

Т.А. Желдак, Н.А. Антоненко

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ СТІЙКІСТЬ ФУТЕРОВКИ КОНВЕРТЕРА ТА ПОБУДОВА ПРОГНОЗУЮЧОЇ МОДЕЛІ

Анотація. В ході виконання даної роботи було розглянуто процес зношування футеровки конвертера. Остання може витримувати тисячі плавок, кожна з яких тим чи іншим чином впливає на термін служби футеровки. Було вивчено досвід 91 сесії роботи футеровок за сім років (загалом – більше 145 тисяч плавок). Метою дослідження є розробка сімейства моделей залежностей стійкості футеровки конвертера від відомих технічних та технологічних чинників, задля подальшого надання рекомендацій щодо ведення виробничого процесу.

Пропонується використання отриманих моделей в складі інтегрованої системи керування металургійним підприємством, а саме в підсистемі підтримки прийняття рішень оператором конвертера для формування порад щодо збільшення тривалості роботи поточної футеровки.

Ключові слова: футеровка, регресія, модель, стійкість, прогнозування, МГУА, залишки, аналіз, конвертер.

Постановка проблеми. Виробництво сталі конвертерним способом завдяки своїй простоті та високій продуктивності, низькими капітальними та експлуатаційними витратами, в наш час є провідним сталеплавильним процесом в світі. До 70% сталі в Україні, як і загалом у всіх країнах виробляється саме конвертерним способом. При цьому доля конвертерного виробництва в країнах Азії є взагалі не порівняною (80-90%) з іншими видами виробництва [1].

Одним з головних факторів витрат при конвертерному виробництві сталі є зупинка конвертера, пов'язана із заміною футеровки. Тому у світовій практиці, виробництва сталі в конвертерах, домінують тенденції підвищення стійкості футеровки конвертера та прогнозування зношення різних частин футеровки, в залежності від специфіки її навантаження [2, 3].

Мета роботи – розробка сімейства моделей залежностей стійкості футеровки конвертера від відомих технічних та технологічних чинників, задля подальшого надання рекомендацій щодо ведення виробничого процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ще на початку століття опубліковані ряд робіт, де визначені основні фактори, що впливають на термін роботи футеровки конвертера. Зокрема, проведений раніше аналіз [4] показав, що такі фактори можна поділити на технічні (якість застосування вогнетривких матеріалів та схема кладки) і технологічні (якість чавуну, основність плавки, виконання додувок та способи догляду за футеровкою протягом компанії тощо). Технічні фактори закладають основу для подальшого використання футеровки конвертера. Технологічні фактори впливають на зношування футеровки протягом компанії. Зокрема важливо правильно підійти до догляду за футеровкою. Такі заходи можна розділити на три основні групи [2]: торкретування, шлакування та підварювання.

Торкретування [5] – це метод гарячого ремонту футеровки конвертера, який полягає в нанесенні через торкрет-фурму вогнетривких мас на зношені ділянки футеровки. Торкретування буває мокре, напівсухе та факельне. Недоліками мокрого і напівсухого торкретування вважається велика тривалість операції. Факельне торкретування вважають найефективнішим, але головний його недолік – це велика вартість торкрет-матеріалів.

Шлакування [5] – це відносно нова технологія, що передбачає вдування азоту під високим тиском через верхню кисневу фурму конвертера з метою розбризкування шлаку по футеровці. Переважно перед цим у шлак додають оксиди магнію (доломіт, доломітове вапно) для підвищення густоти шлаку.

Підварюванням зазвичай ремонтують завалочну і зливну сторони футеровки та дно. В якості підварки використовують б/у цеглу, або підварочні маси на периклазовій основі. Одним з недоліків такого догляду за футеровкою є неможливість ремонту горловини конвертера [2].

Ключовий вплив на стійкість футеровки має якість чавуну, що заливається в конвертер, зокрема, вміст у ньому MgO , SiO_2 та оксидів заліза.

В багатьох джерелах [3, 5] відзначають важливість для продовження терміну експлуатації футеровки насичення шлаку оксидом магнію (в середньому до 8-12%). Це пов'язано зі згущенням такого шлаку, оскільки розріджений шлак (формується через високий вміст FeO та інших оксидів заліза) може проникати в пори футеровки, що з часом руйнує її. Але важливо не допустити надмірного збагачення в шлаку MgO , тому що різко підвищиться його в'язкість і стане важко отримати активний шлак.

Кремнезем (SiO_2) активно взаємодіє з основними оксидами футеровки, тому великий його вміст значно знижує тривалість служби футеровки. З метою

зменшення агресивного впливу цього кислотного оксиду на футеровку рекомендовано усілякими методами прискорити формування активного основного шлаку у конвертері (до основність 3,5 і вище) [3].

Додатковим фактором, що на сьогодні є вимушеним рішенням на об'єкті – ПАТ «ДМЗ» – є необхідність скачування шлаку під час плавки. Такий підхід дозволяє знизити питомі витрати рідкого чавуну, підвищити ступінь десульфурації, але як показано в [6], мало впливає на роботу футеровку конвертера. Також потрібно відзначити, що у зв'язку з різким підвищенням проміжного скачування шлаку в 2009-му році (з 40-50 до 96,7 відсотків плавок [6]) стає дуже важко побудувати модель з використанням такого фактора.

В Україні, проблема стійкості футеровки конвертера завжди була актуальною, наприклад, на ПАТ «ДМЗ» ще на початку 21-го століття тривалість роботи футеровки ледь перевищувала 1000 плавок, на відміну від зарубіжного рівня, що становив від 3-х до 4-х тис. плавок [3]. Згодом, при використанні периклазовуглицевих вогнетривів та збільшення кількості заходів догляду за футеровкою вдалося дещо підвищити тривалість її служби (до 3200 плавок за компанію) [6]. В цей час були застосовані значно дорожчі футеровки «Mayerton» та «Dalmond Feuerfest Siegburg» німецького виробництва. Втім, кардинальних змін в тривалості роботи захисного покриття не відбулося: закордонні показники на сьогодні перевищують українські в десятки разів [1, 3].

У [7] розраховані коефіцієнти нелінійної статистичної залежності, між усіма факторами та кількістю плавок витриманих футеровкою, на факторах з найкращими показниками побудована нейронно-мережева модель, що дозволяє прогнозувати стійкість футеровки конвертера. Утім, такий підхід має ряд недоліків: ускладнена будь-яка логічна інтерпретація моделі, в роботі не враховуються деякі важливі технологічні та технологічні фактори впливу (наприклад, пора року або виробник футеровки), а отримана модель не завжди адекватно себе поводить, за межами навчальної вибірки.

Використання класичного методу побудови моделі [8], що базується на використанні багатовимірної нелінійної регресії, передбачає використання в якості модельних функцій простих поліномів вигляду

$$y = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=1}^k a_{ij} x_j^{S_{ij}}, \quad (1)$$

де k – кількість змінних; M – кількість членів полінома; a_{ij} – коефіцієнти при складових полінома; S_{ij} – ступені аргументів.

Такий підхід ігнорує взаємозв'язок між факторами, що не відповідає фізичним основам процесу, адже параметри ведення плавки, її теплові та хімічні параметри суттєво впливають один на одного [9].

Застосування такого методу обмежене ще однією об'єктивною причиною. Як показано в [6], всі залежності, що можуть бути отримані за кожним незалежним фактором, мають достатньо високі ступені, що при зведенні до узагальненої моделі (1) призводить до втрати стійкості моделі через надмірну чутливість до вхідних даних.

Уникнути цих недоліків дозволяє використання для апроксимації керованої змінної від певного набору параметрів узагальнених поліномів вигляду

$$y = \sum_{i=0}^{M-1} a_i \prod_{j=1}^k x_j^{S_{ij}} . \quad (2)$$

У (2), як і в (1), ступені, в яких предиктори входять до моделі – натуральні числа, але вже наявні добутки параметрів.

Одним з найпоширеніших та найвідоміших методів побудови моделей вигляду (2) є метод групового врахування аргументів (МГВА). Він базується на самоорганізації моделей та, на відміну від регресійного аналізу, де структура моделі задана, спрямований на знаходження структури моделі оптимальної складності, шляхом еволюціонування моделей-рішень. Переваги МГВА [10] – це простота та швидкість синтезу моделей, автоматичне знаходження оптимальної складності моделі, та той факт що метод може бути використаний у випадку малої кількості точок експерименту.

До недоліків МГВА можна віднести надмірне ускладнення, коли вже на третьому кроці самоорганізації, під час застосування найпростішої форми базової моделі другого порядку

$$f(x_1, x_2) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2 \quad (3)$$

серед найкращих моделей опиняються, ті що зовсім спотворюють реальні фізичні залежності [9].

Ключову роль у правильній побудові моделі бере критерій самоорганізації, належний вибір якого має забезпечити правильний відбір моделей рішень, що будуть адекватні по відношенню до нових даних та стійкі до шуму, а також вчасну зупинку ітераційного процесу, якщо на поточному кроці досягнуто оптимального значення критерію.

Для вибору опорної функції між двома предикторами, пропонується використовувати внутрішній критерій, що накладає «штраф» на кількість параметрів моделі. Для вибору найкращих моделей в кожному ряді селекції пропонується використовувати зовнішній критерій стандартної перехресної перевірки (cross-validation), що більш вимогливий ніж класичний зовнішній критерій регулярності. Такий вибір обумовлений важливим принципом розмежування сфер компетентності між критеріями двох типів: якщо внутрішній критерій орієнтований на побудову якомога більш компактною моделі, то зовнішній критерій має забезпечити низьку похибку прогнозу [11].

При виборі внутрішнього критерію найчастіше розглядаються наступні варіанти:

1) Скорегований коефіцієнт детермінації (adjusted R^2):

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - k - 1}, \quad (4)$$

де n – кількість спостережень, а k – кількість параметрів моделі;

2) Інформаційний критерій Акаїке (AIC):

$$AIC = 2k - n \ln \left(\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2 / n \right) \quad (5)$$

Нажаль, на практиці величина штрафу, що накладається на число параметрів моделі по формулі (4), часто буває недостатньою [9]. Тому, в роботі будемо використовувати інформаційний критерій Акаїке.

Опорна функція для побудови моделі за МГУА має вигляд

$$y = a_0 + a_1 x_i^s + a_2 x_j^s + a_3 x_i^s x_j^s, \quad (6)$$

де s – це ступінь, що надалі обмежується умовою: $|s| \leq 1$.

Згадане обмеження обґрунтоване в [9] і пояснюється тим, що в технічних та природних системах практично не зустрічається залежностей, де б пара параметрів мали між собою залежність, складнішу за другий порядок. Водночас показано, що введення в початкові моделі МГУА дозволу на від'ємність ступенів S_{ij} дозволяє не тільки підвищити фізичну відповідність моделей сутності процесу, а й значно покращує результуючу оцінку моделі.

Для перевірки статистичних гіпотез, будемо використовувати p -значення (p -value), що фактично дорівнює вірогідності помилки при відхиленні нульової гіпотези, іншими словами це вірогідність помилки першого роду.

Опис дослідження. В серії експериментів, що охоплює роботу трьох конвертерів сталеплавильного цеху ПАТ «ДМЗ» з 2004 по 2013 рік і складається з більш як 11400 плавов, використовувались наступні фактори:

- X1 - Кількість плавов з додувкою, %;
- X2 - Середній вміст у чавуні Si, %;
- X3 - Середній вміст у чавуні Mn, %;
- X4 - Середній вміст у чавуні S, %;
- X5 – Середня основність, відн. од.;
- X6 - Відсоток плавов з основністю < 2,8 од.;
- X7 - Відсоток плавов з Si>0,90 %;
- X8 - Відсоток плавов з Mn<0,30 %;
- X9 - Відсоток плавов з S>0,050 %;
- X10 - Відсоток плавов з C≤0,10 %;
- X11 - Відсоток плавов з T > 1640 °C;
- X12 - Відсоток плавов з T < 1600 °C;
- X13 – Середній вміст Fe в шлаку, %;
- X14 – Середній вміст MgO в шлаку, %;
- X15 – Кількість плавов з скрапом, шт.;
- X16 – Кількість торкретувань, разів;
- X17 - Кількість плавов з торкретуванням, %;
- X18 - Кількість азотувань, разів (з плавкою);
- X19 - Кількість плавов з азотуванням, %;
- X20 - Кількість плавов зі скачуванням шлаку, %;
- X21 – Використано плавикового шпату, т.;
- X22 – Навантаження конвертера, плавов/день;
- X23 – Пора року початку експлуатації;
- X24 – Виробник футеровки.

Єдиною залежною змінною виступає Y – стійкість футеровки конвертера, що вимірюється у кількості плавов. У дослідженні бере участь 91 спостереження, що має комплектні дані за усіма змінними.

Розвідувальний аналіз даних починається з оцінки нелінійного зв'язку між факторами та стійкістю футеровки конвертера. Для оцінки використовуємо коефіцієнт детермінації згідно з [13]. Результати зведемо у таблицю 1.

Коефіцієнти детермінації факторів, що впливають на стійкість футеровки

Фактор	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
K _d	0,226	0,152	0,355	0,312	0,334	0,413	0,173	0,265	0,235	0,276	0,33
Фактор	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19	X20	X21	X22
K _d	0,074	0,338	0,342	0,423	0,5	0,253	0,906	0,28	0,294	0,048	0,388

Відмітимо, що фактори X23 та X24 якісні, тому і не включені в таблицю. Їх вплив на результуючу характеристику конвертера буде досліджено окремо.

Пропонується з подальшого розгляду видалити фактори, що повторюють фізичні величини, близькі за сенсом. При цьому визначальним, кого з пари факторів залишити, а кого вилучити, обираємо значення коефіцієнта детермінації. Наприклад, в подальшому з пари факторів X5 та X6 пропонується лишити другий, оскільки вони логічно пов'язані, а X6 має більший вплив на залежну змінну. Користуючись таким підходом з подальшого розгляду також вилучаємо фактори X2, X8, X9, X12, X17 та X19.

При цьому фактори X19 (відсоток плавок з азотуванням) та X2 (середній вміст у чавуні Si, %) відкинуті попри рекомендації щодо їх контролю рядом авторів [2, 3]. За даними досліджень, більше інформації про характер процесів, що відбуваються з плином часу у футеровці конвертера, мають відповідно фактори X18 (кількість азотувань, разів) та X7 (відсоток плавок з Si>0,90). Вони ж мають вищі значення коефіцієнту детермінації.

Щоб виявити вплив категорійних факторів X23 та X24 на результуючу змінну, був виконаний однофакторний дисперсійний аналіз. Для фактора X23 (пора року) виявилось, що погодні умови, коли експлуатується футеровка можуть суттєво впливати на її стійкість. Найкращі показники – при експлуатації влітку, найгірші – навесні та восени. Хоча за тестами Левене та Шапіро-Уїлка залежність має не суттєвий характер, застосування метод Краскела-Уолліса [12] дає підставу вважати, що пора року впливає на стійкість футеровки конвертера, хоча її вплив досить незначний.

Водночас для фактора X24 (виробник футеровки) помітний розкид середніх значень у групах більше 1000 плавок. Суттєвість впливу виробника на стійкість футеровки підтверджується критеріями Фішера та Краскела-Уолліса, який дозволяє нам підстави стверджувати, що виробник футеровки значним чином впливає на стійкість футеровки конвертера.

Надалі для використання факторів X23 та X24 в кількісному вигляді, в кожній групі проведено заміну всіх членів на середнє значення та кожен фактор поділено на найменше середнє значення для збереження відстані між групами.

Важливим етапом розвідувального аналізу даних також є виявлення мультиколінеарності. Проблема мультиколінеарності призводить до нестійкості параметрів моделі, що не дозволяє правильно інтерпретувати внесок кожного фактора в модель[10]. Традиційним способом оцінки мультиколінеарності є аналіз кореляційної матриці (рис. 1).

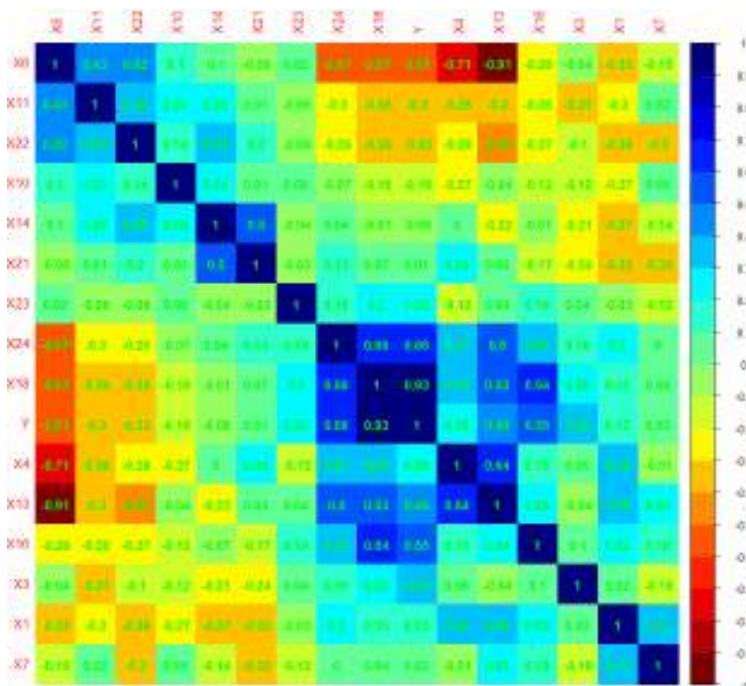


Рисунок 1 – Кореляційна матриця факторів, що лишилися

З рисунка 1 помітно, що існує значна від’ємна кореляція між факторами X6 (Відсоток плавок з основністю < 2,8 од.) та X13 (Середній вміст Fe в шлаку). Це також підтверджує і так званий показник інфляції дисперсій (Variance Inflation Factor, VIF) [12], значення якого для факторів, що лишилися, представлені в таблиці 2, де різко відрізняються значення для X6 та X13.

Таблиця 2

Значення показника інфляції дисперсії

Фактор	X1	X3	X4	X6	X7	X10	X11	X13	X14	X16	X18	X21	X22	X23	X24
VIF	1.96	1.42	3.14	7.4	1.58	1.34	1.9	7.81	2.21	2.16	3.5	1.9	1.77	1.35	1.21

На основі отриманих даних, приймаємо надалі, що до моделей може входити лише одна зі змінних – X6 або X13 – та, що забезпечує краще значення зовнішнього критерію оцінки моделі.

Однією з найважливіших умов при побудові лінійної регресії, є нормальний розподіл залежної змінної. Побудувавши гістограму частот для наших досліджень (рис. 2, а), бачимо, що розподіл має викид, який може сильно впливати на нормальність розподілу. Це підтверджує і тест Шапіро-Уїлка, відхиляючи нульову гіпотезу про те, що розподіл є нормальним. Вирішити дану проблему допомагає видалення двох рядків даних, де значення стійкості футеровки різко відхиляються від решти розподілу (№77 та №91). Після видалення цих двох рядків розподіл стає нормальним, що в подальшому дозволяє будувати множинну лінійну регресію по відношенню до залежної змінної (стійкість футеровки).

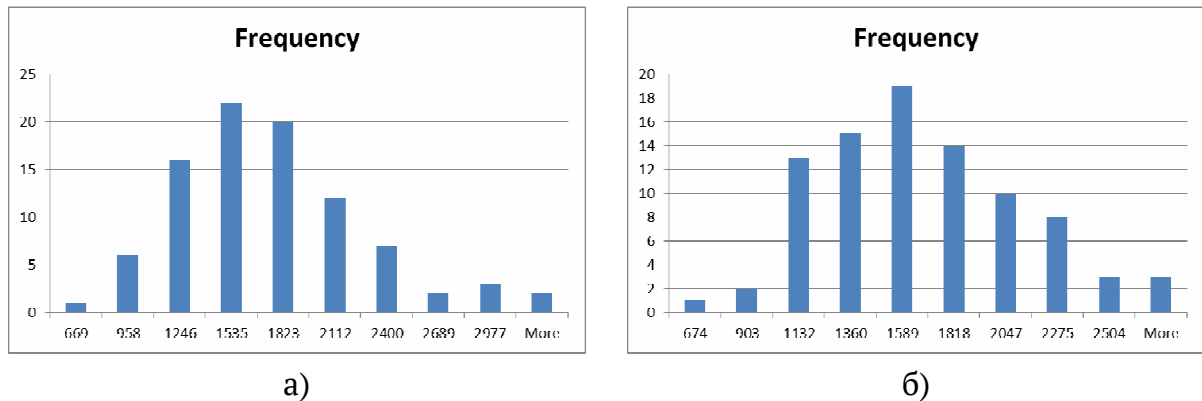


Рисунок 2 – Гістограма розподілу даних стійкості футеровки конвертера:
а) до вилучення викидів; б) після вилучення викидів

Крім викидів у залежній змінній необхідно усунути також і викиди (ряди даних, що суттєво відрізняються) у незалежних змінних. В таблиці 1 та на рисунку 1 помітно, що фактор X18 має високий коефіцієнт кореляції з результуючою змінною Y. Відтак, при побудові множинної лінійної регресії чи моделі методом самоорганізації цей фактор обов'язково буде визначальним. Побудуємо часткову лінійну модель для даного фактора методом найменших квадратів

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X18 \quad (7)$$

Знайдена залежність та її довірчий інтервал наведені на рис. 3, де темним кольором показані спостереження, що різко порушують загальну тенденцію.

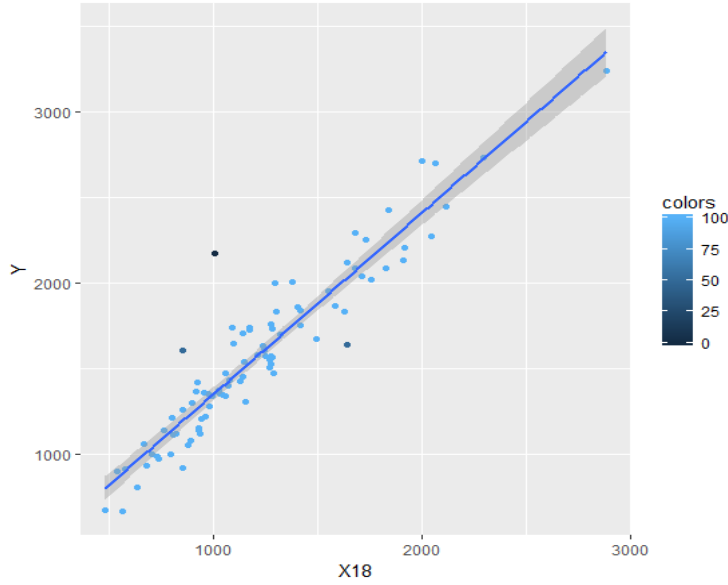
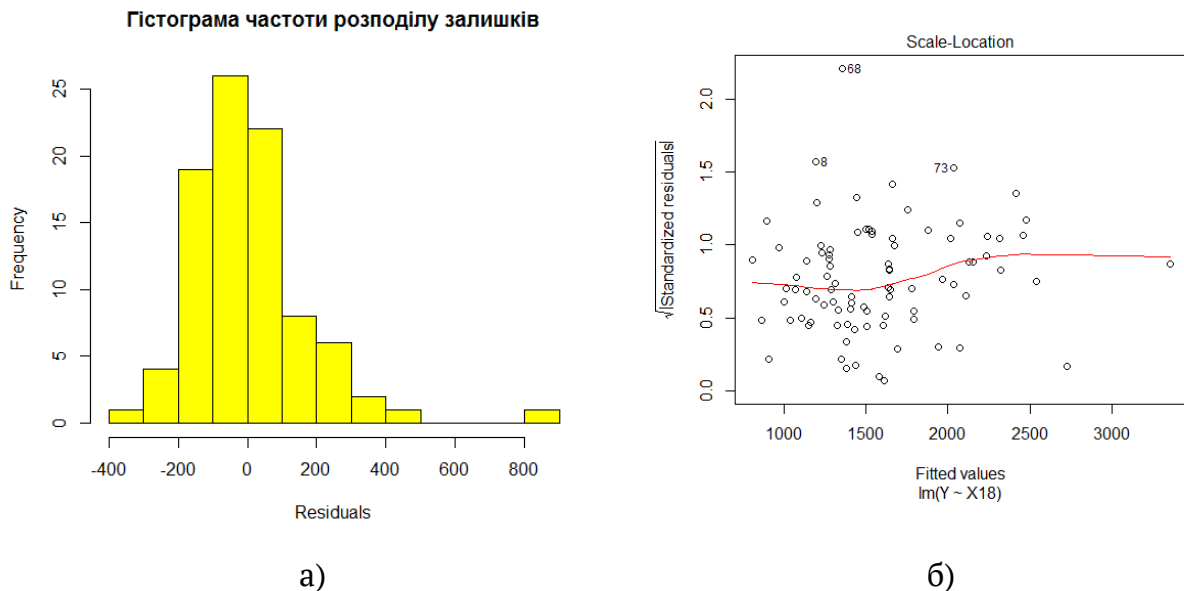


Рисунок 3 – Графічне представлення моделі (7)

На рисунку 4 також можна побачити ці викиди: на гістограмі – у вигляді одиничного спостереження з відхиленням більше 800 одиниць, а на топографічній залежності – у вигляді точки №68, яка відрізняється від математичного очікування моделі більше ніж на 2 середніх квадратичних відхилення. Використовуючи отримані дані, приймаємо, що рядок №68 містить аномальні дані, що спотворюють майбутню модель. Надалі цей рядок не розглядається.



а) б)
Рисунок 4 – Ілюстрація викидів моделі (7):

а) гістограма частоти розподілу залишків моделі; б) графік залежності залишків моделі – різкі викиди підписані номерами досліджень

Для виявлення викидів у решті факторів відобразимо усі данні в координатах першої та другої головної компоненти (рис. 5). Як можна бачити, різко аномальних спостережень у даних не виявлено.

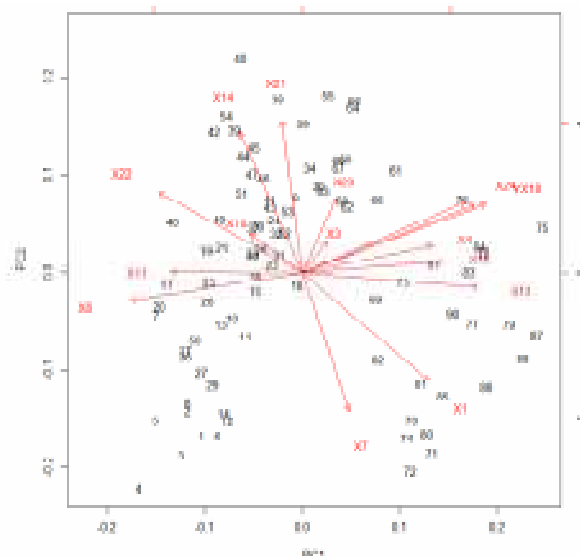


Рисунок 5 – Відображення експериментів у просторі першої та другої головних компонент

Слід відзначити, що перед побудовою моделей стійкості футеровки всі стовпці даних були нормовані і центровані відносно середніх значень, а для запобігання можливому впливу автокореляції перед кожним етапом побудови моделі рядки даних перемішувалися випадковим чином. В підсумку розвідувального аналізу даних до майбутніх моделей були відібрані 15 факторів, серед яких конкурентними є X6 та X13, що мають лінійну кореляцію, і не можуть включатися в модель одночасно.

Для перевірки однорідності отриманих даних було проведено кластерний аналіз методом Уорда [11] з мангеттенівською метрикою відстані між дослідженнями. Результати кластерного аналізу наведені на рисунку 6.

Як видно з рис. 6, в досліджуваних даних є чітко виражені два кластери. Такі ж дані були отримані при кластеризації методом k-середніх з підбором оптимальної кількості кластерів.

Для інтерпретації отриманих кластерів були розраховані перші дві головні компоненти, які пояснюють 44% дисперсії спостережень. Всі не відкинуті на попередньому етапі спостереження в просторі перших двох головних компонент наведені на рисунку 7, де явно помітне розділення спостережень на вищезгадані два кластери. Також на рис. 7 можна бачити, що данні не мають значних викидів.

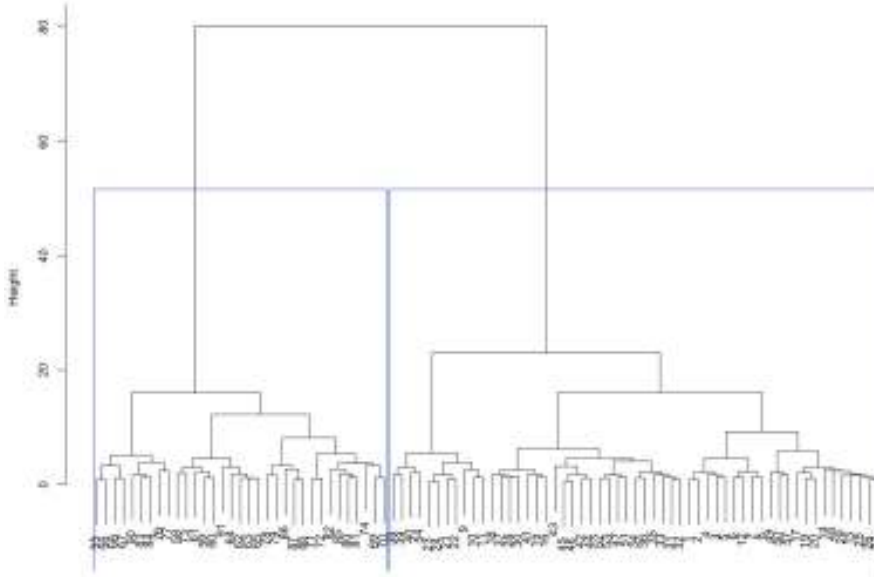


Рисунок 6 – Дендрограма ієрархічного кластерного аналізу методом Уорда

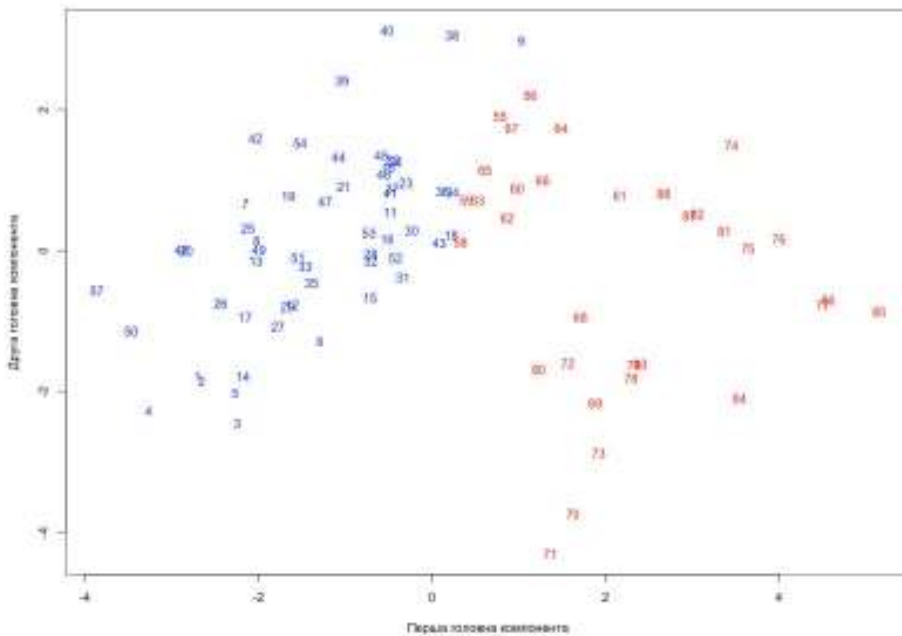


Рисунок 7 – Експериментальні точки у координатах першої та другої головної компоненти та їх розподіл по кластерах

Розподіл експериментальних даних по кластерах на рис. 7 показує, що визначальною є перша головна компонента. Її вираз для нормованих і центрованих даних:

$$Y = 0.43x_{18} + 0.38x_{24} + 0.33x_{16} + 0.33x_{13} + 0.29x_{11} + 0.27x_1 + 0.23x_4 + 0.13x_{10} + 0.13x_{14} + 0.13x_3 + 0.1x_{23} + 0.07x_{21} + 0.07x_7 \quad (8)$$

З вигляду залежності (10) можна побачити, що в першу головну компоненту з високими вагами входять фактори X18, X24, X16, X13, X11, X1 та X4. Проаналізувавши відношення між центрами мас отриманих кластерів, можна побачити, що у другому кластері в порівнянні з першим:

- кількість шлакувань (фактор X18) в середньому більша на 60%;
- серед виробників футеровки (X24) зустрічаються майже виключно «Далмонт», «Майертон» та «Інгкоу»;
- кількість торкретувань (X16) збільшилась в середньому на 43%;
- середній вміст заліза в шлаку (X13) більше в середньому на 13%, що в свою чергу суттєво збільшило і основність шлаку (падіння X6);
- відсоток плавки з перевищенням температури (X11) збільшився в середньому на 20%;
- кількість додувок (X1) в середньому збільшилась на 40%, це пояснює збільшення температури в конвертері;
- кількість сірки (X4) збільшилась на 16% - це пояснює як збільшення температури в конвертері, так і збільшення основності шлаку, оскільки сірку дуже важко переплавити.

Поділ експериментальних даних на кластери дає додаткову інформацію, що дозволяє в подальшому точніше побудувати результуючу прогностичну модель стійкості футеровки. Зокрема, залежність стійкості від вмісту в чавуні сірки (X4) теоретично є зворотно-пропорційною [5]. Водночас на повних даних цю залежність важко помітити, а лінійна регресія навіть має додатний коефіцієнт. Розділивши дані на два кластери методом головних компонент, отримуємо лінійні залежності, що співпадають з теоретичними.

Використовуючи комбінаторний алгоритм покрокового регресійного аналізу на основі методу найменших квадратів [14], для кожного з згаданих кластерів були отримані залежності стійкості футеровки від значимих факторів, що мають вигляд:

- для першого кластера

$$Y = a_0 - a_1x_4 + a_2x_{18} - a_3x_{21} + a_4x_{24} \quad (9)$$

- для другого кластера

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_3 - a_3x_{10} - a_4x_{13} - a_5x_{16} + a_6x_{18} \quad (10)$$

Значення F-статистики для кожного з рівнянь менше 10^{-15} . Величина скопированого R^2 для моделі першого кластера (9) дорівнює 0.9077, а для моделі другого кластера (10) дорівнює 0.9203 відповідно. Обидві моделі повністю відповідають умовам теореми Гауса-Маркова (залишки мають нормальний розпо-

діл, постійну дисперсію та не корельовані), а також містять лише статистично значимі коефіцієнти. Виходячи з цього, надалі приймаємо моделі (9) та (10) в якості оціночних при прогнозуванні стійкості футеровки.

Аналізуючи отриманий результат, легко помітити, що моделі суттєво відрізняються, спираючись лише на один спільний фактор, а саме – позитивний вплив кількості азотувань (X_{18}). Для практичного ж застосування моделей (9)-(10) необхідно спочатку вірно ідентифікувати кластер, в який попадає поточна сесія роботи футеровки, а потім скористатися відповідною моделлю.

В якості альтернативного підходу було отримано множинну лінійну регресію для стійкості футеровки без урахування кластерів, яка має вигляд

$$Y = a_0 + a_1x_3 + a_2x_{11} - a_3x_{13} - a_4x_{14} + a_5x_{18} + a_6x_{21} + a_7x_{24}. \quad (11)$$

Залежність (11) також має нормальний розподіл залишків, їх постійну дисперсію, відсутність автокореляції та відсутність викидів, що спотворюють прогнозне значення. Для неї $R^2=0,914$.

Інтерпретуючи модель (11) можемо відмітити, що на стійкість футеровки має сильний позитивний вплив кількість марганцю у чавуні, негативно впливає кількість заліза та оксиду марганцю в шлаку, значно позитивно впливає кількість азотувань та незначним чином впливає марка її виробника.

Попри простоту та універсальність отриманої моделі (11), вона, як було зазначено вище, не враховує взаємний вплив факторів, а також суттєву не лінійність, з якою, як було показано в таблиці 1, фактори впливають на досліджувану характеристику.

Як альтернативну модель прогнозування стійкості футеровки пропонується отримана шляхом самоорганізації модель за методом групового урахуванням аргументів. В якості опорної функції використаємо модель другого порядку (6), що на відміну від традиційних (3) дозволяють від'ємні ступені вхідних змінних.

В якості внутрішнього критерію вибору часткових моделей використаємо критерій Акаїке (5), що обмежує кількість параметрів моделі. Для вибору найкращих моделей в кожному ряду селекції використаємо зовнішній критерій стандартної перехресної перевірки, що більш вимогливий ніж класичний зовнішній критерій регулярності (4), запропонований автором метода.

З урахуванням викладеного, була отримана модель наступного вигляду

$$Y = a_0 + a_1V_1 + a_2V_2 - a_3V_2 / V_1, \quad (12)$$

де

$$\begin{cases} V_1 = a_5U_1 + a_6U_2, \\ V_2 = a_7U_3 - a_8/U_4 - a_9/U_3^2, \\ U_1 = a_{10} + a_{11}/x_7 + a_{12}x_{18} - a_{13}x_7x_{18}, \\ U_2 = a_{14} + a_{15}x_3 + a_{16}x_{18} + a_{17}x_3x_{18}, \\ U_3 = a_{18} + a_{19}x_6 + a_{20}x_{18} - a_{21}x_{18}^2, \\ U_4 = a_{22} + a_{23}x_{11} + a_{24}x_{18} - a_{25}x_{18}^2. \end{cases} \quad (13)$$

Загалом після підстановки і приведення подібних моделей має 77 дійсних коефіцієнтів та спирається на п'ять факторів: X3, X6, X7, X11 та X18. Останній входить до моделі декілька разів в різних ступенях, що свідчить про наявність сильної нелінійної залежності.

Модель (12)-(13) в порівнянні з моделями (11) та (9)-(10) було оцінено за рядом критеріїв, що ілюструє таблиця 3, у якій використані наступні позначення: N – кількість членів апроксимаційного поліному (коефіцієнтів, що відновлюються); R2 – коефіцієнт детермінації (між прогнозованими та реальними значеннями стійкості футеровки); SD – середня квадратична відносна похибка апроксимації; CVcrit – критерій крос-перевірки розрахований на основі оцінки стандартного відхилення; F-statistic – р-значення F-статистики Фішера; Ramsey test – р-значення тесту Ремзі.

Таблиця 3

Порівняння прогнозуючих моделей

	N	R2	SD	CV _{crit}	F-statistic	Ramsey test
Модель (9)-(10)	33	0.9313	0.0687	0.2212405	<2.2e-16	0.6619
Модель (11)	8	0.9143	0.0547	0.2589467	<2.2e-16	0.9719
Модель (12)-(13)	71	0.9393	0.0607	0.1992020	<2.2e-16	0.2518

З таблиці 3 ми можемо побачити, що за даними зовнішнього критерію крос-перевірки найкраща модель – це (12)-(13), яка водночас є найгіршою з точки зору кількості коефіцієнтів, які необхідно відновити і враховувати. Водночас якщо при виборі моделі опиратись на внутрішні критерії регулярності (детермінацію та помилку) то найкращою моделлю є найпростіша (11). При цьому за значеннями F-статистики та тесту Ремзі для усіх моделей можна відхилити нульову гіпотезу про не значимість регресії та водночас гіпотезу, про те що в моделях не вистачає регресорів.

Відтак, можна побачити, що всі побудовані моделі адекватно описують реальний процес. У зв'язку з невеликою різницею між оцінками, розраховани-

ми за критеріями регулярності, Акаїке та стандартної перехресної перевірки у всіх моделях авторами для оціночного прогнозування стійкості футеровки рекомендується використання лінійної моделі, побудованої за допомогою комбінаторного алгоритму покрокового регресійного аналізу (11), через її простоту та легкість інтерпретації. Водночас комплексна модель, отримана за МГУА, може бути застосована для більш тонкого аналізу впливу окремих факторів на усталений режим роботи футеровки.

Висновки і рекомендації. В ході виконання даної роботи було розглянуто один з найбільш тривалих процесів у металургії – процес зношування футеровки конвертера. Остання може витримувати тисячі плавок, кожна з яких, в свою чергу тим чи іншим чином впливає на термін служби футеровки.

З широкого набору факторів, що фіксуються на обраному об'єкті дослідження – конвертерному цеху ПАТ «ДМЗ» – в ході розгляду 91 сесій роботи футеровок (загальний час роботи – 7 років, більше 145 тисяч плавок) було визначено 15 статистично значимих факторів, з яких 13 числові та 2 категорійні. Два з числових факторів мають сильну взаємну кореляцію і не можуть застосовуватись в моделях прогнозування стійкості футеровки одночасно.

При виконанні аналізу експериментальних даних три з 91 дослідження були відкинуті, як такі що містять викиди в залежній змінній та у впливовому факторі. Решта експериментальних досліджень за допомогою методу Уорда поділені на два кластери, в яких визначені значно відмінні між собою експериментальні результати. Останнє може бути пов'язано з людським фактором, а саме зі зміною оператора конвертерного цеха, який керував плавками. Встановлені ключові відмінності між кластерами.

Для кожного з кластерів отримана статично значима регресійна модель прогнозування стійкості футеровки на основі внутрішнього критерію мінімуму складності та зовнішньому критерію регулярності. Моделі перевірені на коректність та незміщеність оцінок.

Також з використанням методу найменших квадратів на основі внутрішнього та зовнішнього критеріїв отримана універсальна модель множинної лінійної регресії, що описує залежність стійкості футеровки від шести значимих факторів з коефіцієнтом R^2 більше 0,9. Залишки моделі мають нормальний розподіл, їх дисперсія умовно постійна.

В якості альтернативної моделі для прогнозування стійкості футеровки пропонується модель, отримана шляхом самоорганізації, що використовує опорну функцію з припустимими від'ємними ступенями аргументів. В якості

внутрішнього критерію вибору часткових моделей використовуємо критерій Акаїке, для вибору найкращих моделей – зовнішній критерій стандартної перехресної перевірки. Отримана таким чином модель має 77 дійсних коефіцієнтів та спирається на п'ять факторів, серед яких кількість азотувань входить до моделі декілька разів в різних ступенях, що свідчить про наявність сильної нелінійної залежності.

У зв'язку з високими оцінками всіх отриманих моделей за критеріями регулярності, Акаїке та стандартної перехресної перевірки, надалі для оціночного прогнозування стійкості футеровки рекомендується використання моделі множинної лінійної регресії. Водночас комплексна модель, отримана за МГУА, може бути застосована для більш тонкого аналізу впливу окремих факторів на усталений режим роботи футеровки.

Авторами пропонується використання отриманих моделей для оціночного прогнозування стійкості футеровки конвертерів в складі інтегрованої системи керування металургійним підприємством. Отримані моделі можуть застосовуватися в підсистемі підтримки прийняття рішень оператором конвертера для формування порад щодо збільшення тривалості роботи поточної футеровки.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Пантейков С.П. Анализ мирового развития и современное состояние технологий ошлакования футеровки кислородных конвертеров / С.П. Пантейков // Черная металлургия. – №6 – 2013. – с. 65-78.
2. Смирнов А.Н. Оптимизация показателей стойкости и снижение затрат на футеровку конвертера / А. Н. Смирнов, К. Е. Писмарев, А. А. Сердюков, А. Ф. Тонкушин, К. Н. Шарандин // Металл и литье Украины. – №11(222) – 2011. – с. 24-28.
3. Bock M. Metallurgy and Lining Life in Basic Oxygen Converters / Manfred Bock, Christian Oehler // Millenium Steel. – 2006. – p. 103-109. URL: <http://docshare02.docshare.tips/files/4454/44544273.pdf> Дата доступу: 23.08.2020.
4. Желдак Т.А. Використання технології OLAP для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Т.А. Желдак // Праці VII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2014. – с. 105-106.
5. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотський, П.С. Харлашин. – Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.

6. Шибко А.В. Влияние скачивания шлака на показатели работы 60-тонных конвертеров верхнего кислородного дутья / А.В. Шибко, В.И. Пищида, А.С. Заспенко, С.М. Онацкий, В.И. Шпак, К.Ф. Чмырков // *Металлургическая и горно-рудная промышленность.* – 3(268) – 2011. – с.17-18.
7. Антоненко Н.А. Використання штучної нейронної мережі для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Антоненко Н.А., Т.А. Желдак // *Праці VIII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень».* – Ужгород, УжНУ, 2016. – с. 30-31.
8. Зінченко О.В. Побудова регресійної моделі стійкості футеровки кисневого конвертера / О.В. Зінченко, Т.А. Желдак // *Матеріали міжнар. конф. «Комп’ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)».* – Київ, КНУ, 2017. – с. 232-233.
9. Желдак Т.А. Застосування зворотних залежностей у математичних моделях складних об’єктів та систем/ Т.А. Желдак // *Системні дослідження та інформаційні технології*, 2012, №3. – с.95-106.
10. Антоненко Н.А. Використання методу групового врахування аргументів для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Н.А. Антоненко, Т.А. Желдак // *Матеріали міжнар. конф. «Комп’ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)».* – Київ, КНУ, 2017. – с. 193-194.
11. Снитюк В.Є. Прогнозування. Моделі. Методи. Алгоритми : навч. посіб. / В.Є. Снитюк. – К.: Маклаут. – 2008. – 364 с.
12. Мاستицкий С.Э. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. / С.Э. Мاستицкий, В.К. Шитиков // Москва: ДМК-Пресс. – 2014. – 496 с.
13. Бахрушин В.Е. Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей / В.Е. Бахрушин // *Системные технологи* – 2(73) – 2011. – с. 9-14.
14. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ 3-е изд. / Н. Дрейпер, Г. Смит [Пер. с англ.] – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2007. – 912 с.: ил.

REFERENCES

1. Panteykov S.P. Analysis of world development and the current state of technologies for slag lining of oxygen converters / S.P. Panteykov // *Ferrous metallurgy.* - №6 - 2013. - p. 65-78.
2. Smirnov A.N. Optimization of durability indicators and reduction of costs for converter lining / A.N. Smirnov, K.E. Pismarev, A.A. Serdyukov, A.F. Tonkushin, K.N. Sharandin // *Metal and Foundry of Ukraine.* - №11 (222) - 2011. - p. 24-28.

3. Bock M. Metallurgy and Lining Life in Basic Oxygen Converters / Manfred Bock, Christian Oehler // Millennium Steel. - 2006. - p. 103-109. URL: <http://docshare02.docshare.tips/files/4454/44544273.pdf> Access date: 23.08.2020.
4. Zheldak T.A. Using OLAP technology to predict the stability of the converter lining / T.A. Zheldak // Proceedings of the VII International School-Seminar "Decision Theory". - Uzhhorod, Uzhhorod National University, 2014. - p. 105-106.
5. Boychenko B.M. Converter steel production: theory, technology, steel quality, unit designs, material recycling and ecology / B.M. Boychenko, V.B. Okhotsky, P.S. Kharlashin. - Dnipropetrovsk: RVA "Dnipro-VAL", 2006. - 454 p.
6. Shibko A.V. Influence of slag download on the performance of 60-ton converters with the upper oxygen blast / A.V. Shibko, V.I. Pischyda, A.S. Zaspenko, S.M. Onatsky, V.I. Shpak, K.F. Chmyrkov // Metallurgical and mining industry. - 3 (268) - 2011. - p.17-18.
7. Antonenko N.A. The use of an artificial neural network to predict the stability of the lining of the converter / N.A. Antonenko, T.A. Zheldak // Proceedings of the VIII International School-Seminar "Decision Theory". - Uzhhorod, Uzhhorod National University, 2016. - p. 30-31.
8. Zinchenko O.V. Construction of a regression model of oxygen converter lining stability / O.V. Zinchenko, T.A. Zheldak // Materials of the International. conf. "Computer intelligence (results, problems and prospects)". - Kyiv, KNU, 2017. - p. 232-233.
9. Zheldak T.A. Application of inverse dependences in mathematical models of complex objects and systems / T.A. Zheldak // System research and information technologies, 2012, №3. - p.95-106.
10. Antonenko N.A. Using the group method of data handling for predicting the stability of the converter lining / N.A. Antonenko, T.A. Zheldak // Materials of the International. conf. "Computer intelligence (results, problems and prospects)". - Kyiv, KNU, 2017. - p. 193-194.
11. Snytyuk V.E. Forecasting. Models. Methods. Algorithms: textbook / V.E. Snytyuk. - Kyiv: McLouth. - 2008. - 364 p.
12. Mastitskiy S.E. Statistical analysis and visualization of data with R. / S.E. Mastitskiy, B.K. Shitikov // Moscow: DMK-Press. - 2014. - 496 p.
13. Bakhrushin V.E. Methods for estimating the characteristics of nonlinear statistical relations / V.E. Bakhrushin // System technologies - 2 (73) - 2011. - p. 9-14.
14. Draper N. Applied regression analysis 3rd ed. / N. Draper, G. Smith [russian transl.] - Moscow.: Williams Publishing House, 2007. - 912 p.

Received 10.11.2020.
Accepted 13.11.2020.

Системний аналіз факторів, що визначають стійкість футеровки конвертера та побудова прогнозуючої моделі

В ході виконання даної роботи було розглянуто процес зношування футеровки конвертера. Остання може витримувати тисячі плавов, кожна з яких тим чи іншим чином впливає на термін служби футеровки. Було вивчено досвід 91 сесії роботи футеровок за сім років (загалом – більше 145 тисяч плавов). Метою дослідження є розробка сімейства моделей залежностей стійкості футеровки конвертера від відомих технічних та технологічних чинників, задля подальшого надання рекомендацій щодо ведення виробничого процесу.

З широкого набору факторів, що фіксуються на обраному об'єкті дослідження визначено 15 статистично значимих факторів, з яких 13 числові та 2 категорійні. Два з числових факторів мають сильну взаємну кореляцію і не можуть застосовуватись в моделях прогнозування одночасно. При виконанні аналізу експериментальних даних три з 91 дослідження були відкинуті, оскільки містять викиди. Решта даних за допомогою методу Уорда поділені на два кластери, в яких визначені значно відмінні між собою експериментальні результати.

Для кожного з кластерів отримана статично значима регресійна модель прогнозування стійкості футеровки на основі внутрішнього критерію мінімуму складності та зовнішньому критерію регулярності. Також з використанням методу найменших квадратів на основі внутрішнього та зовнішнього критеріїв отримана універсальна модель множинної лінійної регресії, що описує залежність стійкості футеровки від шести значимих факторів з коефіцієнтом R^2 більше 0,9. Залишки моделі мають нормальний розподіл, їх дисперсія умовно постійна.

В якості альтернативи пропонується модель, що використовує опорну функцію з припустимими від'ємними ступенями аргументів, отримана шляхом самоорганізації. В якості внутрішнього критерію вибору часткових моделей використаний критерій Акаїке, а для вибору найкращих моделей – зовнішній критерій стандартної перехресної перевірки. Отримана альтернативна модель має 77 дійсних коефіцієнтів та спирається на п'ять факторів.

У зв'язку з високими оцінками всіх отриманих моделей за статистичними критеріями надалі для оціночного прогнозування стійкості футеровки рекомендується використання моделі множинної лінійної регресії. Водночас комплексна модель, отримана за МГУА, може бути застосована для більш тонкого аналізу впливу окремих факторів на усталений режим роботи футеровки.

Пропонується використання отриманих моделей в складі інтегрованої системи керування металургійним підприємством, а саме в підсистемі підтримки прийняття рішень оператором конвертера для формування порад щодо збільшення тривалості роботи поточної футеровки.

System analysis of the factors determining the stability of the converter lining and the predictive model construction

In the course of this work, the process of wear of the converter lining was considered. The latter can withstand thousands of smeltings, each of which, in one way or another, affects the service life of the lining. The experience of 91 sessions of lining work for seven years was studied (in total - more than 145 thousand smeltings). The purpose of the study is to develop a family of

models of dependencies of the stability of the converter lining from known technical and technological factors to further provide recommendations for the production process.

From a wide range of factors recorded on the selected object of study, 15 statistically significant factors were identified, and 13 of them were numerical, and 2 were categorical. Two of the numerical factors have a strong correlation and cannot be used in forecasting models at the same time. In the analysis of experimental data, three of the 91 studies were rejected because they contain emissions. The rest of the data using the Ward's method are divided into two clusters, in which significantly different experimental results are identified.

For each of the clusters, a statically significant regression model for predicting the stability of the lining based on the internal criterion of minimum complexity and the external criterion of regularity was obtained. Also, using the method of least squares based on internal and external criteria, a universal model of multiple linear regression is obtained, which describes the dependence of the stability of the lining on six significant factors with a coefficient R^2 greater than 0.9. The remnants of the model have a normal distribution, and their variance is relatively constant.

Alternatively, a model using a self-organizing reference function with allowable negative degrees of arguments is proposed. The Akaike criterion was used as an internal criterion for the selection of partial models, and the external criterion of standard cross-validation was used to select the best models. The resulting alternative model has 77 real coefficients and is based on five factors.

Due to the high estimates of all obtained models according to statistical criteria in the future, it is recommended to use the multiple linear regression model to estimate the stability of the lining. At the same time, the complex model obtained by GMDH can be used for a more subtle analysis of the influence of individual factors on the established mode of operation of the lining.

It is proposed to use the obtained models as part of an integrated management system of a metallurgical enterprise, namely in the decision support subsystem of the converter operator to form advice on increasing the duration of the current lining.

Желдак Тімур Анатолійович – к.т.н., доцент, зав. каф. системного аналізу та управління Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

Антоненко Нікіта Андрійович – магістр з системного аналізу, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Желдак Тимур Анатольевич – к.т.н., доцент, зав.каф. системного анализа и управления Национального технического университета «Днепровская политехника».

Антоненко Никита Андреевич - магистр системного анализа, Национальный технический университет «Днепровская политехника».

Zheldak Timur Anatoliyovych - candidate of technical sciences, associate professor, Head of the Systems analysis and control department of the Dnipro University of Technology.

Antonenko Nikita Andreevich - Master of systems analysis, Dnipro University of Technology.