials to foundries and their use in cast iron smelting are considered. The results of the study of the distribution of chemical elements in the composition of ferromanganese and ferrosilicon, which are used in the charge in the smelting of cast iron intended for the manufacture of brake pads and "Khanin wedge" of railway transport, are given. A methodology has been developed for taking into account the probabilistic aspect of the instability of the chemical composition of scrap metal, ferroalloys, and other components of the charge in determining their number. Criteria of optimization (optimality) of the process of adjusting the chemical composition of cast iron during its smelting have been developed, which involve the use of "weighting factors" of the content of each chemical element in cast iron and allow taking into account their impact on casting quality and technical and economic performance. It is proposed to provide the highest weights of silicon and manganese in the smelting of cast iron intended for the manufacture of these foundries. It is recommended to predict and take into account the degree of burning of elements in the process of cast iron smelting at the stage of charge formation. The approximate composition of the charge for smelting synthetic cast iron for the purpose and the order of loading charge materials into induction crucible furnaces are determined. The main goals and objectives at the current stage of development of foundry production in terms of improving the technology, procedure, order, algorithm for regulating the chemical composition of synthetic cast iron during its smelting are to reduce the cost of casting. In particular, due to the introduction in practice of methods for adjusting the content of chemical elements in the cast iron melt and taking into account in the probabilistic aspect of the instability of the quality of the charge components, especially ferroalloys and scrap metal.

Keywords

Cast iron, smelting, charge, scrap metal, ferroalloys.

³The work was performed under the guidance of V.L. Mazur, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Chief Researcher, e-mail: prof.vlm@ukr.net