

SECTION 11. METALLURGY

DOI: 10.46299/ISG.2024.MONO.TECH.2.11.1

11.1 Використання методів евристики та функціонально-вартісного аналізу для удосконалення контролю зношування та оптимізації ремонтів футерівки індукційної сталеплавильної печі

Одним з напрямків зменшення викидів парникових газів для боротьби із змінами клімату при реалізації стратегії декарбонізації виробництва сталі є перехід на електрометалургійні технології виплавки сталі, в том числі на виплавку в індукційних печах [350, 351]. Серед обмежень індукційної плавки, що заважають переходу на виплавку в індукційних печах, вказують низьку стійкість їх футерівки. Індукційні сталеплавильні агрегати характеризуються значною продуктивністю та успішно застосовуються для виплавки відносно невеликих об'ємів (від 5 кг до 60 т) високоякісних сталей у виробничих (ливарні цехи) та лабораторних умовах. З технічної літератури відомі технології виплавки в індукційних печах високолегованих жаростійких сталей [352-354], конструкційних та низьковуглецевих сталей [355-357], кольорових металів [358, 359] і сплавів спеціального призначення [360, 361].

Особливістю роботи індукційної тигельної печі є подібність до функціонування трансформатора, коли первинною обмоткою є індуктор, а вторинною обмоткою виступає матеріал у тиглі, розміщеного у центрі індуктора, який заживлюється від високочастотного генератору перемінного струму. Завдяки такій конструкції на метал, що розплавляється під дією токів Фуко, діють радіальні сили, направлені до центру ванни розплавленого металу [362, 363]. Дія таких сил приводить до витиснення рідкого металу по вертикальній осі тигля вгору та вниз, що сприяє електродинамічному перемішуванню шарів металу, забезпечуючи досягнення хімічної однорідності розплаву та флотації неметалічних включень. Активна циркуляція рідкого металу позитивно впливає на однорідність хімічного складу металів, що виплавляють, але негативно відбивається на такому показнику, як стійкість футерівки індукційних печей.

Футерівка розташовується між рідким металом та індуктором (рис. 1), і, вочевидь, чим товще футерування печі (або потовщення через нарости), тим менший магнітний потік проникає в метал і тим нижче ефективність використання електроенергії при плавці, тому товщина футерування має обмеження [364, 365]. Загальну конструкцію індукційної плавильної печі наведено на рис. 1.

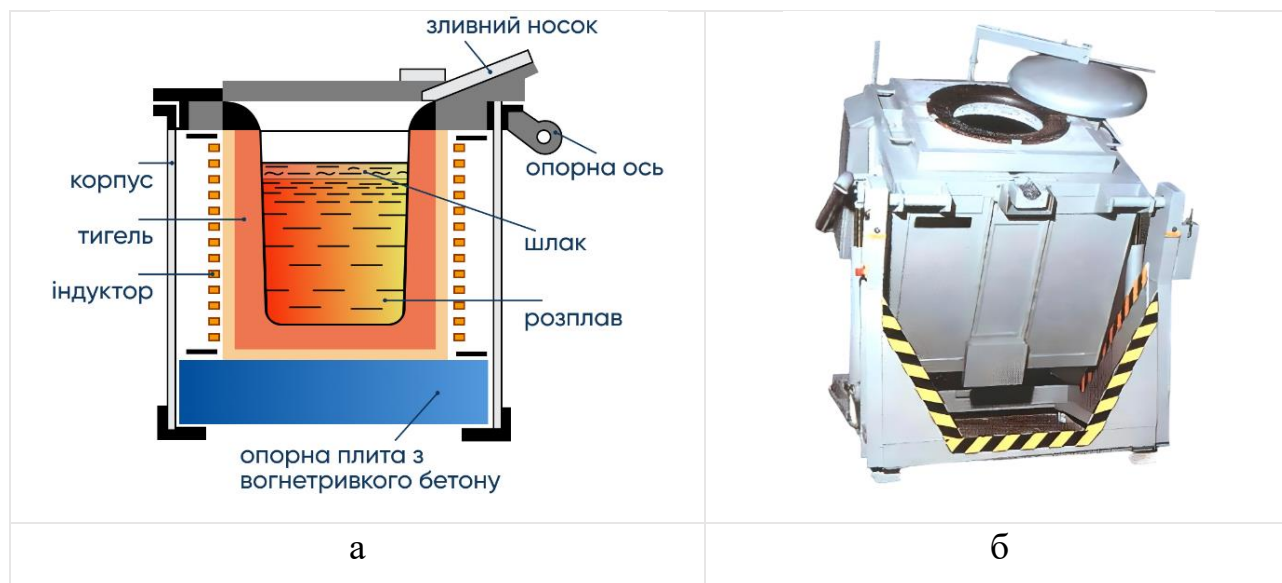


Рисунок 1. Схема (а) та зовнішній вигляд (б) типової індукційної тигельної плавильної печі

Тигель індукційної печі (див. рис. 1) виготовляють/ремонтують методами набивання або викладання вогнетривким матеріалом (цеглою). Тигель безпосередньо знаходиться в індукторі, який являє собою водоохолоджувану спіраль з мідної трубки із визначеною кількістю витків. Набивний тигель з вогнетривкого порошкового матеріалу закріплюють у корпусі і встановлюють на плиті (основі) з вогнетривкого бетону. Випуск виплавленого металу відбувається через зливний носок при повороті печі разом з корпусом відносно опорної осі [365]. Через фізичні особливості генерації тепла безпосередньо у металі підвищення температури плавки обмежується переважно стійкістю самого плавильного тигля. Тигель виконують із вогнетривкого матеріалу, яким може виступати кераміка, графіт або шамот-графіт [366-368]. Для підвищення

термічної стійкості і зменшення термічного стресу тигля використовують системи охолодження водою і контролю за його температурою [369, 370].

Величини температур переходу у рідку фазу марок сталей, які виплавляють в індукційних печах, обумовлюють використання футеровок тиглів трьох видів: (а) кислої, (б) основної і (в) нейтральної. Для кислої (а) футерівки застосовують вогнетриви на основі окису кремнію ($90\ldots98\% \text{ SiO}_2$), борної кислоти ($1\ldots1,5\%$) та невеликої кількості таких окислів металів, як Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO та ін. Тривалість роботи тиглів з кислої футерівки складає $80\ldots100$ плавов. Для основної (б) футерівки використовують переважно магнезит (до $85\% \text{ MgO}$), рідке скло із домішками окислів типу CaO , SiO_2 й ін. Стійкість таких тиглів знижується зі збільшенням об'єму печей і складає $20\ldots50$ плавов. Для нейтральної (в) футерівки застосовують матеріали на основі Al_2O_3 з домішками магнезиту. Стійкість такої футерівки є вищою, ніж у двох попередніх варіантах [365, 371].

У джерелах [372, 373] в якості переваг індукційних тигельних печей також вказані широкі можливості їх автоматизації з використанням контролерів та висока екологічність агрегатів, а в якості недоліку також вказано на проблему низької стійкості футерівки. За думкою авторів [365, 374] важливою частиною обслуговування, забезпечення ефективності й надійності обладнання та безпеки процесу плавки є контроль за зношуванням футерівки, який проводять автоматизовано. Виходячи з вищесказаного, аналіз виробничого досвіду з підвищення стійкості футерівки та розробка рекомендацій для підвищення ефективності контролю зношування футерівки індукційної тигельної плавильної печі є актуальним науково-практичним завданням.

Для обґрунтування й розробки практичних рекомендацій щодо підвищення стійкості футерівки індукційної тигельної плавильної печі та вибору ефективного методу контролю зношування використовували евристичні методи: контрольних запитань та фокальних об'єктів. Крім того, проводили оцінку ефективності та розробили пропозиції з оптимізації технології ремонту футерівки із застосуванням методу функціонально-вартісного аналізу.

Метод контрольних запитань (МКЗ). Метод контрольних запитань використовують для активізації та перевірки розуміння інформації. Суть МКЗ полягає у створенні або використанні підготовленого переліку запитання, які дозволяють розглянути проблему з різних сторін, стимулювати критичне мислення, систематизувати пошук та знайти варіант рішення проблеми [375-378]. Для забезпечення розкриття проблеми запитання повинні бути структурованими щодо відображення ключових аспектів теми, розглядатися поетапно, бути різноманітними за формою і рівнем складності, сприяти активному застосуванню знань та креативності, мати зворотній зв'язок для можливості виправлення непорозумінь, стимулювати обговорення при колективному розгляді (наприклад, при застосуванні у технологіях «мозкових атак»). В різні часи різними авторами було розроблено різноманітні варіанти запитань, які використовують для активізації творчого мислення у МКЗ. Це списки запитань таких авторів, як [375-378]: А. Осборн, Т. Ейлоарт, Д. Пірсон, Д. Пойа, Р. Буш та ін. Нижче розглянуто обрані запитання (по п'ять вибірових запитань) зі списків А. Осборна, Т. Ейлоарта, при відповіді на які використовували відомості з виробничого досвіду.

Розгляд проблеми через список питань А. Осборна.

- «Що в технічному об'єкті можна змінити? Що і наскільки можна замінити в ньому: використати інший інгредієнт, матеріал, процес, джерело енергії, розташування, колір, звук, освітлення?».

Відповідь: Як було вказано у літературному огляді, стійкість футеровки залежить від матеріалу футерівки. Тобто досягти збільшення стійкості можна забезпеченням коректного вибору футеровочного матеріалу в залежності від марок сталей, що виплавляють.

- «Що можна в технічному об'єкті зменшити або замінити? Чи можна щонебудь ущільнити, стиснути, згустити, сконденсувати, застосувати метод мініатюризації, вкоротити, звузити, відокремити, роздібнити?».

Відповідь: Досягти збільшення термічної стійкості футерівки можна виконанням гарячих ремонтів окремих ділянок футерівки по мірі її зношування,

а саме виконанням підварювання в зонах інтенсивного зносу – зазвичай у зоні завантаження брукху та збоку зливу. При такому ремонті підварку у вигляді брикету висипають на проблемне місце, вона розтікається під дією високих температур і заповнює ділянку, що ремонтують. Стійкість підварювання при правильному проведенні такої операції сягає до 100 плавов.

- «Що можна перетворити в технічному об'єкті? Які компоненти можна замінити? Чи можна змінити модель, розбивку, розмітку, планування, послідовність операцій? Чи можна поміняти місцями причину й ефект, змінити швидкість, темп або режим?».

Відповідь: Замість брикетів для підварки можна використовувати метод ремонту напівсухим торкретуванням. Його використовують для ремонту будь яких зон, а операція займає менше часу ніж підварювання. Відновлена торкретуванням футерівка має меншу стійкість – до 40 плавов, але дозволяє більш вибірково виконати ремонт.

- «Чи можливо розв'язати винахідницьку задачу шляхом пристосування, спрощення, скорочення? Що нагадує даний технічний об'єкт? Чи викликає аналогія нову ідею? Чи відомі в минулому аналогічні проблемні ситуації, які можна використати? Що можна скопіювати? Який технічний об'єкт необхідно випереджати?».

Відповідь: Відносно новим і технологічним методом збільшення тривалості футеровки печі є використання лазерних систем [379, 380] (наприклад, системи LR 2000 Delta CCS [381]), для контролю стану залишкової товщини футерівки, що дозволяє завчасно визначити необхідність виконання локальних ремонтів та потрібну кількість матеріалу для проведення ремонту, а отже оптимізувати час на виконання ремонтних робіт.

- «Які модифікації технічного об'єкта можливі? Чи буде прийнятною модифікація шляхом обертання, згину, кручення, повороту? Які зміни призначення, руху, кольору, запаху, форми, обрисів можна застосувати? Чи є інші можливі зміни?».

Відповідь: Контролем за якістю шлаку та його хімічним складом можливо

збільшити тривалість матеріалів футерівки. Найбільш висока інтенсивність виходу з ладу футерівки спостерігається в період формування шлаку з основністю $\text{CaO/SiO}_2 = 1,0 \dots 1,5$ та високою окисленістю (до 30% FeO). Це вказує на необхідність саме в перший період плавки формувати шлак, що має максимальну для даних температурних умов концентрацію MgO, більш близьку до насичення.

Розгляд проблеми через список питань Т. Ейлоарта.

- «Визначити ідеальне рішення, розробляти можливі».

Відповідь: Одним з практичних методів, який можна віднести до «ідеального» для виробничих умов, є збільшення стійкості футерівки за рахунок використання вогнетривів з більшим експлуатаційним терміном стійкості та більш дешевих. До прикладу, у шамотної цегли стійкість найвища. Її максимальна вогнетривкість не настільки висока, як у основної цегли (1690...1730 °C проти 2000 °C), але вона легко протистоїть перепадам температури і коштує дешевше.

- «Спробувати різні види матеріалів і види енергії».

Відповідь: З точки зору енергії, що використовується при індукційному плавленні, то її використання є достатньо ефективним. Як використання інших матеріалів слід відзначити відомі способи підвищення стійкості футерівки шляхом виплавки сталі під збагаченими MgO шлаками, коли шлак формується в області насичення MgO. Шлаки такого складу мають менш агресивний вплив на вогнетривку футерівку печі.

- «В уяві залізи усередину механізму».

Відповідь: При розгляді кінетики насичення шлаку оксидом магнію, коли відбувається взаємодія матеріалу вогнетриву MgO-C , при моделюванні процесу введення магнезійного флюсу спостерігається суттєве уповільнення швидкості потрапляння оксиду магнію в шлак, а саме в 2...2.5 рази. Промислові дослідження дозволили оцінити ступінь розчинення вогнетривів основного складу в шлаку в залежності від вмісту в ньому оксиду магнію, при цьому виявлена закономірність

зменшення переходу оксиду магнію з футеровки в шлак при збільшенні ступеню насичення шлаку MgO .

- «Видозмінити рішення проблеми з погляду часу (скоріше або повільніше), розмірів, в'язкості і т. ін.».

Відповідь: Додатковий вплив на стійкість футерівки має геометрія тигля та контролювання дотримання розмірів і допусків при футеруванні. Тигель може пройти попередню стендову збірку на підприємстві, яке випускає вогнетривкі конструкції, що також може вплинути на збільшення кількості плавок.

- «Визначити альтернативні проблеми і системи, що вилучають певну ланку з ланцюга, і таким чином, створюють щось зовсім інше, ведуть до потрібного рішення».

Відповідь: Вочевидь, що найбільш сильно футерівка зношується (розм'якшується і нашлаковується) в зонах з підвищеною температурою. Тому одним з прийомів, спрямованих на підвищення терміну служби футерівки є її охолодження в таких зонах.

Метод фокальних об'єктів (МФО). Метод фокальних об'єктів призначений для удосконалення вибраного об'єкту, що називають фокальним (через те, що він знаходиться у фокусі уваги), за рахунок перенесення ознак випадково вибраних об'єктів на фокальний об'єкт [375, 378, 382]. Це метод пошуку нових ідей, який вирізняється простотою та можливістю багаторазового застосування.

Ставлячи за мету удосконалення підвищення стійкості футерівки індукційної печі, середня тривалість якої складає біля 50 плавок, в якості фокального об'єкту було обрано систему для контролю за станом залишкової товщини футерівки. Вибір випадкових об'єктів та їх визначені властивості наведені на рис. 2. Слід окремо відзначити внесок українських дослідників Інституту чорної металургії НАН України в розробку систем автоматизованого контролю за зношуванням футерівки та поду доменної печі, які базуються на комбінуванні калориметричного та термометричного методів контролю й аналізі теплової роботи і теплових втрат металургійного агрегату [383–385]. Відомостей

щодо застосування таких систем контролю до умов плавки в індукційних печах не було знайдено.

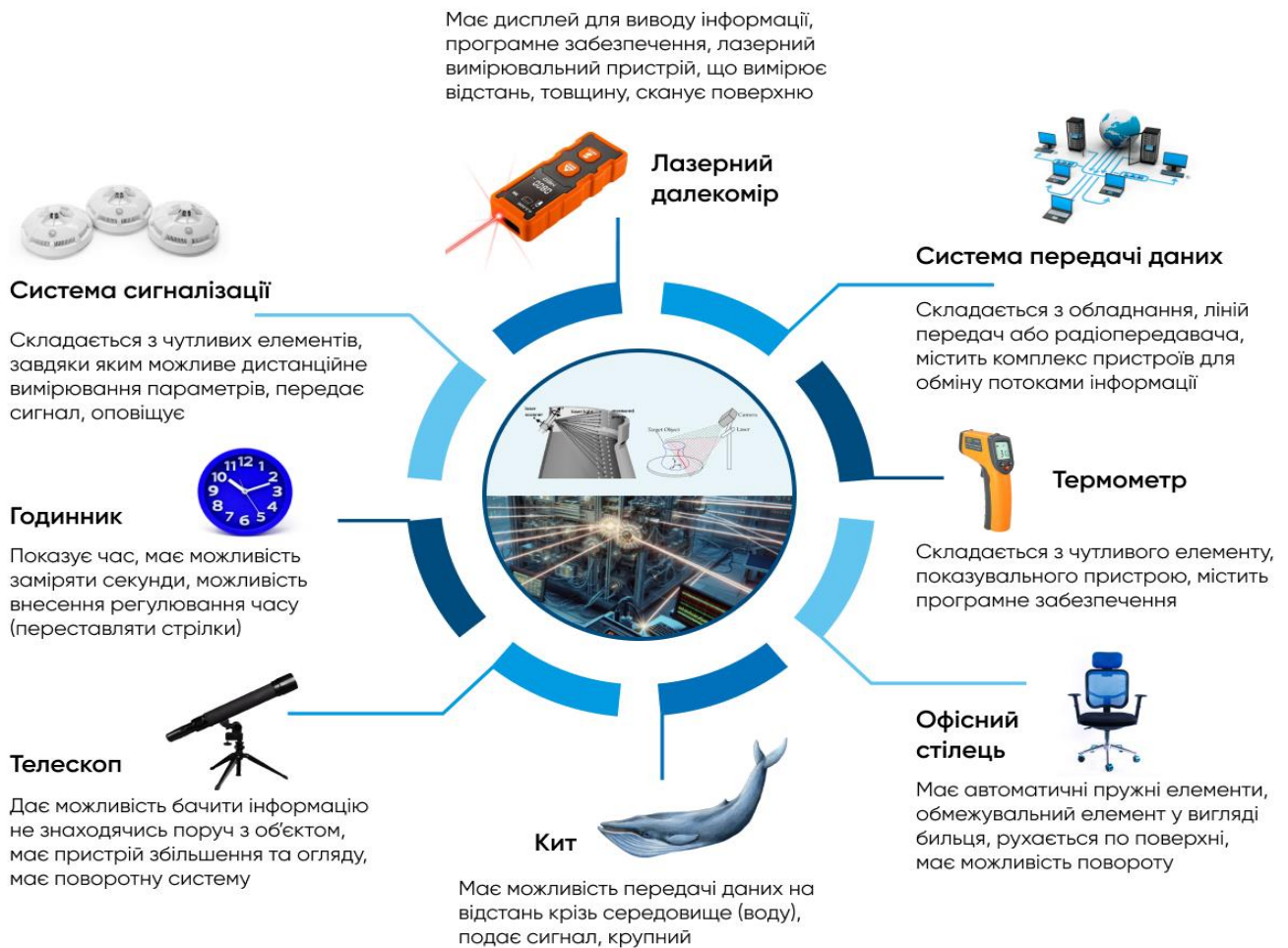


Рисунок 2. Удосконалення системи для контролю за станом залишкової товщини футерівки методом фокальних об'єктів: аналіз властивостей випадково вибраних об'єктів

Шляхом генерації ідей за рахунок додавання варіативних властивостей випадкових об'єктів до фокального об'єкту визначено раціональність впровадження лазерних систем [379-381]. Досвід розробки та успішне застосування лазерної системи для моніторингу стану тиглю індукційної печі наведено у роботі [386]; а у дослідженні [387] подібна лазерна система впроваджена при вимірюванні зношування футерівки доменної печі. При цьому відомі підприємства-виробники лазерних систем з необхідними функціями:

DELTA (Sensors and Systems for the Steel Industry) [388], SAVEWAY [389], Luoyang Songdao Induction Heating Technology Co., Ltd [390], MTI Corporation [391], Acuity [392] та ін.

Для практичного використання на виробництві обрано для впровадження установку лазерного сканування, що базується на експлуатації лазерної системи LR 2000 Delta CCS для контролю над станом залишкової товщини футерівки. Система заснована на принципі 3D сканера для побудови профілю футерівки [379, 393, 394], що дозволяє визначати залишкові розміри. Це дозволяє завчасно визначати необхідність виконання локальних ремонтів, оптимізувати час їх виконання, розраховувати необхідну кількість футерувальних матеріалів.

Функціонально-вартісний аналіз (ФВА). Функціонально-вартісний аналіз є методом оцінки ефективності технічної системи з точки зору її функціональності та вартості [395-398]. З метою оптимізації витрат на технологію ремонту зношеної футерівки індукційної тигельної печі, ФВА доцільно застосувати для визначення співвідношення між функціональністю витратних складових елементів (матеріалів), що використовуються для ремонту, та їх вартістю. Основні етапи ФВА оцінки ефективності матеріалів для ремонту зношеної футерівки індукційної тигельної печі наведені у табл. 1. На зношування футерівки тигля індукційної печі впливають важкі умови його роботи: тепловий, ерозійний і корозійний вплив гарячого рідкого розплаву, хімічний процес кородування шлаку, ефект статичного тиску стовпа рідкого металу (до $40\div 80$ кПа [365]), ефект динамічного тертя при перемішуванні рідкого металу, механічні удари при завалці шихтових матеріалів і лігатури, а також при осаджуванні мостів, які виникають при плавці. Як об'єкт удосконалення розглядали індукційну тигельну піч ємністю 3 т, яку експлуатують у плавильному відділенні ливарного цеху підприємства ТОВ «ЗАПОРІЗЬКИЙ ЛИВАРНО-МЕХАНІЧНИЙ ЗАВОД».

Таблиця 1.

Основні етапи ФВА при оцінці ефективності матеріалів для ремонту
футерівки індукційної тигельної печі

№	Етап ФВА	Зміст етапу ФВА
1	2	3
1.	Визначення функцій матеріалів для ремонту	Див. табл. 2
2.	Оцінка важливості функцій	- Визначення ступеня важливості функцій для відновлення футерівки та забезпечення ефективності роботи індукційної тигельної печі за принципом АВС. - Оцінка впливу кожної функції на продуктивність печі та безпеку експлуатації.
3.	Аналіз вартості функцій	- Врахування витрат на матеріали, їх виготовлення та установку. - Оцінка ефективності різних матеріалів з точки зору подовження тривалості служби, стійкості до агресивних середовищ та вартості футерівки.
4.	Визначення альтернатив	- Розгляд різних типів теплоізоляційних, структурних та термостійких матеріалів, що можуть використовуватися для ремонту футерівки. - Порівняння їхніх технічних характеристик та вартості.
5.	Вибір оптимального варіанту	Вибір матеріалу, який забезпечить найвищу ефективність за доступну вартість.
6.	Оптимізація та постійне вдосконалення	- Впровадження матеріалу. - Проведення моніторингу ефективності матеріалу. - Корекція матеріалу в разі потреби.

Таким чином, ФВА допомагає вибрати оптимальний матеріал для ремонту зношеної футерівки, забезпечити ефективність процесу та економічну доцільність у використанні ресурсів. Заміну футерівки печі потрібно виконувати в середньому щомісяця. Для проведення ремонту необхідні наступні складові елементи: маса вогнетривка, бетон вогнетривкий, набивна маса, шаблон для набивки печі, тигель (який має свій термін роботи і після зношування потребує заміни). Функціональність оцінювали за значущістю матеріалів для проведення ремонту з точки зору досягнення мети (ефекту) збільшення міжремонтних періодів. Для оцінки функціональності елементів використовували експертну оцінку. При цьому, за принципом Ейзенхауера-Парето, виділяли функції (див. п. 1 табл. 1 та табл. 2) вкладу у досягнення мети, які відносили до певних ABC класів, яким відповідають літери: А – головні функції, В – другорядні функції, С – непотрібні або зайві функції.

Розглянемо матеріали в залежності від витрат коштів на них при виконанні для ремонту печі. Через змінний характер цін, політику нерозголошення та ймовірність комерційної таємниці підприємства на собівартість ремонтних робіт у табл. 3 розподіл коштів, що витрачаються на ремонт, наведено як результуюча у відсоткових показниках. Вартість позицій 2–3, табл. 3, вказана відносно тону матеріалу. Крім того, оцінювали матеріали для ремонту печі з точки зору їх функціональної значущості для досягнення максимальної стійкості футерівки. Оцінку проводили за десятибальною шкалою. Виконували опитування співробітників різних структурних відділів цеху, а саме: майстра дільниці, представників відділу постачань та ремонтних бригад. Середня експертна оцінка за значимістю наведена у табл. 3. За отриманими результатами розраховували коефіцієнт значимості складових матеріалів для ремонту індукційної тигельної печі (див. табл. 3). Отримані дані представлені графічно на рис. 3 у вигляді функціонально-вартісної діаграми.

Таблиця 2.

Розподіл функцій матеріалів для ремонту футерівки згідно з п. 1 табл. 1
за принципом ABC для цільового призначення збільшення
міжремонтного періоду

№	Складові	Функції						
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	Разом по складовим
1.	Тигель	В	А	А	А	А	В	4А-2В
2.	Маса вогнетривка	В	В	-	А	-	В	А-3В
3.	Бетон вогнетривкий	-	В	В	А	-	С	А-2В-С
4.	Маса набивна ¹⁾	А	С	-	С	-	-	А-2С
5.	Шаблон для набивки печі ²⁾	А	-	-	-	-	-	А
¹⁾ мінералізатори та в'язучі речовини								
²⁾ зварний з листового матеріалу								
F1 – Реставрація розмірів і форми футерівки F2 – Відновлення теплоізоляційних властивостей футерівки, що діють у всьому діапазоні робочих температур (200...1650 °С) F3 – Забезпечення механічної міцності для утримання розплаву та ударів F4 – Забезпечення стійкості до впливу високих температур F5 – Захист від ерозії, агресивних середовищ та тертя при гідродинамічному перемішуванні рідкого металу F6 – Відновлення тепловідбивних характеристик [399]								

Таблиця 3.

Розрахунок коефіцієнтів витрат складових матеріалів для ремонту
індукційної тигельної печі

№	Складові	Витрати на ремонт		Експертна оцінка значимості		Коефіцієнт витрат
		Питома вага у загальних витратах, ПВВ, %	Клас	Середня оцінка за 10-бальною шкалою	Значимість, ЗОЕ, %	КВ = ПВВ / ЗОЕ
1.	Тигель	81	A	7,6	21	3,85
2.	Маса вогнетривка	6,2	A	8,3	24	0,25
3.	Бетон вогнетривкий	3,5	B	7	20	0,17
4.	Маса набивна	5	A	7,6	21	0,20
5.	Шаблон для набивки печі	4,3	C	5	14	0,30
	Всього	100	-	35,5	100	-

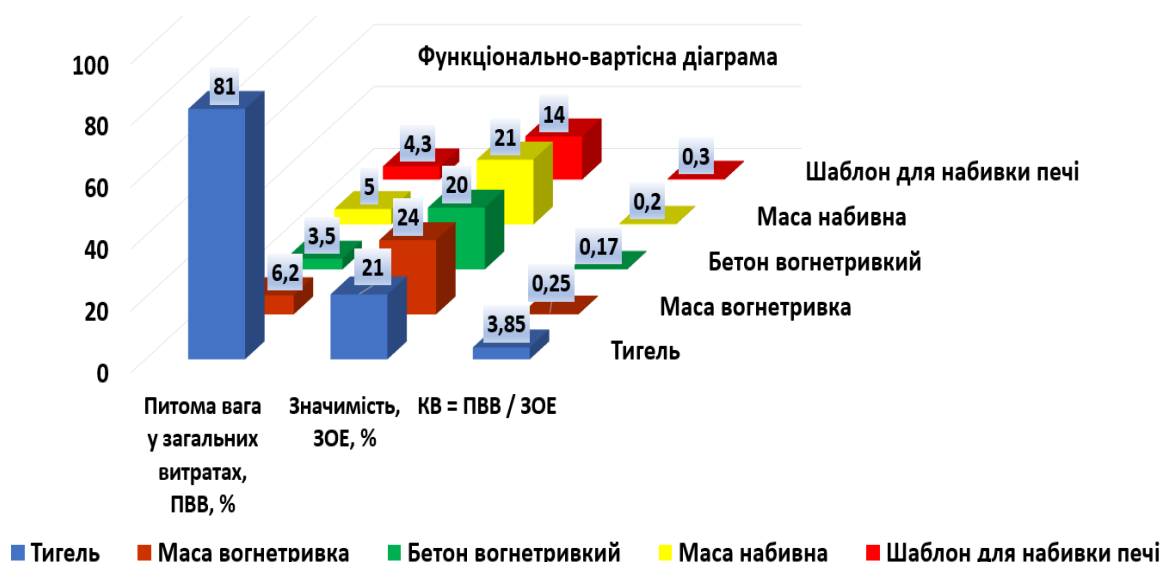


Рисунок 3. Функціонально-вартісна діаграма для ремонту індукційної тигельної печі

Для оптимальної технічної системи відношення питомої ваги у витратах до значимості кожного окремого параметра (складової) не повинно перевищувати 1,0. З отриманих результатів встановили, що коефіцієнт витрат КВ по ремонту тигля становить 3,85, тобто потрібний пошук альтернативних постачальників тиглів з меншою вартістю. Слід зазначити, що зміна тигля відбувається не при кожному ремонті, тому, в перспективі, слід уточнити викладену вище методику ФВА з точки зору перерахунку витрат на тону виплавленої сталі. В якості організаційної оптимізації розроблено рекомендації про дотримання правил експлуатації тигля для подовження міжремонтних періодів і виконання ремонтів лише перебиванням печі без заміни тигля. Коефіцієнт витрат для інших складових вважається сприятливим ($< 1,0$).

Висновки. В рамках парадигми світової декарбонізації показано, що актуальним питанням для металургійних виробництв є перехід на електрометалургійні технології виплавки сталі, в том числі на виплавку в індукційних печах. Використання індукційних сталеплавильних печей в ливарних та сталеплавильних цехах зумовлене великою продуктивністю, інтенсивним перемішуванням і високою якістю металів (сплавів), що виплавляють. Визначені перспективи подальшого удосконалення індукційних печей в напрямку підвищення стійкості футерівки, яка обмежує продуктивність таких агрегатів. Показано, що футерівка тигля повинна мати такі властивості: високі вогнетривкість й шлакотривкість, висока термостійкість та механічна міцність, мінімальні товщина та зношування футерівки під час плавки. Із застосуванням евристичних методів отримано низку перспективних рішень щодо підвищення стійкості та удосконалення методів контролю за станом футерівки. Метод контрольних запитань дозволив намітити основні аспекти, що можуть призвести до збільшення тривалості кампанії індукційної печі: заміна футеровочного матеріалу, виконанням гарячих ремонтів окремих ділянок футерівки по мірі її зношування, контроль за якістю шлаку та його хімічним складом, геометрія тигля та дотримання умов його збирання, додаткове охолодження футерівки в місцях підвищеної температури. Методом фокальних

об'єктів, шляхом генерації ідей за рахунок додавання варіативних властивостей випадкових об'єктів до об'єкту удосконалення, визначено раціональність впровадження лазерних систем для контролю за станом залишкової товщини футерівки. Система заснована на принципі 3D сканера для побудови профілю футерівки, що дозволяє визначати залишкові розміри. Це дає можливість завчасно визначати необхідність виконання локальних ремонтів, оптимізувати час їх проведення, розраховувати необхідну кількість футерувальних матеріалів. При розгляді питань оптимізації ремонту зношеної футерівки індукційної тигельної печі методом функціонально-вартісного аналізу виконаний аналіз процесу удосконалення індукційної тигельної печі ємністю 3 т, яку експлуатують у плавильному відділенні ливарного цеху підприємства ТОВ «ЗАПОРІЗЬКИЙ ЛИВАРНО-МЕХАНІЧНИЙ ЗАВОД». Врахування експертної оцінки співробітників різних структурних підрозділів цеху щодо витрат складових матеріалів для ремонту індукційної тигельної печі, показало, що потрібний пошук альтернативних постачальників тиглів з меншою вартістю. В якості організаційної оптимізації розроблено рекомендації про дотримання правил експлуатації тигля для подовження міжремонтних періодів і виконання ремонтів лише перебиванням печі без заміни тигля. Таким чином, використовуючи різні методи підвищення стійкості та удосконалення контролю зношування футерівки можна досягти збільшення продуктивності плавильного обладнання.