

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
«ІНСТИТУТ ПРОМИСЛОВИХ ТА БІЗНЕС ТЕХНОЛОГІЙ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШАРАНДІН КИРИЛО МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 669.184.125.046.58.001

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ
ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ФУТЕРІВКИ КОНВЕРТЕРА
З ВИКОРИСТАННЯМ МАГНЕЗІАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ
ВІТЧИЗНЯНОЇ СИРОВИНИ**

Спеціальність 05.16.02. – «Металургія чорних
і кольорових металів та спеціальних сплавів»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ /К. М. Шарандін/

Науковий керівник:

Смірнов Олексій Миколайович

доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2024

АНОТАЦІЯ

Шарандін К.М. Розробка і впровадження ресурсозберігаючої технології підвищення стійкості футерівки конвертера з використанням магнезійних матеріалів на основі вітчизняної сировини

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». Інститут промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вивченню і розвитку наукових уявлень про особливості ведення конвертерної плавки за умови періодичного нанесення гарнісажу на робочий шар футерівки, динаміки формування робочого шлаку на основі магнезитових відходів, а також періодичного гарячого ремонту методом підварювання саморозтічними магнезійними масами.

Робота є комплексним дослідженням, що ґрунтується на використанні розроблених унікальних методів фізичного моделювання та сучасних методик математичного моделювання. Адекватність створених моделей підтверджується співвідношенням результатів математичного, фізичного моделювання та теоретичних досліджень з промисловими експериментами нанесення гарнісажу і підварювання місць локального зносу футерівки конвертера.

Основний зміст дисертаційної роботи.

У ході дисертаційної роботи поставлені та вирішені такі основні задачі:

- проаналізовано основні рішення в частині підвищення стійкості робочого шару футерівки конвертера, що використовуються в промисловості.
- вивчено основні методи та прийоми ремонту робочого шару футерівки конвертера;
- розроблено фізичну модель для вивчення гідродинаміки рідкої ванни конвертера (масштаб 1:6);

- досліджено особливості перемішування рідкої ванни конвертера під час продування;
- розроблено фізичну модель для вивчення ефекту нанесення гарнісажного покриття в конвертері (масштаб 1:20);
- визначено вплив фракційного і хімічного складу флюсу на ефективність нанесення гарнісажного покриття;
- розроблено методики оцінки фізико-хімічних властивостей модифікованого шлаку та гарнісажного покриття;
- встановлено взаємозв'язок між гранулометричним складом твердих частинок і в'язкістю шлаку, що використовується для набризкування шлаку;
- розроблено методику гарячого моделювання процесу підварювання футерівки конвертера саморозтічними масами;
- розроблено методику оцінки фізико-хімічних властивостей підварювального конгломерату;
- досліджено можливість використання для виробництва флюсів-модифікаторів і саморозтічної ремонтної маси вторинних матеріалів на основі магнезиту;
- розроблено основні технологічні прийоми виробництва магнезійних флюсів-модифікаторів і саморозтічних мас для конвертерів;
- досліджено ефективність розроблених флюсів-модифікаторів і саморозтічних мас у промислових умовах для нанесення гарнісажу та підвищення стійкості футерівки конвертерів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступних положеннях:

1. Отримали подальший розвиток наукові уявлення про характер перемішування рідкої ванни в конвертерах з комбінованим продуванням. Встановлено, що в діапазоні розташування донних фурм 0,4R - 0,66R має місце накладення потоків один на другий, що тягне за собою їх взаємне ослаблення. У діапазоні 0,66R - 0,9R – взаємний вплив різноспрямованих потоків зменшується та при положеннях 0,7R - 0,74R приймає мінімальне

значення. Це створює додаткові передумови для ефективного перемішування рідкого обсягу ванни. Подальше переміщення фурм від центру до периферії (0,74R - 0,8R) виводить зустрічні потоки верхнього і нижнього продування з зони спільної взаємодії. Наближення донних фурм до конічної частини днища тягне за собою ослаблення циркуляції рідини в «центральному» обсязі ванни.

2. Вперше показано, що наростання гарнісажного шару більшою мірою характерно для зони стику нижнього конуса і циліндричної частини конвертера, а також для зони цапф. Визначено режими роздування, що забезпечують рівномірність нанесення покриття в зонах підвищеного ерозійного зносу. Встановлено, що при постійній витраті вдувного азоту і його тиску в магістралі ($Q_{г.} = 480 \text{ м}^3/\text{хв}$, а $P_{г.} = 16 \text{ ат}$) маса гарнісажного покриття екстремально залежить від висоти положення фурми. Максимальній кількості нанесеного гарнісажу відповідає діапазон положення фурми в 1,3-1,7 м над рівнем шлакової ванни. При цьому об'ємна частка диспергованої твердої фракції в обсязі шлаку, у кількості 6-7%, забезпечує максимальну «ефективну витрату» гарнісажу, при інших рівних умовах.

3. Встановлено, що з підвищенням кількості диспергованої твердої (нерозчиненої) фази у шлаці його в'язкість зростає. При досягненні концентрації 7-9% «зернової» фази шлак має «задовільну» в'язкість для виконання операції набризкування. А зі збільшенням кількості «зерен» до 10% і більше спостерігається різке підвищення в'язкості пов'язане з інтенсивною гетерогенізацією розплаву.

4. Показано, що основними параметрами, що визначають змочування, є вміст (FeO) і (MgO) у шлаці. Так, при вмісті (FeO) більше 25% кут змочування при вмісті MgO 7-8% досягає менше 30 °. При зниженні вмісту FeO кут змочування збільшується і при наближенні до 13-15% становить ~ 75-85 °. Подальше зниження концентрації FeO призводить до збільшення кута змочування понад 90 °, при цьому змочування різко погіршується. Збільшення в шлаці вмісту MgO, викликає погіршення змочування периклазовуглецевого

матеріалу, причому ступінь підвищення кута θ сильно залежить від окислення шлаку.

5. Вперше сформульовано концептуальний підхід до хіміко-гранулометричних параметрів модифікаторів, що дозволяють забезпечити цілеспрямоване управління фізико-хімічними властивостями кінцевого конвертерного шлаку. Наявність у магнезійному брикеті важкорозчинних компонентів у кількості 60 - 65% (мас.), з яких щонайменше 80%, мають фракцію 2-6 мм, забезпечують необхідний обсяг «зернового» наповнювача і формування арматурного «скелета» в охоложеному гарнісажі. При цьому легкорозчинний, дрібнодисперсний, магнезійний компонент, взятий у кількості 40 - 45% (мас.) насичує шлак оксидом магнію до рівня 7-8%, вже в перші секунди процесу роздування.

Практичне значення отриманих результатів:

Практичне значення мають запропоновані та впроваджені в технологічний процес рекомендації щодо вибору флюсів для формування гарнісажу для нанесення на робочу поверхню футерівки конвертера і параметрів нанесення гарнісажу, а також вибору компонентів флюсу, в тому числі з відходів магнезійних виробів.

Застосування розроблених флюсів дозволяє підвищити стійкість футерівки конвертера, мінімізувати питомі витрати імпортованих вогнетривів на основі магнезиту, а також підвищити продуктивність конвертера.

Розроблені технологічні рекомендації забезпечують підвищення стійкості робочого шару футерівки конвертера і, відповідно, зменшують питому витрату вогнетривів у середньому на 1,2 - 3,5 кг/т сталі.

Дослідно-промислові випробування розроблених магнезійних флюсів виконані в умовах конвертерних цехів металургійних комбінатів ПрАТ «МК «Азовсталь» і ПАТ «Алчевський МК». Економічний ефект від використання магнезійних модифікаторів для гарнісажного покриття становить 0,24-0,95USD/т сталі.

Практичне значення мають запропоновані та впроваджені в технологічний процес рекомендації щодо вибору магнезійних, саморозтічних, підварювальних мас для гарячого ремонту зон випереджаючого (локального) зносу футерівки конвертера.

Застосування розроблених вітчизняних саморозтічних мас дозволяє практично повністю мінімізувати залежність підприємств від імпортних аналогів, підвищити стійкість футерівки агрегатів і їх продуктивність, а також знизити питомі витрати вогнетривів на 0,003 - 0,01 кг/т сталі.

Дослідно-промислові випробування розроблених магнезійних саморозтічних підварювальних мас виконано в умовах конвертерних цехів металургійних комбінатів ПрАТ «КаметСталь» і ПрАТ «МК «Азовсталь». На даний час підварювальна маса марки «GIR-RBX-DMK» використовується в промислових умовах конвертерного цеху ПрАТ «КаметСталь» на постійній основі. Загальний економічний ефект від використання ремонтної маси становить 0,01 USD/тн за рахунок оптимізації технології, високої стійкості і конкурентної вартості.

Запропоновані автором методики та принципи тестування властивостей флюсів, гарнісажних шлаків, властивостей підварювальних мас і їх експлуатаційних властивостей можуть бути використані на різних металургійних підприємствах, у тому числі і при створенні нових видів вогнетривких матеріалів для високопродуктивних конвертерів у великих сталеплавильних цехах, а також в навчальному процесі на металургійних факультетах технічних університетів.

Ключові слова: конвертер, футерівка, випереджаючий знос, гарячий ремонт, набризкування шлаку, магнезійні флюси модифікатори, підварювання, саморозтічна маса, питомі витрати.

ANNOTATION

Sharandin K.M. Development and implementation of a resource-saving technology for increasing the stability of the converter lining using magnesium materials based on domestic raw materials

The thesis for the degree of Doctor of Philosophy (Ph.D.) by specialty 05.16.02 - "Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys. Institute of industrial and business technologies Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro, 2024.

The dissertation work is devoted to the study and development of scientific ideas about the features of BOF process under the condition of periodic application of slag splashing on the working layer of the lining, the dynamics of the formation of working skull based on magnesite waste, as well as periodic hot repair with self-flowing magnesium masses.

The work is a complex study based on the use of developed unique methods of physical modeling and modern methods of mathematical modeling. The adequacy of the created models is confirmed by the correlation of the results of mathematical, physical modeling and theoretical studies with industrial experiments of applying slag splashing technology and hot repair the places of local wear of the converter lining.

The main content of the thesis.

In the course of the dissertation work, the following main tasks were set and solved:

- the main solutions in terms of increasing the stability of the working layer of the converter lining, which are used in industry, are analyzed.
- the basic methods and techniques of repairing the working layer of the converter lining were studied;
- a physical model was developed to study the hydrodynamics of the liquid bath of the converter (scale 1:6);
- the peculiarities of the mixing of the liquid bath of the converter during blowing were investigated;

- a physical model was developed to study the effect of applying the garnish coating in the converter (scale 1:20);
- the influence of the fractional and chemical composition of the flux on the efficiency of slag splashing technology was determined;
- methods of assessment of physico-chemical properties of modified slag and skull coating were developed;
- the relationship between the granulometric composition of solid particles and the viscosity of the slag used for slag splashing was established;
- a method of hot modeling of the process of hot repair of the lining of the converter with self-flowing masses was developed;
- a methodology for assessing the physical and chemical properties of the hot repairing conglomerate has been developed;
- the possibility of using secondary materials based on magnesite for the production of modifier fluxes and self-flowing repair mass was investigated;
- the main technological techniques for the production of magnesium fluxes-modifiers and self-flowing masses for converters were developed;
- the efficiency of the developed modifier fluxes and self-flowing masses in industrial conditions for applying garnish and increasing the stability of the lining of converters was investigated.

The scientific novelty of the obtained results lies in the following paragraphs:

1. Scientific ideas about the nature of liquid bath mixing in converters with combined blowing have received further development. It was established that in the range of the location of the bottom lances $0,4R - 0,66R$ there is an overlap of flows, which entails their mutual weakening. In the range of $0,66R - 0,9R$ - the mutual influence of multidirectional flows decreases and at the positions of $0,7R - 0,74R$ takes a minimum value.

This creates additional prerequisites for effective mixing of the liquid volume of the bath. Further movement of the lances from the center to the periphery ($0,74R - 0,8R$) removes the opposing flows of the upper and lower blowing from the zone of

joint interaction. The approach of the bottom nozzles to the conical part of the bottom entails a weakening of the liquid circulation in the "central" volume of the bath.

2. For the first time, it is shown that the growth of the skull layer is more typical for the zone of the junction of the lower cone and the cylindrical part of the converter, as well as for the trunnion zone. Inflating modes ensuring uniformity of coating in areas of increased erosive wear have been determined. It was established that at a constant flow of blown nitrogen and its pressure in the pipeline ($Q_g = 480 \text{ m}^3/\text{min}$, and $P_g = 16 \text{ atm}$) the mass of the garnish coating is extremely dependent on the height of the lance position. The range of the position of the lance in 1,3-1,7 m above the level of the slag bath corresponds to the maximum amount of applied garnish. At the same time, the volume fraction of the dispersed solid fraction in the volume of slag, in the amount of 6-7%, ensures the maximum "effective consumption" of the skull, other things being equal.

3. It was established that with an increase in the amount of dispersed solid (insoluble) phase in the slag, its viscosity increases. When a concentration of 7-9% of the "grain" phase is reached, the slag has a "satisfactory" viscosity for the splashing operation. And with an increase in the number of "grains" up to 10% or more, a sharp increase in viscosity is observed due to intense heterogenization of the melt.

4. It is shown that the main parameters determining wetting are the content of (FeO) and (MgO) in the slag. Thus, when the (FeO) content is more than 25%, the wetting angle at the MgO content of 7-8% reaches less than 30° . When the FeO content decreases, the wetting angle increases and when it approaches 13-15%, it becomes $\sim 75-85^\circ$. A further decrease in the concentration of FeO leads to an increase in the wetting angle above 90° , while the wetting deteriorates sharply. An increase in the MgO content in the slag causes a deterioration of the wetting of the periclase-carbon material, and the degree of increase in the angle θ strongly depends on the oxidation of the slag.

5. For the first time, a conceptual approach to the chemical and granulometric parameters of the modifiers was formulated, allowing to provide purposeful management of the physical and chemical properties of the final converter slag. The presence of poorly soluble components in the magnesium

briquette in the amount of 60 - 65% (by weight), of which at least 80% have a fraction of 2-6 mm, provide the necessary volume of "grain" filler and the formation of the reinforcing "skeleton" in the cooled skull. At the same time, the easily soluble, finely dispersed, magnesium component, taken in the amount of 40-45% (by mass), saturates the slag with magnesium oxide to the level of 7-8%, already in the first seconds of the splashing process.

Practical significance of the obtained results:

The recommendations proposed and implemented in the technological process regarding the selection of fluxes for the formation of skull for applying to the working surface of the converter lining and the parameters of applying the skull, as well as the selection of flux components, including from waste magnesium products, are of practical importance.

The use of the developed fluxes makes it possible to increase the stability of the converter lining, minimize the specific costs of imported refractories based on magnesite, and also increase the performance of the converter.

The developed technological recommendations provide an increase in the stability of the working layer of the converter lining and, accordingly, reduce the specific consumption of refractories by an average of 1,2 – 3,5 kg/t of steel.

Experimental and industrial tests of the developed magnesium fluxes were carried out in the conditions of the converter shops of the metallurgical plants of PJSC "MK "Azovstal" and PJSC "Alchevskii MK". The economic effect of using magnesium modifiers for skull coating is 0,24-0,95 USD/ton of steel.

The recommendations proposed and implemented in the technological process regarding the selection of magnesium, self-flowing hot repair masses for local wear of the converter lining are of practical importance.

The use of developed domestic self-spreading compounds allows almost completely minimizing the dependence of enterprises on imported analogues, increasing the stability of the lining of units and their productivity, as well as reducing the specific consumption of refractories by 0,003 – 0,01 kg/ton of steel.

Experimental and industrial tests of the developed magnesium self-flowing welding masses were carried out in the conditions of converter shops of PJSC "KametSteel" and PrJSC "MK "Azovstal" metallurgical plants. At present, the GIR-RBX-DMK welding mass is used in the industrial conditions of the PJSC "KametSteel" converter shop on a permanent basis. The overall economic effect of using repair mass is 0.01 USD/t due to optimization of technology, high stability and competitive cost.

The methods and principles of testing the properties of fluxes, skull slags, properties of hot repair self-flowing masses and their operational properties proposed by the author can be used at various metallurgical enterprises, including in the creation of new types of refractory materials for high-performance converters in large steelworks, as well as in the educational process at metallurgical faculties of technical universities.

Key words: BOF, refractory lining, local wear, hot repair, slag splashing, magnesium flux modifiers, self-flowing hot repair mass, specific costs.

Список публікацій здобувача (List of publications).

Статті, включені у міжнародні наукометричні бази:

1. Smirnov A. N. Physical simulation of metal mixing in a converter with hybrid injection / A. N. Smirnov, **K. N. Sharandin**, E. N. Lebedev // Steel in Translation. – 2010. – Vol. 40 (9). – P.796-799. <https://link.springer.com/article/10.3103/S0967091210090032>

2. Smirnov A. N. Coating application on the working layer of the converter lining / A. N. Smirnov, **K. N. Sharandin**, A. Yu. Lizun // Steel in Translation. – 2012. – Vol.42 (11). – P.771-775. <https://link.springer.com/article/10.3103/S0967091212110113>

3. Smirnov A. N. Formation of a slag coating on the converter lining / A. N. Smirnov, **K. N. Sharandin**, A. A. Serdyukov, A. F. Tonkushin // Steel in Translation. 2014. – Vol. 44 (8). – 602-606. <https://link.springer.com/article/10.3103/S0967091214080117>

Статті у наукових фахових виданнях:

4. Смирнов А. Н. Физическое моделирование процессов

перемешивания металла в конвертере с комбинированной продувкой / Смирнов А. Н., Лебедев Е. Н., **Шарандин К. Н.** // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2010.– №7. – С. 44-46. <http://irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000358135>

5. Лебедев Е. Н. Физическое моделирование струй газа кислородной фурмы / Лебедев Е. Н., **Шарандин К. Н.**, Лизун А. Ю., Ухин В. Е. // *Сб. научных трудов Донецкого Национального Технического Университета, Серия металлургия.* – 2011 – Выпуск 13 (194). – С.61-65. <http://irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000368669>

6. **Шарандин К. Н.** Исследование влияния конечного конвертерного шлака на эффективность технологии нанесения гарнисажа // Шарандин К. Н., Тонкушин А. Ф., Сердюков А. А. // *Металл и литье Украины.* - 2012. - №10. – С.15-18. <http://irbis-nbuv.gov.ua/publ/REF-0000377246>

7. **Шарандин К.Н.** Технология раздувки конечного шлака азотом в большегрузных конвертерах с использованием магнезиального модификатора // *Металл и литье Украины.* - 2018. - № 5-6. – С.19-26. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MLU_2018_5-6_5

8. Немсадзе Г. Г. Совершенствование технологии горячего ремонта футеровки конвертера с использованием разработанной магнезиальной массы марки «GIR-RB-X» / Немсадзе Г. Г., Смирнов А. Н., Джоджуа Р. А., **Шарандин К. Н.**, Рябый Д. В. // *Металл и литье Украины.* 2019. - № 5-6 - С.56-63 <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/166691>

Монографія:

9. Немсадзе Г.Г. Повышение стойкости футеровки кислородных конвертеров / Немсадзе Г. Г., **Шарандин К. Н.** // *Донецк: GIR-INTERNATIONAL – Норд Пресс.* - 2014. – 135 с. ISBN 978-617-579-926-0

Патенти на винахід:

10. Патент на винахід №99248. Спосіб підготовки шлаку для нанесення гарнісажного покриття на футерівку / Смирнов А. Н., Тонкушин А. Ф., Сердюков А. А., **Шарандин К. Н.** – МПК. Опубл. 25.07.2012. - Бюл. №14.

<https://uapatents.com/5-99248-sposib-pidgotovki-shlaku-dlya-nanesennya-garnisazhnogo-pokrittya-na-futerivku-konvertera.html>

11. Патент на винахід №99698. Шлакоутворюючий брикет для металургійного виробництва / Смирнов А. Н., Тонкушин А. Ф., Сердюков А. А., **Шарандин К. Н.** – МПК. Опубл. 10.09.2012. - Бюл. №17. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1277984/>

Матеріали міжнародних наукових конференцій:

12. Smirnov O. Evolution conditions of final BOF slag on the efficiency of slag splashing technology / Smirnov O., Tonkushin A., **Sharandin K.** // Proceedings of 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012. Dresden, Germany. October 1-3, 2012. <http://www.ics2012.de/>

13. Serdyukov A. Modification of final BOF slag for the effective slag splashing technology / Serdyukov A., Tonkushin A., Smirnov A., **Sharandin K.** // Proceedings of the Fifth Baosteel Biennial Academic Conference (Baosteel BAC 2013). Shanghai, China. June 4-6, 2013, https://www.baosteel.com/group_en/contents/2863/42144.html

14. Nemsadze G. Evolution conditions of end BOF slag on the effectively slag splashing technology / Nemsadze G., Smirnov O., **Sharandin K.** // Proceedings of International Colloquium on Refractories. Eurogress, Aachen, Germany. September 26-27, 2018. <https://oscar-consulting.com/2018/07/31/61st-international-colloquium-on-refractories-2018-on-september-26th-and-27th/>

15. Nemsadze G. Converter layer hot repair process using the «GIR-RB-X» magnesium mass developed by the «GIR-ENGINEERING» LLC/ Nemsadze G., Smirnov O., Dzhodzhua R., **Sharandin K.** // Proceedings of International Colloquium on Refractories. Eurogress, Aachen, Germany. September 25-26, 2019. <https://www.etn-athor.eu/2019/11/08/international-colloquium-on-refractories/>

16. Nemsadze G. Development of integrated methods for hot repair of converter lining based on Magnesians materials of “GIR-Refractories” / Nemsadze G., **Sharandin K.**, Smirnov O., Dzhodzhua R., Ryaby D., Goryuk M. // UNITECR 2023, Frankfurt, Germany, September 26-29, 2023. <https://unitecr2023.org/>

ЗМІСТ

Вступ.....	17
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНВЕРТЕРІВ ТА МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ПИТОМИХ ВИТРАТ НА ВОГNETРИВКІ ТА ДОДАТКОВІ МАТЕРІАЛИ.....	25
1.1. Сучасний стан киснево-конвертерного виробництва сталі в Україні та світі.....	25
1.2. Основні тенденції експлуатації високостійких вогнетривів і зниження питомих витрат за рахунок методів ремонту футерівки протягом кампанії	32
1.3. Аналіз ефективності використання сучасних магнезійних додаткових матеріалів, модифікаторів і мас.....	45
1.4. Мета та завдання дослідження.....	53
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	55
2.1. Розробка фізичної моделі та методики дослідження гідродинаміки рідкої ванни конвертера	55
2.2. Розробка математичної моделі гідродинаміки рідкої ванни конвертера.....	64
2.3. Розробка фізичної моделі та методики дослідження процесів нанесення захисного гарнісажного шару на футерівку конвертера.....	73
2.4. Розробка методики оцінки фізико-хімічних властивостей модифікованого шлаку і гарнісажного покриття	77
2.5. Розробка методики оцінки фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей саморозтічної магнезійної підварювальної маси	85
2.6. Висновки до розділу 2.....	90

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ЗОН ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ РОБОЧОГО ШАРУ ФУТЕРІВКИ КОНВЕРТОРА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧИХ РЕМОНТІВ.....	92
3.1. Дослідження на фізичній моделі особливостей перемішування рідкої ванни конвертера під час продування.....	92
3.2. Математичне моделювання розвитку конвективних потоків у рідкій ванні конвертера.....	100
3.3. Дослідження на фізичній моделі умов нанесення гарнісажного покриття при роздуванні підготовленого кінцевого шлаку азотом.....	107
3.4. Розробка та дослідження фізико-хімічних властивостей шлаків модифікованих магнезійними матеріалами.....	113
3.5. Розробка та дослідження фізико-хімічних і експлуатаційних властивостей саморозтічних магнезійних ремонтних мас.....	138
3.6. Висновки до розділу 3.....	149
4. ВИРОБНИЦТВО ВІТЧИЗНЯНИХ МАГНЕЗІАЛЬНИХ МОДИФІКАТОРІВ І РЕМОНТНИХ МАС ТА ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ	151
4.1. Дослідно-промислове випробування розроблених магнезійних модифікаторів виробництва КНР і вдосконалення технології роздування шлаку азотом в умовах КЦ ПАТ «МК» Азовсталь»....	151
4.2. Основні стадії технології виробництва магнезійних флюсів на базі української сировини і виробничих потужностях.....	172
4.3. Випробування дослідної партії магнезійних брикетованих флюсів марки «БК-4» українського виробництва в умовах ККЦ ПАТ «АМК».....	180

4.4. Дослідно-промислові випробування розробленої саморозтічної маси та основні стадії технології її виробництва в умовах ПрАТ «КрОЗ» у групі «GIR».....	188
4.5. Висновки до розділу 4.....	194
ВИСНОВКИ.....	196
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	200
ДОДАТОК А. Про використання результатів дисертаційної роботи.....	214
ДОДАТОК Б. Про використання результатів дисертаційної роботи.....	215

ВСТУП

Одним з найбільш важливих елементів конвертера є футерівка внутрішньої порожнини, стійкість якого може складати від 2-3 тисяч плавок до 7-8 тисяч плавок за кампанію і більш. При цьому ерозія (знос) футерівки конвертера відбувається нерівномірно. Відповідно в металургійній практиці прагнуть знизити знос на більш небезпечних ділянках за рахунок використання вогнетривів більш високої стійкості та застосування методів ремонту футерівки в процесі експлуатації конвертера.

Актуальність теми. Ерозія робочого шару вогнетривкої футерівки конвертера є одним з найбільших джерел матеріальних і енергетичних витрат високотемпературних процесів. В останні 2-3 десятиліття в сталеплавильній практиці спостерігається значний прогрес у виплавці сталі в конвертері з забезпеченням третьому високої стійкості його футерівки. Найбільший розвиток отримали методи підготовки шлаку та його набризкування на робочу футерівку. Тим часом сам процес набризкування вимагає його адаптації стосовно до конкретних технологічних умов і матеріалів. Ключовим елементом у такій технології є подача в шлак після випуску сталі певної кількості флюсу на основі магнезиту, що забезпечить отримання шлаку оптимальної з точки зору налипання консистенції.

Однією зі специфічних проблем, з якою стикаються металургійні заводи України, є відсутність родовищ магнезиту. Найбільш перспективним заміником магнезиту можуть бути вторинні відходи магнезитових штучних виробів, широко використовуваних у сталеплавильному виробництві з питомою витратою 3-4 кг на тонну сталі.

Актуальність цієї роботи полягає в тому, що вона спрямована на вивчення і розвиток наукових уявлень про особливості ведення конвертерної плавки за умови періодичного нанесення гарнісажу на робочий шар футерівки, динаміки формування робочого шлаку на основі магнезитових відходів, а також періодичного гарячого ремонту методом підварювання саморозтічними магнезіальними масами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи відповідає «Програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року» (постанова обласної Ради від 22.03.2002 р., №3 / 25-656) і «Державній програмі енергозбереження».

Матеріали дисертаційної роботи є узагальненням наукових результатів, отриманих автором при виконанні науково-дослідних робіт, проведених в Державному вищому навчальному закладі (ДВНЗ) «Донецький національний технічний університет» (до 30.09.2014 р.):

«Дослідження суміщених технологій виплавки чавуну з витратою коксу на рівні 200 кг/тн і процесів рафінування металу при продуванні аргоном через спеціальні пористі блоки» (Державна тема Д-5-12, 2012-2014 рр.), «Дослідження гідродинамічних умов перемішування металу в 6-ти струмковому промковші ПАТ «ЄМЗ» та розробка конструкції внутрішньої порожнини промковша та металоприймача, що враховує умови, які виникають при розливанні довгими серіями з підвищеною швидкістю вилучення заготовки» (Договір №398/13, 2013 р. ПАТ «ЄМЗ »).

Мета та завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії та технології конвертерної плавки, спрямованої на підвищення ефективності процесу виплавляння в частині збільшення стійкості футерівки за рахунок періодичного нанесення гарнісажного шару шляхом додавання спеціального флюсу та роздування шлаку азотом після випуску сталі, а також періодичного гарячого ремонту методом підварювання саморозтічними масами.

Для досягнення наведеної мети в роботі були поставлені та вирішені такі основні задачі:

- проаналізувати основні рішення в частині підвищення стійкості робочого шару футерівки конвертера, що використовуються в промисловості;
- вивчити основні методи та прийоми ремонту робочого шару футерівки конвертера;

- розробити фізичну модель для вивчення гідродинаміки рідкої ванни конвертера;
- дослідити особливості перемішування рідкої ванни конвертера під час продування;
- розробити фізичну модель для вивчення ефекту нанесення гарнісажного покриття в конвертері;
- визначити вплив фракційного і хімічного складу флюсу на ефективність на-несення гарнісажного покриття;
- розробити методики оцінки фізико-хімічних властивостей модифікованого шлаку та гарнісажного покриття;
- встановити взаємозв'язок між гранулометричним складом твердих частинок і в'язкістю шлаку, що використовується для набризкування шлаку;
- розробити методику гарячого моделювання процесу підварювання футерівки конвертера саморозтічними масами;
- розробити методику оцінки фізико-хімічних властивостей підварювального конгломерату;
- дослідити можливість використання для виробництва флюсів-модифікаторів і саморозтічної ремонтної маси вторинних матеріалів на основі магнезиту;
- розробити основні технологічні прийоми виробництва магнезійних флюсів-модифікаторів і саморозтічних мас для конвертерів;
- дослідити ефективність розроблених флюсів-модифікаторів і саморозтічних мас у промислових умовах для нанесення гарнісажу та підвищення стійкості футерівки конвертерів.

Об'єкт дослідження. Процеси перемішування рідкої сталі та шлаку, а також налипання гарнісажу на робочу поверхню футерівки конвертера; процеси адгезії, корозійної і ерозійної стійкості підварювальної маси на ремонтованих ділянках футерівки конвертера.

Предмет дослідження. Гідродинамічні та масообмінні процеси в системі «рідкий метал – шлак – футерівка конвертера» в умовах гарячих

ремонтів робочого шару футерівки конвертера методом розбризування шлаку і підварювання саморозтічними масами.

Методи дослідження. Робота є комплексним дослідженням, що ґрунтується на використанні сучасних методів фізичного та математичного моделювання, а також на порівняльних кількісних оцінках утворення гарнісажного шлаку і формування підварювального конгломерату в місцях локального зносу футерівки конвертера. Фізичне моделювання процесів переміщення сталі і шлаку в конвертері виконано з урахуванням критеріїв гідродинамічної подібності Фруда і гомохронності. Математична модель базується на фундаментальних законах збереження маси, енергії, імпульсу, рівняннях математичної фізики, а також відомих і апробованих математичних методах. Адекватність створених моделей підтверджується співвідношенням результатів математичного моделювання та теоретичних досліджень з промисловими експериментами і впровадженням у виробництво розроблених рекомендацій щодо оптимізації параметрів нанесення гарнісажу і підварювання місць локального зносу футерівки конвертера. Обробку експериментальних даних, а також математичне моделювання гідродинамічних процесів здійснювали з використанням пакетів прикладних програм Ansys і Microsoft Excel.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримали подальший розвиток наукові уявлення про характер перемішування рідкої ванни в конвертерах з комбінованим продуванням. Встановлено, що в діапазоні розташування донних фурм $0,4R - 0,66R$ має місце накладення потоків один на другий, що тягне за собою їх взаємне ослаблення. У діапазоні $0,66R - 0,9R$ – взаємний вплив різноспрямованих потоків зменшується та при положеннях $0,7R - 0,74R$ приймає мінімальне значення. Це створює додаткові передумови для ефективного перемішування рідкого обсягу ванни. Подальше переміщення фурм від центру до периферії ($0,74R - 0,8R$) виводить зустрічні потоки верхнього і нижнього продування з зони спільної

взаємодії. Наближення донних фурм до кінчної частини днища тягне за собою ослаблення циркуляції рідини в «центральному» обсязі ванни.

2. Вперше показано, що наростання гарнісажного шару більшою мірою характерно для зони стику нижнього конуса і циліндричної частини конвертера, а також для зони цапф. Визначено режими роздування, що забезпечують рівномірність нанесення покриття в зонах підвищеного ерозійного зносу. Встановлено, що при постійній витраті вдувного азоту і його тиску в магістралі ($Q_{г.} = 480 \text{ м}^3/\text{хв}$, а $P_{г.} = 16 \text{ атм}$) маса гарнісажного покриття екстремально залежить від висоти положення фурми. Максимальній кількості нанесеного гарнісажу відповідає діапазон положення фурми в 1,3-1,7 м над рівнем шлакової ванни. При цьому об'ємна частка диспергованої твердої фракції в обсязі шлаку, у кількості 6-7%, забезпечує максимальну «ефективну витрату» гарнісажу, при інших рівних умовах.

3. Встановлено, що з підвищенням кількості диспергованої твердої (нерозчиненої) фази у шлаку його в'язкість зростає. При досягненні концентрації 7-9% «зернової» фази шлак має «задовільну» в'язкість для виконання операції набризкування. А зі збільшенням кількості «зерен» до 10% і більше спостерігається різке підвищення в'язкості пов'язане з інтенсивною гетерогенізацією розплаву.

4. Показано, що основними параметрами, що визначають змочування, є вміст (FeO) і (MgO) у шлаку. Так, при вмісті (FeO) більше 25% кут змочування при вмісті MgO 7-8% досягає менше 30° . При зниженні вмісту FeO кут змочування збільшується і при наближенні до 13-15% становить $\sim 75-85^\circ$. Подальше зниження концентрації FeO призводить до збільшення кута змочування понад 90° , при цьому змочування різко погіршується. Збільшення в шлаці вмісту MgO, викликає погіршення змочування периклазовуглецевого матеріалу, причому ступінь підвищення кута θ сильно залежить від окислення шлаку.

5. Вперше сформульовано концептуальний підхід до хіміко-гранулометричних параметрів модифікаторів, що дозволяють забезпечити

цілеспрямоване управління фізико-хімічними властивостями кінцевого конвертерного шлаку. Наявність у магнезійному брикеті важкорозчинних компонентів у кількості 60 - 65% (мас.), з яких щонайменше 80%, мають фракцію 2-6 мм, забезпечують необхідний обсяг «зернового» наповнювача і формування арматурного «скелета» в охолодженому гарнісажі. При цьому легкорозчинний, дрібнодисперсний, магнезійний компонент, взятий у кількості 40 - 45% (мас.) насичує шлак оксидом магнію до рівня 7-8%, вже в перші секунди процесу роздування.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення мають запропоновані та впроваджені в технологічний процес рекомендації щодо вибору флюсів для формування гарнісажу для нанесення на робочу поверхню футерівки конвертера і параметрів нанесення гарнісажу, а також вибору компонентів флюсу, в тому числі з відходів магнезійних виробів.

Застосування розроблених флюсів дозволяє підвищити стійкість футерівки конвертера, мінімізувати питомі витрати імпортованих вогнетривів на основі магнезиту, а також підвищити продуктивність конвертера.

Розроблені технологічні рекомендації забезпечують підвищення стійкості робочого шару футерівки конвертера і, відповідно, зменшують питому витрату вогнетривів у середньому на 1,2 - 3,5 кг/т сталі.

Дослідно-промислові випробування розроблених магнезійних флюсів виконані в умовах конвертерних цехів металургійних комбінатів ПрАТ «МК «Азовсталь» і ПАТ «Алчевський МК». Економічний ефект від використання магнезійних модифікаторів для гарнісажного покриття становить 0,24-0,95 USD/т сталі.

Практичне значення мають запропоновані та впроваджені в технологічний процес рекомендації щодо вибору магнезійних, саморозтічних, підварювальних мас для гарячого ремонту зон випереджаючого (локального) зносу футерівки конвертера.

Застосування розроблених вітчизняних саморозтічних мас дозволяє практично повністю мінімізувати залежність підприємств від імпортованих

аналогів, підвищити стійкість футерівки агрегатів і їх продуктивність, а також знизити питомі витрати вогнетривів на 0,003 - 0,01 кг/т сталі.

Дослідно-промислові випробування розроблених магнезійних саморозтічних підварювальних мас виконано в умовах конвертерних цехів металургійних комбінатів ПрАТ «КаметСталь» і ПрАТ «МК «Азовсталь». На даний час підварювальна маса марки «GIR-RBX-DMK» використовується в промислових умовах конвертерного цеху ПрАТ «КаметСталь» на постійній основі. Загальний економічний ефект від використання ремонтної маси становить 0,01 USD/т за рахунок оптимізації технології, високої стійкості і конкурентної вартості.

Запропоновані автором методики та принципи тестування властивостей флюсів, гарнісажних шлаків, властивостей підварювальних мас і їх експлуатаційних властивостей можуть бути використані на різних металургійних підприємствах, у тому числі і при створенні нових видів вогнетривких матеріалів для високопродуктивних конвертерів у великих сталеплавильних цехах, а також в навчальному процесі на металургійних факультетах технічних університетів.

Особистий внесок здобувача.

Основні експериментальні дані і наукові положення дисертаційної роботи одержані і сформульовані автором особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: участь у постановці завдань, організації, плануванні і проведенні експериментів [4–6]; узагальнення результатів експериментів [1-8, 12-16]; участь у проведенні патентного пошуку, написання формули винаходу [10,11]; участь у проведенні промислових випробувань [7-9]. Автор узагальнив результати досліджень і виконав апробацію запропонованої технології.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення та результати дисертації обговорювалися на 5 міжнародних конференціях: 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, 1-3 October 2012. Dresden (Dresden, 2012); 5th Baosteel Biennial Academic Conference, 2013

(Shanghai: 2013); International Colloquium on Refractories, September 26-27, 2018 (Aachen, 2018), International Colloquium on Refractories, September 25-26, 2019 (Aachen, 2019), Unified international Technical Conference on Refractories (UNITECR) 18th Biennial Worldwide, September 26-29, 2023 (Frankfurt, 2023).

Публікації. Основні результати дисертації викладені в 16 публікаціях, у тому числі: 1 монографії, 4 статті опубліковано в спеціалізованих наукових виданнях, що відповідають переліку МОН України, 3 статей в зарубіжних наукових виданнях, 1 статті в збірнику наукових праць, 5 тезах доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях, 2 патентах України.

Структура дисертації. Дисертація складається з титульного аркуша, анотації, змісту, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст дисертації викладено на 183 сторінках. У розділах дисертації 78 рисунків і 48 таблиць. Список використаних джерел на 13 сторінках містить 132 найменування. 2 додатки на 2 сторінках. Повний обсяг дисертації – 215 сторінок.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНВЕРТЕРІВ ТА МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ПИТОМИХ ВИТРАТ НА ВОГНЕТРИВКІ ТА ДОДАТКОВІ МАТЕРІАЛИ

Виробництво сталі в конвертерах із застосуванням кисню є найбільш ефективною та стійкою системою технологій, що не просто забезпечує виплавляння сталі з високою продуктивністю плавильного агрегату, але й дозволяє гармонізувати роботу всього технологічного ланцюга від виробництва чавуну до розливання сталі і отримання заготовки включно [1].

1.1 Сучасний стан киснево-конвертерного виробництва сталі в Україні та світі

Система технологій виробництва сталі в конвертерах із застосуванням кисню безперервно вдосконалюється, що в ряді випадків і визначає подальший науково-технічний прогрес чорної металургії в цілому. Останні два десятиліття відзначились безпрецедентним приростом обсягів виробництва конвертерної сталі у світі: з 522 млн. т у 2000 р до 1200 млн. т у 2019. Однак таке стрімке зростання є результатом, перш за все, бурхливого розвитку чорної металургії КНР. Більш того, дуже примітним, представляється і той факт, що металургія КНР продовжувала нарощувати виробництво в кризові 2008-2009 рр., що дозволило їй вже в 2008р. виробити більше 50% всього світового обсягу виробництва конвертерної сталі [2].

В Україні виробництво сталі конвертерним методом є домінуючим технологічним процесом, що зумовлено наявністю великої кількості покладів залізної руди (переважно магнетиту), а також розвинутою системою видобутку коксівного вугілля і виробництва коксу. Не дивлячись на важке економічне і політичне становище, Україна входить в десятку найбільших виробників конвертерної сталі у світі. Так, у 2017-2018 рр. в Україні було

вироблено 21,3 млн. т і 21,06 млн. т відповідно. При цьому загальна частка конвертерної сталі, що виплавляється в Україні становить приблизно 75%.

У науково-технічній літературі процес отримання сталі в конвертері з використанням продування киснем (кисневий конвертер), який подають зверху за допомогою водоохолоджуваної фурми, має кілька назв: киснево-конвертерний процес – в російськомовній літературі країн СНД; LD процес – від німецького Linz Dusenverfahren – фурменный процес у Лінці; BOP / BOF – від англійського basic oxygen process / furnace.

Загальна будова кисневого конвертера верхнього дуття (LD, BOP / BOF) представлена на рисунку 1.1.

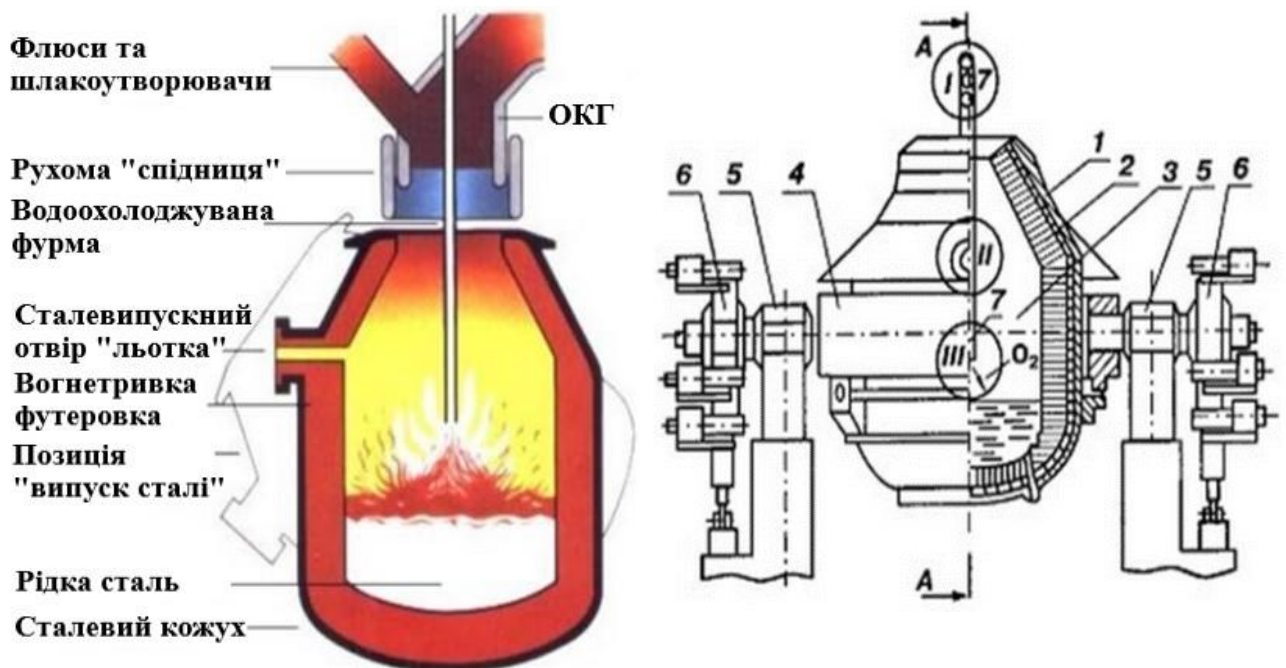


Рисунок 1.1. – Загальна будова кисневого конвертера верхнього дуття: 1 – корпус; 2 – футерівка; 3 – робочий простір конвертера; 4 – опорне кільце з цапфами і системою кріплення в ньому корпусу; 5 – опорні вузли та станини; 6 – механізм повороту; 7 – киснева фурма з системою кріплення і переміщення.

Типові конструкції кисневих конвертерів, що отримали найбільше поширення в світі, мають тоннаж 50 т, 100 т, 130 т, 160 т, 200 т, 250 т, 300 т, 350 т і 400 т. В останні роки існує тенденція до збільшення садки існуючих агрегатів до 160 т і 300 т для середніх і великовантажних конвертерів відповідно.

Узагальнюючи основні технологічні та конструктивні будови сучасних конвертерних агрегатів, можна виділити наступні основні характерні аспекти конвертерних цехів:

- сучасні конвертерні цехи обладнуються, як правило, двома великими конвертерами місткістю 100-350 т кожен, що дозволяє гармонізувати основні вантажопотоки при високій питомій продуктивності плавильних агрегатів;
- пріоритет віддається технологічним рішенням та будовам, які спрямовані на зменшення втрат енергії, заліза, вогнетривів та інших витратних матеріалів при зниженні шкідливого впливу на навколишнє середовище за рахунок зменшення викидів CO₂ та пилу, ефективної переробки металобрухту та технологічних відходів, утилізації технічної води, розвитку транспортної системи і т. ін.;
- найбільше розповсюдження у світі отримало комбіноване продування рідкої ванни киснем зверху і нейтральним газом знизу; при цьому через донні фурми можливе вдування не тільки аргону або азоту, але і CO₂ з інтенсивністю до 0,1 м³/(т·хв) і навіть CO;
- для підвищення ефективності проведення конвертерної плавки на сучасних виробництвах використовуються методи контролю положення та конструкції верхньої фурми, швидкості вдування кисню, підвищення ефективності процесу розчинення вапна, оптимізації параметрів вдування аргону через донні фурми та ін., а також оперативного прогнозування вмісту вуглецю під час продування;
- для стабілізації процесу конвертерної плавки та зниження її тривалості все більшого поширення набуває технологія десульфурації чавуну

в ковші (найбільшого поширення набула десульфурація сумішшю флюїдізованого вапна та магнію);

- практично обов'язковою технологічною операцією, що забезпечує підвищення якості виробленої металопродукції, є раннє виявлення та відсічення шлаку під час технологічного переливу металу з конвертера в ківш;

- все більшого поширення в практиці конвертерного виробництва отримують агрегати комплексної позапічної обробки сталі типу «ківш-піч», які включають в себе проведення операцій підігріву металу, продувки сталі аргоном, її рафінування, доведення за хімічним складом, витримування за часом відповідно до режиму розливання на МБЛЗ;

- стійке нарощування обсягів виробництва конвертерної сталі, яка піддається вакуумній обробці що, перш за все, пов'язано з широким розповсюдженням у машинобудуванні нових груп низьковуглецевих високоякісних сталей [3];

В цілому основний прогрес конвертерного виробництва полягає у вдосконаленні процесу виплавки сталі з метою підвищення питомої продуктивності плавильного агрегату за умови комплексної автоматизації всіх елементів технологічного ланцюга, що забезпечує додатковий енерго- і ресурсозберігаючий ефект, велику екологічну безпеку, а також оптимальні економічні показники.

В умовах сьогодення на території України експлуатується 21 кисневий конвертер різної місткості, у т. ч. шість великовантажних агрегатів (ПрАТ «МК «Азовсталь», ПАТ «АМК»(непідконтрольна територія) ПрАТ «ДМК»), загальною річною продуктивністю близько 24 млн. т сталі [4].

Інтенсифікація процесу (скорочення часу плавки, підвищення виходу придатного і т. ін.) у сукупності з підвищенням частки безперервного розливання та позапічної обробки і їх продуктивності, є основним резервом в нарощуванні виробничих потужностей.

Вітчизняні підприємства, що мають у своєму складі кисневі конвертери у різному технологічному ланцюзі представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Виробництво сталі в кисневих конвертерах України

Найменування заводу	Дата запуску цеха в експлуатацію	Маса плавки та число конвертерів	Позапічна обробка сталі	Частка безперервного розливання сталі, %	Обсяг виробництва у 2019 р., млн т
Дніпровський металургійний завод	1956	50x3	-	0	0,92
Металургійний комбінат ім. Ілліча	1964	160x3	продування аргоном, ківш-піч	100	3,21
АМКГ (м. Кривий Ріг)	1965	160x6	ківш-піч	12	5,59
Єнакіївський металургійний завод	1968	160x3	ківш-піч	100	н. д.
Металургійний комбінат «Азовсталь»	1977	330x2	ківш-піч, вакууматор	90	4,22
Дніпровський металургійний комбінат	1982	250x2	продування аргоном, ківш-піч	100	2,41
Алчевський металургійний комбінат	2008	300x2	ківш-піч, вакууматор	100	н. д.
РАЗОМ, обсяг виробництва у 2019 р., млн т					16,35

Однією з найважливіших стратегій розвитку технології і конструкції конвертерів є досягнення високої стійкості робочої футерівки, що відповідає мінімальним питомим витратами на вогнетриву та виключає простой, пов'язані з ремонтом. Слід мати на увазі, що само по собі вирішення питання радикального підвищення стійкості футерівки конвертера забезпечує значне підвищення продуктивності конвертерного цеху в цілому до 15-20% [5, 6].

Останнє десятиріччя характеризується значним підвищенням стійкості футерівки конвертера за рахунок застосування комбінованої гармонізованої

схеми (рисунок 1.2), в якій враховуються особливості зносу окремих зон, у тому числі схильних до підвищеної ерозії.

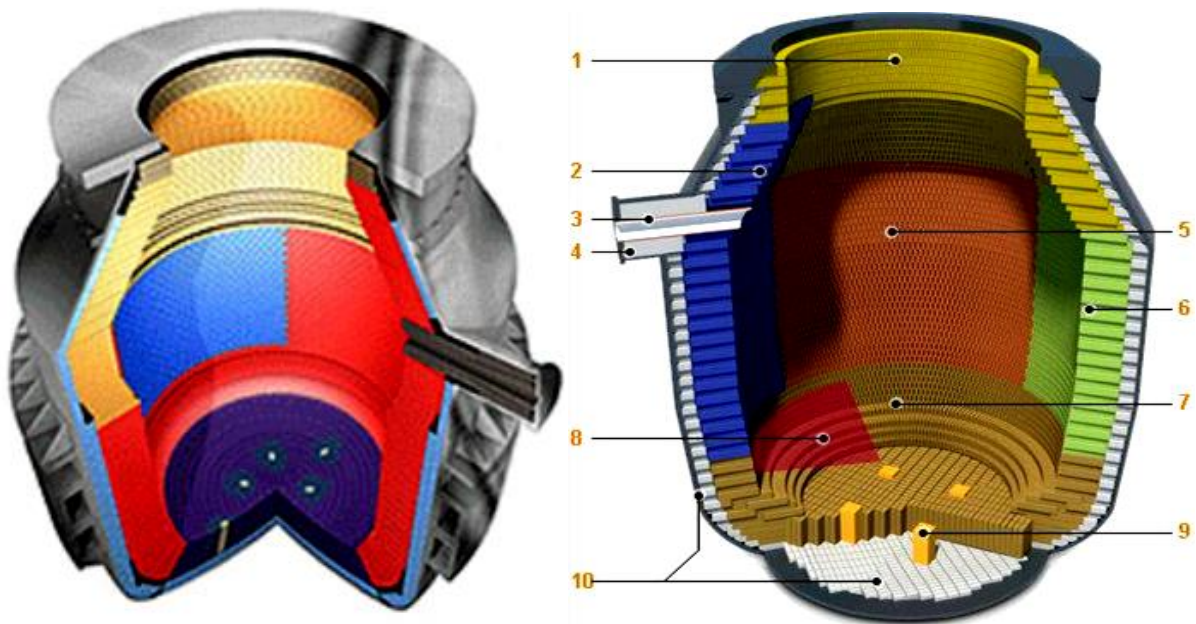


Рисунок 1.2. – Конструкція зональної кладки конвертера: 1 – горловина; 2 – зливна зона; 3 – льоточний блок; 4 – гніздовий блок; 5 – цапфенна зона; 6 – завантажувальна зона; 7 – днище і ванна; 8 – рівень розплаву; 9 – продувний вузол; 10 – арматурний шар.

Збалансований знос футерівки (рівностійкість) в цілому забезпечується використанням в окремих зонах різних за якістю і товщиною вогнетривких виробів. При цьому актуальним залишається спільне завдання, пов'язане з підвищенням стійкості футерівки шляхом поліпшення її конструктивних елементів, що реалізується через постійне вдосконалення проєктів і способів догляду за нею протягом кампанії.

Найважливішою метою стратегії розвитку конструкції футерівки конвертерів визначається досягнення її високої стійкості, що забезпечує таку ефективність роботи агрегату, яка відповідає мінімальним питомими витратами на вогнетриви [7].

Розробка універсальних підходів до конструювання футерівки із застосуванням принципу порівняльного прогнозування зносу різних її ділянок в залежності від специфіки їх «навантаження» – один із пріоритетних напрямів досліджень на провідних металургійних підприємствах Європи і Азії. Тому проблема підвищення стійкості футерівки є актуальною. Вона може бути ефективно вирішена лише при комплексному підході, що враховує основні фактори, які впливають на стійкість: якість застосовуваних вогнетривких матеріалів, схема кладки, технологічні параметри проведення плавки, способи догляду протягом кампанії [7, 8].

Таким чином, відповідно до сучасних уявлень про досягнення високої продуктивності та ресурсозберігаючого ефекту в конвертерному виробництві сформувався певний технологічний зв'язок, складовим елементом якого є конвертер – вогнетривка футерівка. Тим часом, забезпечення високої стійкості вогнетривів і, відповідно, зниження питомих витрат на тону виплавленої металопродукції дозволить ефективно заповнити наявні резерви конвертерного виробництва [8]. При цьому додаткової актуальності набуває вдосконалення методів поточних ремонтів футерівки агрегату та підвищення її стійкості, що дозволить збільшити продуктивність конвертерів за рахунок скорочення середнього циклу плавки.

Разом з підвищенням стійкості та збільшенням продуктивності агрегатів розвиток методів обслуговування футерівки протягом кампанії дозволяє значно знизити питомі витрати на виробництво однієї тони сталі, що підвищує її конкурентоспроможність на світовому ринку.

Додатково звертає на себе увагу той факт, що підвищення інтенсивності конвертерного процесу неминуче призведе до збільшення температурних, механічних і ерозійних навантажень на футерівку. Це, в свою чергу, вимагає розвитку і розробки заходів щодо підвищення стійкості вогнетривів, у т. ч. за рахунок поточних ремонтів.

1.2 Основні тенденції експлуатації високостійких вогнетривів і зниження питомих витрат за рахунок методів ремонту футерівки протягом кампанії

Стандартною практикою у загальносвітовому виробництві конвертерної сталі в даний час є застосування в якості вогнетривкої футерівки конвертерів периклазовуглецевих штучних виробів (вміст вуглецю 5-25% у залежності від умов експлуатації) на основі суміші високочистого плавленого магнезиту [9-11].

Застосування високоякісних периклазовуглецевих вогнетривів і диференційована схема кладки футерівки дозволяють значно збільшити тривалість експлуатації кисневого конвертера. При цьому безперервно підвищується чистота сировини для виробництва периклазовуглецевих виробів (вміст домішок у магнезиті знизився у два-три рази, а в графіті – у п'ять разів).

Як показує практика, в даний час загальна витрата вогнетривів на 1 тону сталі складає в середньому 7-8 кг. При цьому зниження їх питомого споживання, досягнуте в останні 3-4 десятиліття, обумовлене як виведенням з експлуатації низькоефективних сталеплавильних агрегатів (наприклад, мартенівських печей), так і створенням нових вогнетривких матеріалів, які максимальному ступені відповідають умовам технологічних процесів при виробництві чавуну та сталі (рисунок 1.3). Основний прогрес у підвищенні стійкості вогнетривів для виробництва і розливання сталі, вочевидь, був досягнутий в поєднанні раціональних фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей вогнетривких виробів з оптимальною побудовою конструкції футерівки, яка б враховувала технологічні особливості її експлуатації і регламентовані ремонти.



Рисунок 1.3. – Динаміка зміни споживання вогнетривів на виробництво 1 т рідкої сталі.

Як приклад в таблиці 1.2 представлені основні фізико-хімічні показники сучасних вогнетривів, використовуваних у зональній кладці конвертера. Процес зносу вогнетривів які містять вуглець, як відомо, проходить в кілька стадій: на першій стадії має місце окислення вуглецевої складової в процесі сушіння-розігріву футерівки (скоксований вуглецевий компонент починає окислюватися вже при 350 °С, температура початку окислення графіту не перевищує 560 °С), процес окислення вуглецю продовжується під впливом $[O]^2$, розчиненого в рідких шлаку і сталі на контакті шлак – вогнетрив і сталь – вогнетрив (зазвичай говорять про окислювачі FeO і MnO) [12,13]. Слід зазначити, що при пористості оксидовуглецевого вогнетрива в стані поставки 4-6%, його пористість після розігріву до 10000 °С становить 7-10%, а після окислення 10-12% вуглецю пористість виробу досягає рівня 30% і більше. Таким чином, у рідкорухомий шлак проникає зневуглецьований шар вогнетрива, вступає у взаємодію з його оксидними компонентами, в першу чергу, на контакті зерен вогнетрива,

розчиняючи в собі оксидну тонкомелену частину, утворюючи легкоплавкі багатокомпонентні фази в системі $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO (Fe}_2\text{O}_3) \text{-MnO-Na}_2\text{O}$. За даними [14], щільне зерно периклаза діаметром 20 мм втрачає при зануренні в рідкий шлак від 0,6 до 2,2 мм в діаметрі протягом 15 хв. Але в період переміщення металу і шлаку, особливо в період продувки зерна периклаза вимиваються з вогнетрива з наступним розчиненням у шлаку.

Таблиця 1.2

**Основні фізико-хімічні показники
формованих вогнетривких матеріалів футерівки конвертера**

Зона футерівки	Марка виробу	Масова частка основних компонентів, %		Межа міцності при стисненні, МПа	Позірна пористість, %	Густина, г/см ³
		MgO	C			
Днище	GIR-MT-8B	≥ 72	≥ 7	≥ 30	≤ 5	≥ 2,90
Нижній конус	GIR-MT-14C	≥ 71	≥ 13	≥ 35	≤ 5	≥ 2,90
Циліндр	GIR-MT-14B	≥ 70	≥ 13	≥ 30	≤ 4	≥ 2,90
Зона цапф	GIR-MT-16A	≥ 69	≥ 16	≥ 35	≤ 3	≥ 2,90
Верхній конус / горловина	GIR-MT-12C	≥ 72	≥ 11	≥ 30	≤ 5	≥ 2,91
Леткові блоки	GIR-MT-10A	≥ 75	≥ 10	≥ 37	≤ 4	≥ 2,92

Таким чином основний знос футерівки в процесі її експлуатації відбувається, головним чином, через роз'їдання периклаза шлаком, окислення

вуглецю вогнетрива киснем повітря або CO_2 , під впливом термомеханічних факторів, що виникають в результаті термічного удару або механічних напругах в кладці, а також ерозії (рисунок 1.4).

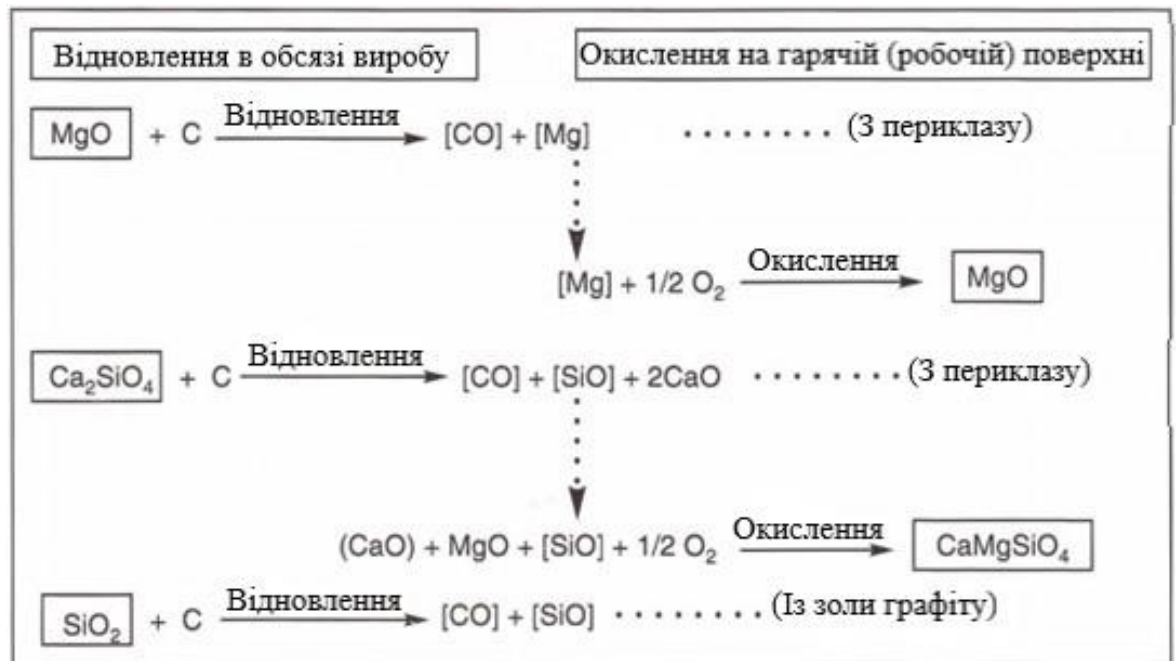


Рисунок 1.4. – Окислювально-відновлювальні реакції в магнезіально-вуглецевих виробках (вибірково) [17].

У зоні удару поверхні футерівки кисневих конвертерів скрапом головним фактором зносу слугує сильна абразивна дія, що виникає при падінні брукту з високою швидкістю.

Серед окисно-відновних процесів у вогнетривах (рисунок 1.5) значне знеміцнення структури може викликати реакція між вуглецем вогнетриву і MgO . Термодинамічна рівновага реакції $\text{MgO} + \text{C} \leftrightarrow \text{Mg} + \text{CO}$ встановлюється при 1820°C , однак в кисневих конвертерах ця реакція завжди протікає вже при температурі сталі близько 1700°C [15, 16].

Напруга	Напруга	Ерозія	Окислення	Корозія
	↓	↓	↓	↓
Зношування	Дискретне зношування (розтріскування)	Безперервне зношування (ерозія виробу)	Процеси, передуючі зношуванню (масообмінні процеси)	
	↓	↓	↓	↓
Властивість виробу	Еластичність (гнуцкість) структури	Ерозійна стійкість	Стійкість до окислення і окислювально-відновних реакцій	Корозійна стійкість
Вміст вуглецю	↑	↓	↓	↑
Зв'язка	Пек ↑	-	Пек ↑	-
Антиоксиданти	↓	↑	↑↓	↑↓
Розмір кристалів периклазу	-	-	↑	↑

Рисунок 1.5. – Властивості MgO-C-виробів: стрілки вказують на підвищення (↑) або на зниження (↓) [18].

У звичайних умовах зношування футерівки залежить від послідовності процесів і є результатом безперервного поєднання наступних чинників: зневуглецювання (при окисленні), просочення сторонніми речовинами (після втрати вуглецю, який гальмує інфільтрацію), корозії структури просоченого виробу та ерозії матеріалу виробу в результаті переміщення вмісту ковша або печі. Крім того, спостерігається періодичний знос у вигляді сколювання фрагментів виробів під дією напруг, що виникають при теплосменах [19-27].

Механічні напруги і зношування вогнетривів обумовлені чотирма основними робочими (експлуатаційними) властивостями, а саме: корозійною стійкістю, стійкістю до окисно-відновних реакцій, ерозійною стійкістю та здатністю до «поглинання» напруг, особливо при термічному ударі. При виборі кращої марки виробів слід враховувати переважний характер навантажень (фактор зносу).

Знання процесу руйнування періклазовуглецевих виробів [28, 29] і зон найбільшого зносу конвертера за допомогою сучасних методів контролю залишкових товщин футерівки (лазерне сканування) протягом кампанії [30-32] дозволяють виявляти зони нерівномірного (випереджаючого) зносу, удосконалювати якість даних вогнетривів і методів ремонту.

Здебільшого це зони нижнього конуса, зони цапф, зона зливу і зона льотки. Схема зональної кладки конвертера і приклад топографії нерівномірного зносу футерівки представлено на рисунку 1.6.

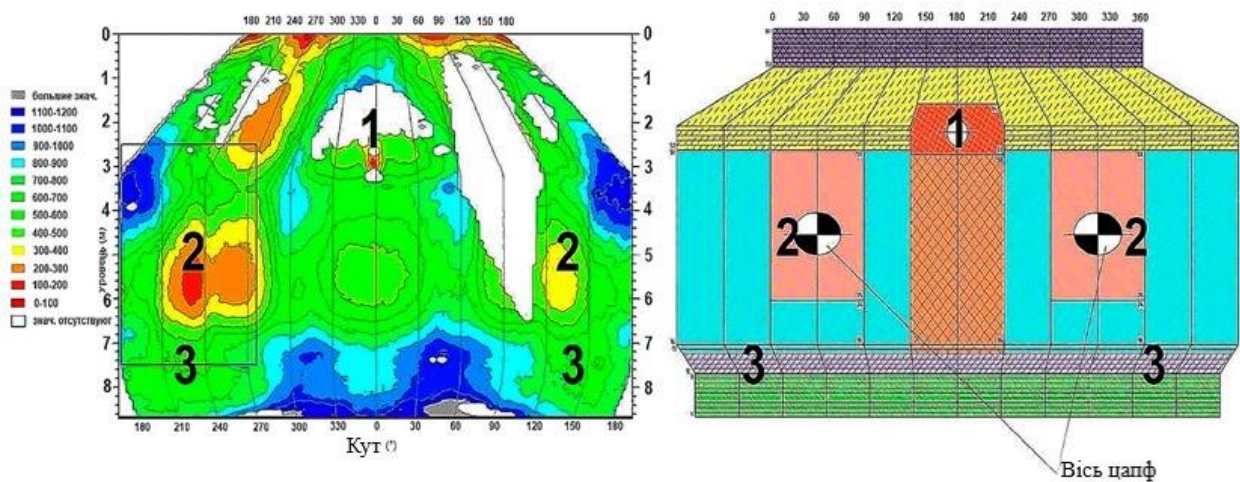


Рисунок 1.6. – Зональна футерівка 350 т конвертера та приклад нерівномірності зносу: 1 – зона льотки; 2 – зони цапф; 3 – зона нижнього конуса. Колір на топографії – залишкова товщина футерівки: синій – max, червоний – min.

На сучасному етапі розвитку застосовувані технології дозволяють здійснювати захист футерівки конвертерів під час кампанії методом факельного і напівсухого торкретування, методом підварювання, отриманням високомагнезійних конвертерних шлаків, шлаковим гарнісажем, шляхом роздування кінцевого конвертерного шлаку інертним газом (азотом). Збільшення терміну служби футерівки сталевипускного каналу та вдосконалення технологічних параметрів ведення конвертерної плавки також

є заходами, що підвищують тривалість терміну служби вогнетривкої футерівки конвертера [33].

У першому наближенні заходи для догляду за футерівкою можна поділити на три основні групи:

Торкретування. Метод гарячого ремонту футерівки конвертера, що полягає в нанесенні за допомогою спеціальних торкрет-машин вогнетривкої маси на внутрішні зношені ділянки футерівки [34, 35]. У металургійній практиці відомі і знаходять застосування мокре, напівсухе і факельне торкретування. При перших двох способах зволожену вогнетривку масу наносять на футерівку конвертера за допомогою сопла-розпилювача торкрет-машини струменем стисненого повітря. Зволожена маса прилипає до футерівки, а в подальшому приварюється до неї. При напівсухому торкретуванні змішування вогнетривкої маси з водою відбувається в соплі; при мокрому (пульповому) торкретуванні вогнетривку масу попередньо змішують з водою і подають у сопло стисненим повітрям у вигляді пульпи. В якості вогнетривкої маси при напівсухому і мокрому торкретуванні застосовують периклазові, доломітові, хромітові порошки та їх різні суміші з додаванням зв'язуючих – рідкого скла, силікатної брили, фосфатів, солей магнію, шлаків, смол та ін. Кількість зв'язуючих у масі становить 1-15% .

Напівсухий спосіб торкретування частіше застосовують при ремонті локальних розпалів футерівки, а мокрий – при планово-попереджувальних ремонтах. Перевагами мокрого і напівсухого торкретування є їх простота і відносно невисока вартість. Однак через наявність вологи структура нанесеного шару виходить порівняно рихлою, у зв'язку з чим стійкість торкрет-покриття виявляється порівняно невисокою. Крім того, тривалість операції торкретування значно більше, ніж при факельному торкретуванні. При цьому відбувається охолодження футерівки, що часто призводить до потреби підігріву послідуєчого нанесеного шару. Ці способи найбільш прийнятні для цехів, що мають резерви потужності (працюють з простоями конвертерів). При напруженому ритмі роботи конвертерів таке

торкретування призведе до зниження продуктивності цеху, збільшення витрат по переділу та капітальних витрат.

Факельне торкретування, розроблене в Радянському Союзі, на піку популярності широко використовували в багатьох країнах. Слід зазначити, що тоді стійкість конвертерів була в межах 300-500 плавок і значне її підвищення (в середньому на 100-150 плавок), при застосуванні даного способу, видавалось вельми актуальним. Зараз на більшості заводів від нього відмовились через високу вартість торкрет-маси, основу якої складають магнезитовий порошок і горючі сланці.

Підварювання. Існує два основні методи ремонту шляхом підварювання. Це метод підварювання штучними виробами та підварювання саморозтічної масою.

Підварюванням штучними виробами зазвичай ремонтують завалочну і зливну сторони футерівки і днище [36]. Так, при зливі шлаку в конвертері залишають його частину і потім продувають шлак протягом 3-5 хв киснем для окислення корольків заліза та додавання шлаку необхідної рідкорухомості. Потім на шлак з «ломозавалочного» совка за допомогою мостового крана завантажують бій вогнетривкої цегли (б/у періклазовуглецеві вироби, вогнетриви власного виробництва на основі спеченого периклаза і т. ін.). Поворотом конвертера розподіляють загуслий шлак по футерівці. При цьому конвертер зупиняють в такому положенні, в якому основна маса шлаку знаходиться в місці найбільшого зношування футерівки. Потім його витримують в цьому положенні до 15-30 хв. Після цього надлишок шлаку зливають і роблять витримку тривалістю до 15-20 хв. Недоліком цього способу є велика тривалість (до 60 хв), трудомісткість і висока витрата вогнетривів. Стійкість такого ремонту зазвичай становить 30-60 плавок, що відповідає періодичності 1 ремонт у 2-3 доби. Ремонт цапфових зон і горловини даним способом не представляється можливим в принципі.

Найбільш перспективною альтернативою яка не потребує спеціального обладнання та підготовки персоналу, є підварювання саморозтічними магнезіальними масами. Підварювання цим способом дозволяє відновлювати найбільш важкодоступні зони футерівки схильні до випереджаючого зношування.

Так, конвертер, після зливу продуктів плавки, кантується в бік зливу або завалювання, в залежності від зони зносу. Саморозтічна, підварювальна маса закидається на ремонтуюму ділянку вручну або з ломозавалочного совка. За рахунок своїх специфічних властивостей «рухливості» у температурному інтервалі спікання, маса рівномірно заповнює місце зносу. Після певного часу витримки, як правило, 10-20 хв, матеріал спікається в міцний, вогнетривкий конгломерат і приварюється до вогнетривів футерівки з утворенням так званої латки – підварювання. Стійкість такого ремонту становить 10-30 плавок.

Роздування підготовленого кінцевого шлаку азотом. До найбільш ефективним, як з економічної, так і технологічної точки зору методів догляду слід віднести роздування підготовленого кінцевого шлаку азотом. Для підвищення стійкості футерівки американськими компаніями Practer і Grate Lakes Division ще в 70-ті роки минулого століття була запропонована технологія роздування шлаку в кисневому конвертері, що припускає вдування азоту високого тиску через верхню кисневу або допоміжну фурму з метою розбризкування шлаку по футерівці.

Спосіб роздування кінцевого шлаку азотом може бути використаний для ремонту практично всієї поверхні футерівки конвертера (рисунок 1.7). Подача азоту в конвертер здійснюється через занурювану кисневу фурму. Роздуванню азотом піддається шлак, що залишився в конвертері після зливу плавки. Залежно від консистенції шлаку в конвертер проводиться присадка сипких матеріалів в кількості 1,5-4,5 кг/т сталі. Кількість присаджуваного матеріалу залежить від фізико-хімічних властивостей шлаку, його кількості та регламентується внутрішньоцеховою документацією. При цьому шлак,

налипаючи на футерівку, охолоджується і твердне, створюючи міцну захисну кірку, що перешкоджає зносу вогнетривів [37-54].

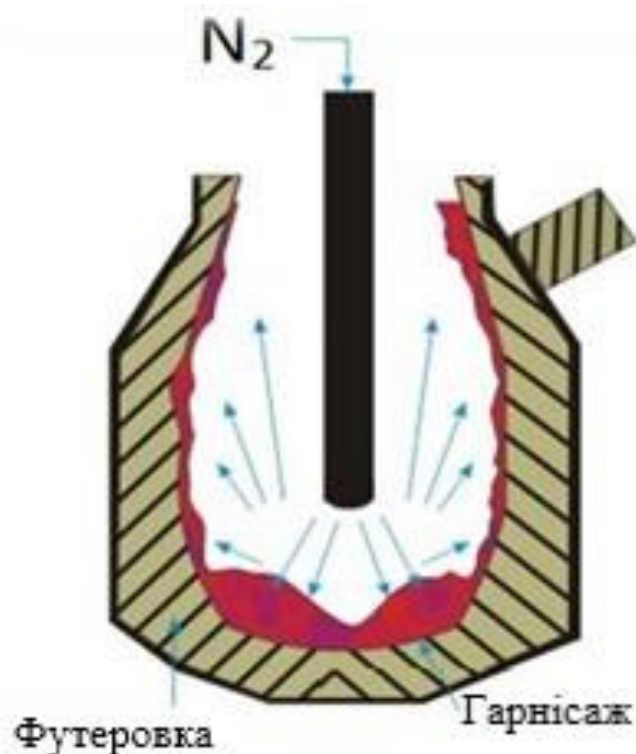


Рисунок 1.7. – Схематичне зображення розбризкування шлаку всередині конвертера.

При наявності в конвертері густого кінцевого шлаку перед присадкою сипучих матеріалів проводиться роздування шлаку киснем протягом 30-40 с. Роздування кінцевого шлаку азотом здійснюється при його тиску не менше 17 кгс/см^2 . Чистота азоту повинна бути не менш ніж 99%. Тривалість операції по роздуванню становить не менше 3-4 хв. Положення фурми під час роздування змінюється від 1,3-1,4 м до 0,9-1,0 м над рівнем рідкої ванни за три-чотири прийоми. Для отримання рівномірного по товщині шлакового покриття всієї поверхні футерівки здійснюються нахили конвертера з боку в бік щодо осі, що проходить через його цапфи, на кут $15^\circ - 20^\circ$ [55-57].

Матеріали, які використовуються в якості модифікаторів кінцевого конвертерного шлаку повинні мати властивості, характерні для певних

виробничих реалій як в технічному аспекті (фракція, механічна міцність, насипна щільність), так і в технологічному (хімічний і гранулометричний склад, час розчинення) [58-60].

Залежно від «якості» підібраних складів модифікаторів, а також від ефективності виконання самої операції роздування (тиск, витрата та чистота азоту, час роздування і т. ін.) залежить товщина і якість гарнісажного покриття, що наноситься. Ця величина зазвичай знаходиться в межах 15-40 мм/операція. У деяких випадках спостерігається динаміка нарощування шару шлаку на поверхні вогнетривів, що не завжди є позитивним фактором.

На сьогоднішній день існує, щонайменше, дві основні «концепції» по експлуатації футерівки конвертера. Одна з них базується на принципі постійного догляду за футерівкою та забезпеченні гранично можливого підвищення її стійкості. Вона знаходить широке застосування в США, Китаї, Росії та деяких інших країнах. Мета її застосування – збільшення тривалості робочих кампаній конвертерів, так звана «вічна футерівка». При цьому забезпечується підтримання на максимально допустимому рівні вмісту магнію в шлаці за рахунок застосування магнієвмісних матеріалів (у т. ч. флюсів). Вважається, що насиченість шлаку магнієм, у межах 9-12% не дає йому розчиняти футерівку та при належному догляді сприяє її довговічності [32-35]. Однак в останні роки ця тенденція дещо змінилась, що пов'язано з подорожчанням використовуваних матеріалів в даних регіонах.

Друга «концепція» виплавки сталі (європейська) істотно відрізняється від попередньої. Вона орієнтована, в першу чергу, на забезпечення максимального виробництва сталі за рахунок мінімального циклу плавки (32-34 хв). При цьому всі операції щодо догляду за вогнетривкою футерівкою зводяться до мінімуму. Так, торкретування або підварювання здійснюється в міру необхідності за показаннями скануючих приладів. Роздування шлаку при цьому розглядається як додатковий захід. Обсяги його застосування обмежуються додатковою витратою матеріалів і необхідністю витрат часу на процес обробки, що знижує продуктивність конвертера. Роздування

використовується приблизно в обсязі 15-20% від усієї кількості плавок. Відповідно до цієї «концепції» відпадає необхідність не тільки в наведенні високомагнезійного шлаку, а й в частому нанесенні шлакового гарнісажу, на який зазвичай витрачається 3-4 хвилини. Отже, в цьому випадку основний акцент робиться на високоякісні вогнетриви, раціональну товщину робочого шару футерівки і комбіноване продування ванни (через її днище вдувається аргон або азот).

Конвертерні цеха України та ближнього зарубіжжя (зокрема, Росії) знаходяться декілька в інших умовах. «Нормальною» стійкістю футерівки конвертерів вважається 4-6 тис. плавок, у залежності від місткості агрегату та питомої вартості вогнетривів (рисунок 1.8), так як при більш високій стійкості витрати на догляд за конвертером протягом кампанії перевищують витрати на нову футерівку. Середня швидкість зносу «основної» футерівки становить близько 0,1-0,2 мм за плавку. При середній масі вогнетривкої кладки в 800-1300 т і вартості 700 - 1200 \$/тонну цегли питомі витрати і затрати складають – 0,8-1,3 кг/т і 0,7-1,2 \$/т придатної сталі.

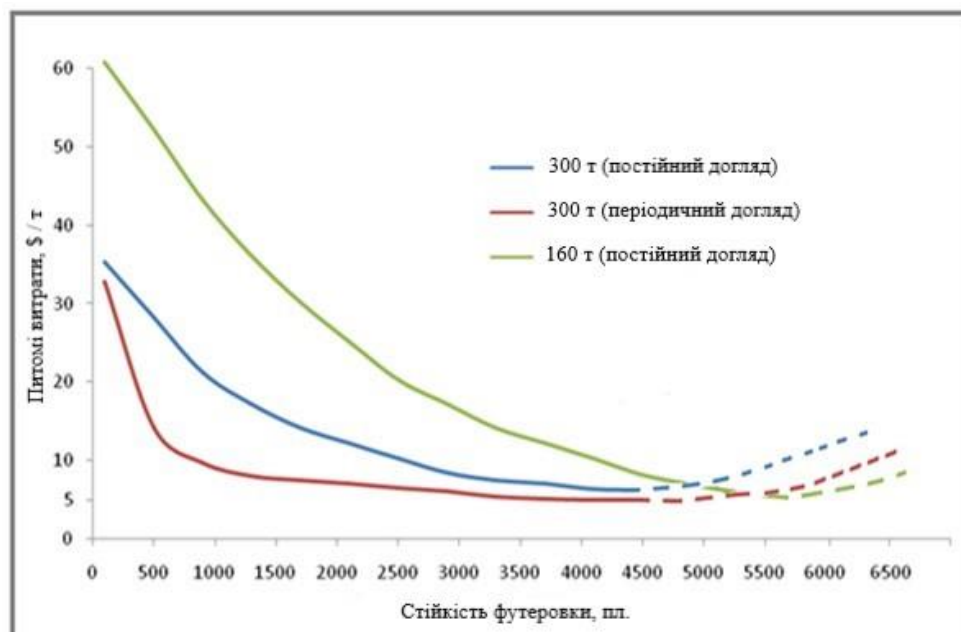


Рисунок 1.8. – Порівняльний аналіз питомих витрат на футерівку 3-х кампаній конвертерів (вогнетриви + догляд).

З представлених на рисунку 1.8 даних видно, що залежності носять екстремальний характер, тобто є точка перегину кривої (оптимум). Такі дослідження та розрахунки показують принцип мінімізації питомих витрат на виготовлення і обслуговування вогнетривкої футерівки в ході кампанії. Так, існує певний «оптимум», що досягається в тих чи інших виробничих умовах, який чітко показує доцільність подальшої експлуатації кампанії [7].

Слід зазначити, що даний показник може значно відрізняється навіть в межах одного і того ж конвертерного цеху в залежності від виробничих факторів, однак може бути досить просто і ефективно розрахований.

Оцінюючи перспективи розвитку ринку вогнетривів для сталеплавильного комплексу України, можна припустити подальший розвиток тенденції до зниження питомої витрати вогнетривів, а отже, і витрат на 1 тонну сталі за рахунок підвищення експлуатаційної стійкості футерівки конверторів.

Інтенсивний розвиток науки та технологічних процесів в області виробництва і експлуатації вогнетривів дозволило провідним світовим виробникам вогнетривких виробів досягти принципово нових якісних і кількісних показників по стійкості та питомій витраті їх продукції. Завдяки цьому питома витрата вогнетривів на виробництво 1 тони металопродукції за останніх три десятиліття для заводів з повним циклом зменшилась у 5,5-6,5 рази (з 40-45 кілограмів у 1970 році до 7-8 кілограмів у 2018-м). Вже сьогодні можна говорити, що найближчим часом ця цифра буде зменшена ще приблизно в 1,5 рази [5].

З огляду на сформульовану в Україні тенденцію щодо нарощування обсягів виробництва конвертерної сталі за рахунок наявних виробничих резервів найближчим часом всі підприємства, які мають у своєму складі «конвертерні площадки» будуть прагнути досягнення оптимальних меж по стійкості футерівки, відповідної мінімальним питомими витратами. У зв'язку з цим найбільш перспективними «виглядають» технологія роздування шлаку азотом і гарячий ремонт методом підварювання саморозтічними масами, як

ефективні методи догляду за футерівкою протягом кампанії конвертера з мінімальними питомими витратами. Розробка нових видів магнезійних модифікаторів і мас для цих цілей, переважно на основі вітчизняної сировинної бази, для конкретних виробничих умов є актуальною дослідницькою задачею даної роботи.

1.3 Аналіз ефективності використання сучасних магнезійних додаткових матеріалів, модифікаторів і мас

Нанесення підготовленого модифікованого кінцевого шлаку шляхом його роздування азотом є перспективною та відносно маловитратною технологією [62]. Головним фактором, що забезпечує формування зносостійкого гарнісажного покриття, а відповідно високою стійкості робочої футерівки, як конвертерів, так і ковшів, є застосування спеціальних магнезійних флюсів для підготовки шлаку з підвищеними гарнісажними властивостями і низькою «агресивністю» до вогнетривів.

Найбільш перспективною альтернативою торкретування локального зношування, а також ремонту методом підварювання штучними виробами, що не вимагає спеціального обладнання та підготовки персоналу, є підварювання саморозтічними магнезійними масами. Це спосіб ефективного відновлення найбільш зношених, важкодосяжних локальних ділянок футерівки конвертера.

З огляду на колосальну імпортозалежність українських підприємств від поставок магнезійних матеріалів, а отже високу собівартість сталі, актуальність розробки та виробництва «доступної» (вартість і транспортування) продукції на базі вітчизняної сировини не викликає сумнівів.

Тим часом, є доцільним вивчення можливості використання в якості компонентів флюсів-модифікаторів і саморозтічних мас виробничих і техногенних відходів української магнезійної сировини. Це, зокрема, може

бути лом периклазовуглецевої цегли, як основний матеріал, або доломітові відсівни та відходи, як здешевлюючий магнезійальний наповнювач і т. ін.

Швидкість зносу футерівки, викладеної з периклазовуглецевих вогнетривів, прямо пропорційна концентрації дифундуючого компонента в твердій та рідкій фазах, тобто залежить від концентрації оксидів магнію в шлаці. Спеціально розроблені флюси і модифікатори в поєднанні з відпрацьованою технологією їх застосування в даний час є найбільш актуальними та ефективними методами уповільнення швидкості її зносу. Тому зниження агресивного впливу високозалізистих шлаків на футерівку можна досягти введенням у плавку магнієвмісних матеріалів (флюсів) до рівня насиченості шлаку оксидом магнію. Згідно до вищезазначеного, це значення прийнято вважати в межах 9-12% (MgO). У цьому випадку (з теорії хімічної рівноваги оксидів магнію у вогнетривах і шлаку) розчинення периклазовуглецевого вогнетрива у шлаку практично припиняється [23-25, 61, 63-65].

Зазвичай у якості магнезійальних матеріалів (флюсів), використовують природні матеріали: обпалений доломіт, магнезит або доломітизоване вапно та ін. Використання природних флюсів дозволило підвищити стійкість футерівки конвертерів і тим самим збільшити їх продуктивність, знизити витрату вогнетривів на тонну сталі. Недоліком використання під час конвертерної плавки природних магнезійальних флюсів є наявність у них тугоплавких сполук (двох-кальцієвий і трикальцієвий силікати, периклаз), які повільно розчиняються у шлаці, не забезпечують отримання насиченого оксидом магнію шлаку, а також призводять до гетерогенізації шлакового розплаву.

Однак, на даному етапі слід чітко розділити всі існуючі марки магнезійальних флюсів на дві самостійні «групи»: призначені для наведення високомагнезійальних шлаків і для модифікування розплаву «під роздуванням» азотом. Принциповий поділ обумовлено різними фізико-

хімічними властивостями як матеріалів що додаються, так і самих шлаків, що піддаються модифікації.

Так, до прикладу, шлакоутворюючий флюс (який подається в плавку) повинен повністю розчинитися в початковому шлаці за найкоротший проміжок часу [66]. Флюс-модифікатор, навпаки, додається на кінцевий шлак (принципово інший хімічний склад) і асимілюється до певної фракції – 2-6 мм, що сприяє утворенню «тугоплавкого скелета» в охолодженому гарнісажі [67].

Відповідно введення в суспензію дисперсного наповнювача у вигляді 2-х фракцій дозволить досягти більшої концентрації твердої фази, у порівнянні з монодисперсним наповненням при постійній в'язкості. Істотно підвищується позірна в'язкість шлаку при наявності у ньому твердих частинок розміром 1-5 мм (наприклад, «зерна» периклаза), що викликають значне збільшення внутрішнього тертя [58, 68, 69].

В даний час розвиток виробництва синтетичних флюсів, що представляють собою новий клас композиційних матеріалів, які визначаються як «гетерогенні термодинамічні системи», вимагає чітко регламентованого підходу відповідно до розв'язуваного завдання. При цьому готова продукція (флюс) повинна складатись з двох і більше компонентів, що відрізняються за хімічним складом, фізико-механічними властивостями і розділених в матеріалі чітко вираженою межею. Введення кожного з компонентів до складу композиційного матеріалу буде надавати йому необхідні властивості, якими не володіє жоден з компонентів окремо [66, 70].

Слід зазначити, що використовувані в даний час в Україні магнезіальні матеріали (флюси, модифікатори, саморозтічні маси) у переважній більшості відносяться до імпортного виробництва. Пов'язано це, перш за все, з відсутністю розвіданих запасів копалин високомагнезіальної сировини (магнезитів) на нашій території. У свою чергу це визначає високу вартість імпортних флюсів (транспортування, мита і т. ін.), і не завжди їх високу якість. Як показує практика, якість матеріалів зворотно пропорційно

залежить від дальності транспортування та кількості перевантажень (пересипів). Це, як правило, робить відбиток на технології виробництва і специфіці вибору магнезійної сировини.

Ще одним беззаперечним мінусом використання імпортного продукту є неадекватна виробничому ланцюжку залежність підприємства від тимчасових поставок імпортерами. Так, наприклад доставка матеріалу з КНР становить від 60 до 90 діб.

На ринку вогнетривів України основними постачальниками подібних матеріалів є компанії «Dalmond» і «Puyang». Обидві є імпортерами з КНР, що зумовлює високу вартість продукту, а також низьку «гнучкість» поставок за рахунок зарубіжної логістики, що, в кінцевому рахунку, веде до підвищення питомих витрат на 1 т сталі.

З огляду на вищенаведене, слід зазначити, що існує серйозна практична необхідність у розробці та виробництві оптимальних синтетичних магнезійних матеріалів певних фізико-хімічних властивостей і структури для конкретних виробничих умов, переважно на основі недефіцитної, вітчизняної сировини і техногенних відходів.

Особливої уваги заслуговує сировина, що відноситься до так званих відходів видобутку і виробництва доломіту, магнезиту та вогнетривкої продукції на території України та ближнього зарубіжжя, а також лом периклазовуглецевої цегли (футерівка конвертера, сталерозливні ковші та ін.), наявний у значних кількостях на кожному металургійному підприємстві.

Так, в Україні щорічно утворюється близько 1 млрд т техногенних відходів, з яких лише 10-15% використовуються як вторинні ресурси, решта ж зберігається в різних сховищах, погіршуючи тим самим навколишнє середовище і займаючи великі площі земель. При цьому добре відомо, що, з одного боку, переробка та утилізація відходів, використання їх у вигляді відносно дешевої сировини для металургійного виробництва можуть дати значне зменшення витрат на шихту, підвищення якості та конкурентоспроможності, а головне, зниження собівартості готової

продукції. З іншого боку, це допоможе вирішити екологічні проблеми очищення цілих регіонів, де скупчилися величезні техногенні родовища відходів. Переробка таких відходів шляхом брикетування здатна повернути їх в металургійний переділ у вигляді магнієвмісних брикетів, що представляють собою сировину з досить високою рентабельністю.

Окрім «відхідних» матеріалів, в якості здешевлюючих магнієвмісних дрібнодисперсних наповнювачів також можуть використовуватися різного роду супутні мінерали, зокрема серпентиніт і групи олівінів.

Окис магнію, володіючи високою хімічною активністю, інтенсивно реагує зі шлаками, істотно знижуючи їх хімічну активність по відношенню до магнезійної футерівки конвертора з подальшим загущенням його і нанесенням на футерівку у вигляді тугоплавкого гарнісажу [66, 71]. Поряд з досягненням необхідного вмісту MgO , у складі флюсу забезпечувалась мінімізація кількості «шкідливих» домішок. Зокрема, SiO_2 , що знижує основність, і Fe_2O_3 , що підвищує окислення та рідкорухомість шлаку.

Одним з основних критеріїв технологічної «якості» розроблених магнезійних матеріалів поряд з хімічним, є гранулометричний склад. Так, чітке регламентування фракційного складу кожного з компонентів дозволило сформулювати концепцію з розділення магнезійних флюсів на дві групи: 1) для продування плавки; 2) для модифікування шлаку під роздування «на гарнісаж».

Магнієвмісні матеріали в обох випадках (дві групи) найчастіше подають у вигляді брикетів різних хімічних складів і типорозмірів. Основні фізико-хімічні показники магнієвмісних брикетів різних фірм виробників наведено в таблиці 1.3. Загальний вигляд і типорозміри даних брикетів представлено на рисунку 1.9.

Ще одним важливим критерієм у виробництві флюсів є вибір зв'язуючої речовини та супутніх добавок. Наявність у брикетованих флюсах органічних або мінеральних сполук дозволяє, по-перше, міцно скріпити під дією високого тиску на брикет дрібні фракції флюсу, а по-друге, при введенні

в шлаковий розплав під дією високої температури органічна або мінеральна зв'язка з брикету вигорає, і він розпадається на дрібну фракцію. Така фракція швидко асимілюється шлаковим розплавом.

Таблиця 1.3

**Основні фізико-хімічні параметри магнієвмісних флюсів
різних фірм виробників**

Марка флюсу	Хімічний склад, %					Міцність, МПа
	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	C	
PN-FL-60	60-62	3-5	7-9	4-5	-	≥35
Dalslag P71	70-72	1-4	6-9	1-3	2-4	≥30
SOM 60	58-62	4-7	≤	1-3	-	≥35
ФОМ	60-65	5-7	≤	7-9	-	≥30
SNC-65	65-67	7-9	≤	3-5	-	≥25
БК-4	50-55	17-20	≤ 8	1-3	6-7	15-18
БК-8	58-60	15-17	≤ 8	1-3	6-7	15-18



Рисунок 1.9. – Зовнішній вигляд брикетованих магnezіальних флюсів різних типорозмірів і фірм виробників.

У якості органічних сполук може використовуватись синтетична смола або пек, етиленгліколь, бакеліт, меляса та т. ін. А в якості мінеральних сполук лінгосульфанати, рідке натрієве скло, ортофосфорна кислота, бішофіт і т. ін.

Якщо кількість органічних і (або) мінеральних сполук у складі флюса буде менше, ніж 1,0%, то він буде володіти низькими властивостями міцності внаслідок недостатнього зчеплення між шматочками флюсу в процесі брикетування. Це, в першу чергу негативно відображується на транспортуванні та технологічних «пересипах» матеріалу. При збільшенні у складі флюсу органічних і (або) мінеральних сполук більше 10%, безпосереднє виготовлення флюсу буде складним, тому що при стисненні сировинної маси виділиться рідка фаза органічних і (або) мінеральних сполук, що призведе до виходу з ладу пористих валків брикет преса.

В якості супутнього екзотермічної матеріалу до складу ряду флюсів вводиться вуглець у різних його модифікаціях. Так, в при взаємодії вуглецю у флюсі з оксидами заліза в рідкому шлаці в результаті екзотермічної реакції $C + FeO = CO + Fe$ виділяється теплова енергія і газоподібний продукт CO, що сприяє швидкому руйнуванню і асиміляції брикету шлаком. Крім цього, наявність вуглецю у флюсі необхідна для відновлення оксидів заліза, що містяться в шлаковому розплаві, зниження яких зменшує ерозію вогнетривів і знижує рідкорухомість шлаку. Вуглець до складу флюсу може бути введений у вигляді дрібної фракції коксу, антрациту, електродним боєм, кріптоломом і т. ін.

Подібні матеріали магнезійного складу використовуються для виробництва саморозтічних підварювальних мас, які досить широко представлені на ринку вогнетривів України і, переважно, є імпортними.

У таблиці 1.4. наведені найбільш ефективні магнезійні маси для гарячого ремонту футерівки конвертерів.

Таблиця 1.4

**Основні фізико-хімічні параметри
саморозтічних магнезіальних мас різних фірм виробників**

Марка	Хімічний склад, %				Об'ємна щільність, кг/м ³
	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	C	
PN-RXB	≥65	3-5	≤ 1,5	12-13	≥2,2
Dalrep 80	≥80	1-4	≤ 1	5-7	≥2,4
МПУРС	≥75	4-7	≤ 2,5	6-8	≥2,3
СРН-80	≥80	5-7	≤ 1	7-9	≥2,4
GIR-RB-X*	≥75	2-3	≤ 2	10-12	≥2,1

* - маса українського виробництва. Розробка автора.

Після проведення детального аналізу ринку вторинної магнезіальної сировини України були підібрані основні шихтові матеріали для розробки і виробництва маси. Це брукт періклазових, періклазовуглецевих, періклазохромітових виробів. Подібні матеріали представлені на ринку в достатній кількості, відносно до попиту на підварювальні маси, і так само є техногенними відходами металургійних підприємств, що потребують утилізації. При цьому спеціальні хімічні добавки, органічні і мінеральні зв'язуючі в Україні не виробляються, але імпортуються в достатній кількості для інших галузей виробництва. Такі матеріали і були взяті для проведення експериментів за розробленими методиками.

За відсутністю власних копалин «магнезитів» Україна має в своєму розпорядженні достатньо великі потужності з видобутку, переробки, збагачення доломіту, а також великі накопичення техногенних відходів магнезіальних складів. Всі ці матеріали можуть бути ефективно використані в якості здешевлюючих наповнювачів при виробництві флюсів та ремонтних мас для металургійної галузі.

Слід зазначити, що створення як універсального магнезіального модифікатора кінцевого конвертерного шлаку під технологію роздування азотом так і саморозтічної маси не представляється можливим, зважаючи на

різні технологічні особливості виробництва сталі на різних підприємствах України.

У даному випадку, актуальним є подальші дослідження щодо вдосконалення технології роздування шлаку азотом і гарячого ремонту – підварювання, як ефективного методу догляду за футерівкою протягом кампанії конвертера. При цьому розробка і вивчення ефективності нових видів ремонтних магнезійних матеріалів є невід'ємним завданням даної роботи.

Таким чином, виробництво високомагнезійних флюсуєчих добавок і мас на базі недефіцитної, вторинної сировини, а також ресурсів корисних копалин України і ближнього зарубіжжя є досить рентабельним. Організація такого виробництва в умовах діючих на території України підприємств вогнетривкої промисловості дозволить забезпечити не тільки гідну конкуренцію продукції, що імпортується, а й розвиток ресурсозберігаючих технологій металургії у масштабах регіонів країни.

1.4. Мета та завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії та технології конвертерної плавки, спрямованої на підвищення ефективності процесу виплавляння в частині збільшення стійкості футерівки за рахунок періодичного нанесення гарнісажного шару шляхом додавання спеціального флюсу та роздування шлаку азотом після випуску сталі, а також періодичного гарячого ремонту методом підварювання саморозтічними масами.

Для досягнення наведеної мети в роботі були поставлені та вирішені такі основні задачі:

– проаналізувати основні рішення в частині підвищення стійкості робочого шару футерівки конвертера, що використовуються в промисловості;

- вивчити основні методи та прийоми ремонту робочого шару футерівки конвертера;
- розробити фізичну модель для вивчення гідродинаміки рідкої ванни конвертера;
- дослідити особливості перемішування рідкої ванни конвертера під час продування;
- розробити фізичну модель для вивчення ефекту нанесення гарнісажного покриття в конвертері;
- визначити вплив фракційного і хімічного складу флюсу на ефективність нанесення гарнісажного покриття;
- розробити методики оцінки фізико-хімічних властивостей модифікованого шлаку та гарнісажного покриття;
- встановити взаємозв'язок між гранулометричним складом твердих частинок і в'язкістю шлаку, що використовується для набризкування шлаку;
- розробити методику гарячого моделювання процесу підварювання футерівки конвертера саморозтічними масами;
- розробити методику оцінки фізико-хімічних властивостей підварювального конгломерату;
- дослідити можливість використання для виробництва флюсів-модифікаторів і саморозтічної ремонтної маси вторинних матеріалів на основі магнезиту;
- розробити основні технологічні прийоми виробництва магнезіальних флюсів-модифікаторів і саморозтічних мас для конвертерів;
- дослідити ефективність розроблених флюсів-модифікаторів і саморозтічних мас у промислових умовах для нанесення гарнісажу та підвищення стійкості футерівки конвертерів.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Гідродинамічні, теплові і хімічні процеси, що протікають в металургійних агрегатах, характеризуються високими температурами, впливом агресивних шлаків і виділенням великої кількості шкідливих газів і абразивних пилоподібних частинок.

Виконання експериментальних досліджень пов'язаних, перш за все, з вивченням явищ тепломасопереносу, в таких умовах практично неможливе з міркувань безпеки персоналу. Крім того, серйозною перешкодою для проведення робіт на діючих промислових агрегатах є такий фактор, як втрата виробничого часу.

У подібній ситуації, а також при створенні нової техніки на стадії опрацювання конструкції машини, що проектується, чи агрегату, найбільш прийнятним шляхом вирішення виникаючих проблем слід вважати використання фізичного моделювання, як холодного (водного), так і високотемпературного.

2.1. Розробка фізичної моделі та методики дослідження гідродинаміки рідкої ванни конвертера

Фізичне моделювання, як один з методів наукових досліджень, передбачає заміну вивчення натурного зразка об'єкта, що цікавить або реалізованого з його допомогою технологічного процесу, проведенням експериментів на моделі, із забезпеченням умов протікання явищ, що мають ту ж фізичну природу.

При фізичному моделюванні натура і модель повинні бути пов'язані правилом Кирпичова-Гухмана: подібні системи мають подібно задані умови однозначності та чисельно однакові однойменні критерії подібності, складені тільки з величин, що входять в ці умови. Інакше кажучи, всі визначальні

процес критерії подібності попарно чисельно однакові в моделі та натурі, а безрозмірні записи умов однозначності тотожні [72].

Відомо [72-74], що фізичне моделювання процесів перемішування рідини є найбільш переважним при збереженні однакових геометричних розмірів досліджуваного агрегату і моделі. Однак, обсяг порожнини конвертерів, використовуваних в металургійному виробництві, становить 100-300 м³ (при масі металу 160-350 т), що робить вкрай складною техніку моделювання із збереженням геометричних розмірів, так як це пов'язано з великою трудомісткістю дослідницьких робіт і не завжди гарантує отримання абсолютно надійних даних фізичного моделювання.

У той самий час дослідження поведінки розплаву при продуванні замкнутого обсягу повітрям на прозорих фізичних моделях значно менших розмірів показали хороші результати [75-87], що і слугувало підставою для створення фізичної моделі конвертера значно менших розмірів, ніж реальний об'єкт.

Основними критеріями гідродинамічної оцінки процесів перемішування є [72, 74]:

– критерій Фруда, що характеризує подібність процесів, що відбуваються під дією сили тяжіння, що виражає співвідношення сил інерції та сил тяжіння:

$$Fr' = \frac{u^2}{g D}, \quad (2.1)$$

де u – швидкість потоку, м/с; D – визначальний лінійний розмір, м;
 g – прискорення вільного падіння, м/с².

– критерій Рейнольдса, що визначає співвідношення між силами інерції та силами тертя в рідині, що рухається:

$$Re = \frac{u D}{\nu}, \quad (2.2)$$

де ν – кінетичний коефіцієнт в'язкості, м/с².

– критерій гомохронності (критерій Струхаля), що характеризує співвідношення між силою інерції та величиною, яка враховує вплив нестационарності руху на швидкість рідини:

$$Ho = \frac{u \tau}{D}, \quad (2.3)$$

де τ – характерний інтервал часу.

Слід зазначити, що дотримання всіх вищезазначених критеріїв подібності одночасно неможливе. Так, не можна забезпечити одночасно дотримання критеріїв Фруда і Рейнольдса (це пов'язано з тим, що для забезпечення тотожності критеріїв моделі і апарату лінійний розмір потрібно в одному випадку зменшити, а в іншому – збільшити). Причому в більшості практичних випадків критерій Re перевищує значення 2320. При таких значеннях критерія настає область автомодельності, в якій гідродинамічний опір практично повністю визначається конфігурацією внутрішньої поверхні агрегата. Це означає, що вплив тертя о стінки менший у порівнянні з втратами, зумовленими інерційними силами, що виникають при зміні траєкторій течій і утворення вихорів. У такій автомодельній (квазі автомодельній) області дотримання ідентичності числа Re в натуральному вигляді та моделі стає необов'язковим.

Тому доцільно визначити найбільш ефективні критерії подібності для моделювання процесів гідро- та газодинаміки в конвертері, що, в кінцевому рахунку, забезпечить тотожність сукупності досліджуваних закономірностей.

З огляду на той факт, що при вдуванні газу в рідину вельми важливими представляються процеси, що відбуваються під дією сил тяжіння, що обумовлюють спливання бульбашок газу, і сил інерції, що визначають розвиток системи циркуляційних потоків у рідкій ванні, в рамках даної роботи в якості базових критеріїв подібності були прийняті критерій Фруда та критерій гомохронності (Струхаля).

Для розрахунків параметрів дуття, при розробці фізичної моделі був використаний модифікований критерій Фруда (Fr'), що дозволив визначити витрату і тиск газу для верхнього та донного продування.

$$Fr' = \frac{u^2}{gD} \times \frac{\rho_r}{\rho_p - \rho_r}, \quad (2.4)$$

де ρ_r та ρ_p – густина газу та густина рідини, відповідно, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Маючи розраховані витрати газу на продування, і визначивши критичні діаметри сопел верхніх і донних фурм, також були знайдені і вторинні параметри – тиск газу перед соплами та швидкість його закінчення [77].

Вибір моделюючих середовищ є однією із складових частин підготовки до проведення лабораторних експериментів. При фізичному моделюванні гідродинамічних явищ в якості середовища, що імітує розплав, може бути обрана практично будь-яка нев'язка рідина. Тому вибір моделюючої рідини залежить від розв'язуваних у процесі моделювання задач, так при дослідженні гідродинамічних потоків сталі, процесів перемішування і т. ін., як правило, використовується вода і повітря [82-87.]

Деякі фізичні властивості води та сталі представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Фізичні властивості води при температурі 20 °С і сталі при температурі 1600 °С

Характеристика	Вода	Сталь
Молекулярна в'язкість, μ , $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$	0,001	0,0064
Густина, ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	1000	7014
Кінематична в'язкість, $\nu = \mu/\rho$, $\text{м}^2/\text{з}$	10^{-6}	$0,913 \cdot 10^{-6}$
Поверхневий натяг, σ , $\text{Н}/\text{м}$	0,073	1,6

З таблиці 2.1 випливає, що вода при 20 °С і рідка сталь при 1600 °С мають практично однакову кінематичну в'язкість, що дозволяє на зменшених водних моделях вивчати різні процеси переносу (режим потоку, перемішування, рух присадок т. ін.) на сталеплавильних агрегатах (ковші, конвертер т. ін.) [82, 83].

Фізична модель була спроектована в масштабі 1:6 по відношенню до 160 т конвертера. При цьому конфігурація внутрішньої порожнини конвертера вибрана по розташуванню футерівки. Модель була виконана з органічного скла (плексиглас), що володіє високою прозорістю та легко піддається різним способам обробки (згинанню, різанню і т. ін.). Це дозволило точно скопіювати обрану конфігурацію контурів натурального зразка агрегату.

Модель конвертера була закріплена на 2-х цапфах встановлених на жорсткій рамі. Рама одночасно є опорою конвертера та платформою для встановлення моторизованого механізму переміщення верхньої фурми. Установку було оснащено фурмами для верхнього та нижнього продування (рисунки 2.1 і 2.2).

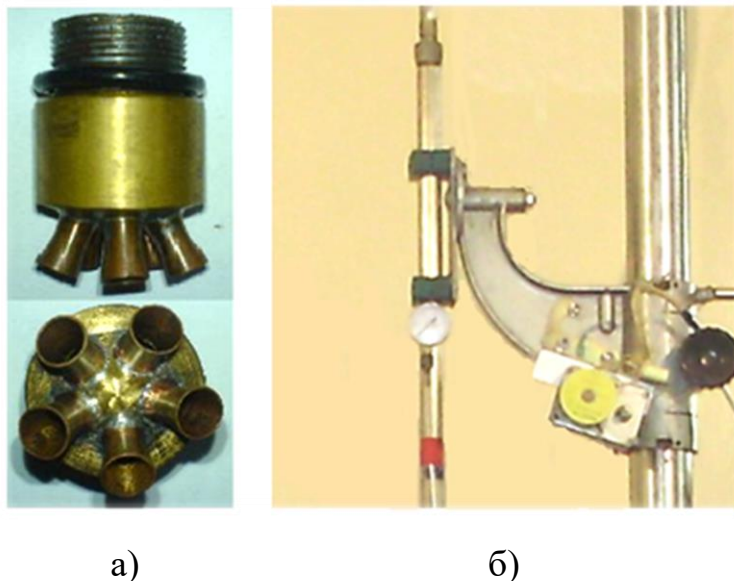


Рисунок 2.1. – Конструкція верхньої продувної фурми: а) – змінний наконечник (сопла Лавалю), б) – електромеханічний привід переміщення.

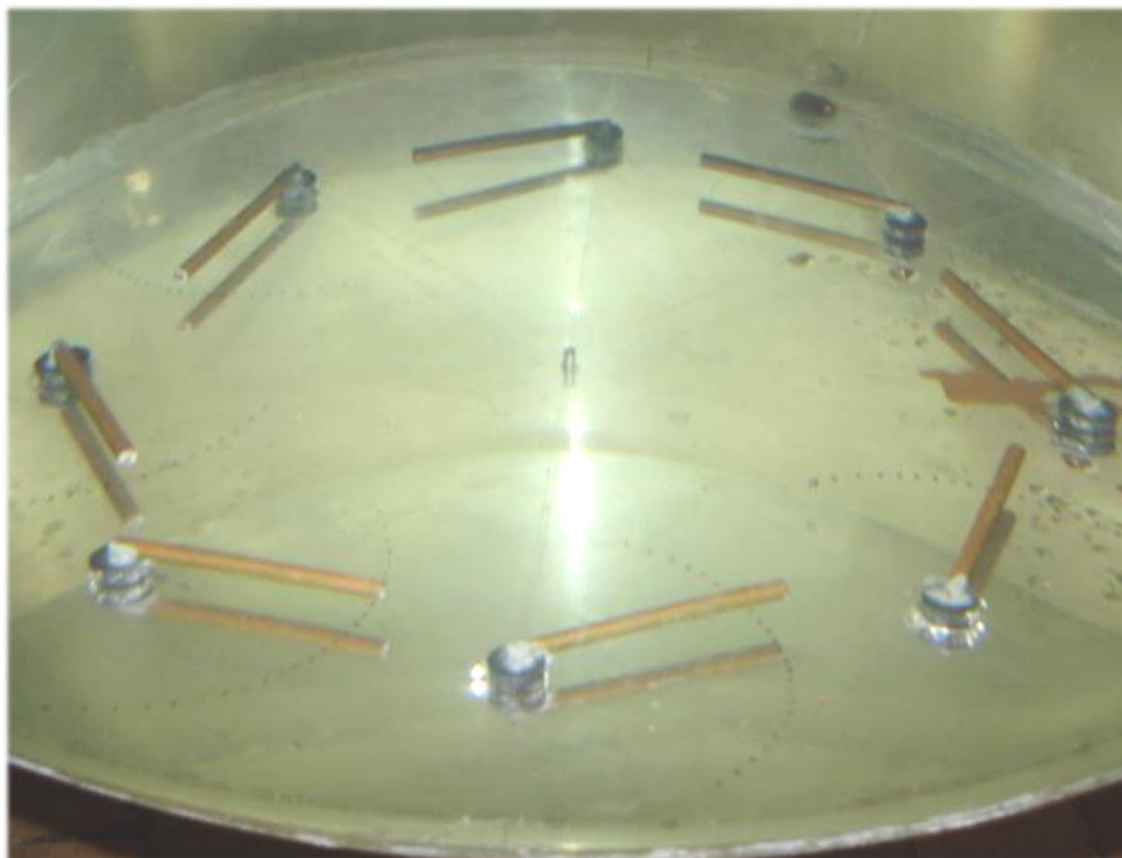


Рисунок 2.2. – Конструкція донної продувної системи.

Переміщення фурми здійснюється за допомогою рейки і зубчастої передачі редуктора від електричного двигуна. Тиск на зрізі сопла реєструвався манометром. У конструкції верхньої фурми передбачена зміна різних типів її наконечників.

Донні фурми розташовані по колу і мають універсальну конструкцію, що дозволяє оперативно змінювати їх розташування без порушення герметичності сосуду.

Загальний вигляд лабораторного стенду представлено на рисунку 2.3.

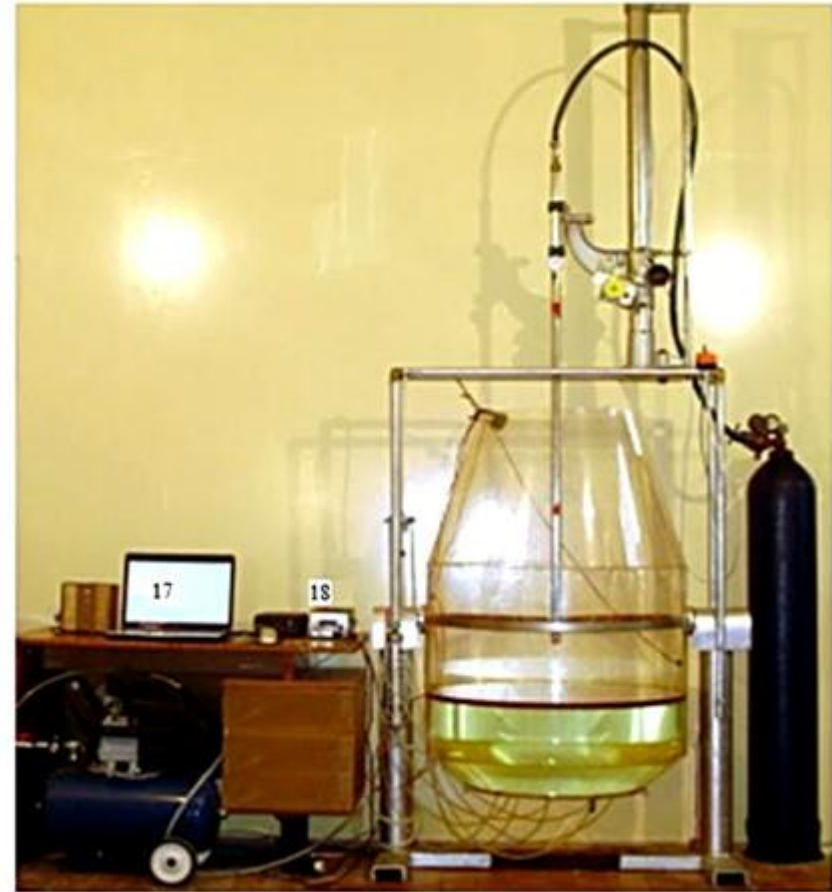
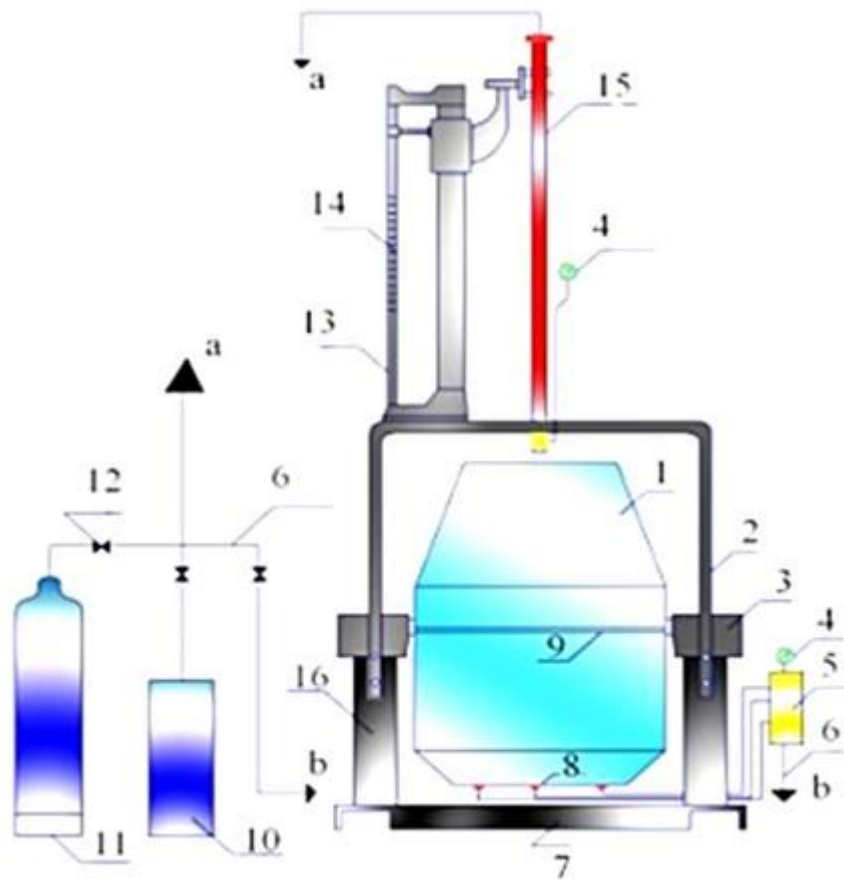


Рисунок 2.3. – Загальний та схематичний вигляд лабораторної установки: 1 – посуд (органічне скло), 2 – опора фурми, 3 – цапфи, 4 – манометр, 5 – колектор, 6 – магістраль, 7 – опора установки, 8 – донні продувальні елементи, 9 – опорне кільце, 10 – компресор, 11 – балон, 12 – кран, 13 – напрямна фурми, 14 – лінійка, 15 – фурма, 16 - стійка, 17 – програмне забезпечення, 18 – АЦП.

Узагальнені дані про динамічні параметри дуття і геометричні розміри моделі і експлуатовані сопла представлені в таблиці 2.2 і таблиці 2.3.

Таблиця 2.2

Геометричні розміри використовуваних наконечників верхньої фурми

Параметри	Сопло Лаваля
Кількість сопел, n_c	5
Критичний діаметр, $d_{кр.}$ (мм)	5,3
Довжина сопла, l_c (мм)	12
Довжина докритичної частини сопла (конфузор), l_d (мм)	2,7
Довжина закритичної частини сопла (дифузор), $l_{закр.}$ (мм)	9
Діаметр конфузора, d_k (мм)	6,6
Діаметр дифузора, $d_{диф.}$ (мм)	7,2
Напівкут розкриття дифузора, $\beta/2$ (°)	6
Кут нахилу сопла до вертикалі, (°)	22

Таблиця 2.3

Основні параметри моделі по відношенню до дослідного агрегату

Параметр	Реальний агрегат	Модель
Геометричний масштаб	1	1:6
Тип наконечника верхньої фурми	П'ятисопловий	П'ятисопловий
Критичний діаметр сопла ($d_{кр.}$), мм	32	5,3
Тиск перед соплами (P), МПа	1,5 – 1,6	0,17
Витрата газу на верхню фурму (Q), м ³ /хв	430 – 450	1,8
Висота підйому верхньої фурми (H_f), м	1,2 – 1,8	0,24
Кількість донних фурм	–	8
Діаметр сопел донних фурм ($d_{д.с.}$), мм	–	1
Положення донних фурм ($1/R$)	–	0,4R – 0,9R
Витрата газу на донне продування ($Q_{д.п.}$), м ³ /хв	–	0,01 – 0,05
Рівень рідкої ванни, м	1,5	0,27
Модифікований критерій Фруда (Fr)'	0,6 – 1,2	0,6 – 3,0

Як відомо, ефективність багатьох фізико-хімічних процесів, що протікають у кисневому конвертері, в значній мірі залежить від характеру і

інтенсивності примусового перемішування. У певних випадках перемішування збільшує швидкості протікання хімічних реакцій при перенесенні реагентів у місце їх протікання і видаляє продукти цих реакцій в шлак. Воно також впливає на тривалість температурного і хімічного усереднення металу в ванні (гомогенізація) і на інтенсивність ерозійного зносу вогнетривкої футерівки агрегату.

Доцільність застосування комбінованого продування в конвертері не викликає сумнівів, тому що за даною технологією працює більшість сучасних конвертерів у світі. Однак в ході експлуатації, крім очевидних переваг застосування донного перемішування, неминуче виникають і деякі технологічні проблеми. Така ситуація характеризується необхідністю проведення досліджень, як лабораторних, на фізичних і математичних моделях, так і виробничих, на діючих агрегатах, з метою подальшої оптимізації технології та підвищення стійкості футерівки агрегатів.

Для досягнення цих цілей була розроблена методика проведення експериментів, що включає два етапи. На першому етапі, спостереження і вивчення гідродинамічної поведінки рідини в конвертері особлива увага приділялася верхньому продуванню, а точніше параметрам реакційних зон – механічній взаємодії газового струменя з поверхнею ванни, через значний імпульс, що переходить в роботу по перемішуванню. Виміри проводились за допомогою фіксації та масштабування фото і відео матеріалів процесів, що протікають. Прозорість стінок моделі дала можливість спостерігати характер, напрямок, геометрію і інтенсивність руху потоків рідини, попередньо «підфарбованих» різного роду індикаторами.

На другому етапі досліджень, посилаючись на отримані дані в ході вивчення гідродинамічного стану конвертерної ванни, робили безпосереднє вимірювання часу перемішування рідини. Критерієм ефективності даного процесу був прийнятий показник, що визначається як час гомогенізації об'єму рідини.

Час гомогенізації визначався як період, необхідний для досягнення відповідної високої однорідності системи, необхідної з технологічної точки зору. Найбільш точним методом вимірювання часу перемішування є електрохімічний метод, з введенням у перемішувану рідину (воду) невеликої кількості розчину (10%) кухонної солі (250 мл) і вимірюванням електропровідності у двох точках об'єму. При цьому значення часу перемішування були найвищими, у порівнянні з іншими методами, а точність вимірювань становила $\approx 5\%$ [83].

У результаті в ході двох етапів досліджень вдалось встановити оптимальні режими продування і раціональне розташування дуттєвих пристроїв, що забезпечило максимальну ефективність гомогенізації рідкої ванни в сумі з мінімальним ерозійним впливом газорідних потоків на футерівку нижнього конуса конвертера.

Розроблена фізична модель у сукупності з методикою оцінки гідро- та газодинамічної поведінки конвертерної ванни дала можливість визначити характер і динаміку циркуляційного руху потоків сталі та шлаку і відповідно виявити зони підвищеного ерозійного зносу вогнетривкої футерівки. Оптимізація режимів продування і взаємного розташування продувних пристроїв дозволила не тільки інтенсифікувати процес ведення плавлення, але і мінімізувати нерівномірний, випереджуючий знос вогнетривів по зонам кладки футерівки конвертера.

2.2. Розробка математичної моделі гідродинаміки рідкої ванни конвертера

Математичне моделювання є важливим інструментом дослідження і розвитку способів виробництва сталі, що дозволяє з достатньою для практичного застосування точністю передбачити розподіл полів швидкостей потоків, час перемішування металевих розплавів, розрахувати вміст газу в газометалевій суміші при різних режимах продування розплавів, оцінити

інтенсивність протікаючих в обсязі агрегату тепло- та масообмінних процесів і т. ін. [88-94].

Математична модель гідродинамічної поведінки ванни конвертера виконана на основі отриманих даних у ході фізичного моделювання. Метою математичного моделювання була якісна і кількісна оцінка гідродинаміки рідкого розплаву при продуванні в конвертері та визначення зон підвищеного ерозійного зносу футерівки. Вихідні дані про параметри дуття і розташуванні продувних пристроїв вибиралися за результатами фізичного моделювання.

Розробка математичної моделі перемішування рідкої сталі в конвертері виконана з використанням прикладного пакету Ansys Int., який реалізує метод скінченних елементів (МСЕ), в рамках модуля Flotran, який відображає CFD (Computerized Fluid Dynamics) технологію моделювання. Модель розглядалася як нестационарна, турбулентна, з однофазним поданням розплаву – сталі.

Згідно з методологією пакету ANSYS Int. розробка математичної моделі включала такі основні етапи [91-94].

Препроцесорна стадія, що включає наступні операції:

- створення геометричної моделі аналізованої розрахункової області;
- завдання фізичних властивостей середовища (матеріалів) у розрахунковій області;
- генерація кінцево-елементної моделі (дискретизація) досліджуваної розрахункової області, тобто створення сітки кінцевих елементів;
- уточнення моделі граничними умовами: зовнішніми впливами (температур, теплових потоків, сил і т. ін.) і закріплень на межах області.

Дискретизація області включає встановлення числа, розмірів і форми елементів, які використовуються для побудови кінцево-елементної моделі. Елементи пов'язані один з одним у вузлових точках (вузлах) і в сукупності апроксимують форму розрахункової області.

Цей етап не має чіткого теоретичного обґрунтування. З одного боку, розміри елементів повинні бути обрані малими, щоб виходили точні результати. З іншого боку, застосування досить великих елементів значно скорочує процес обчислень. Тому остаточний вибір розмірів елементів проводиться, виходячи з фізичної сутності завдання.

Процесорна стадія, полягає у виконанні таких операцій:

- отримання на основі функцій кінцевих елементів частково-неперервної функції, визначеної на всій розрахунковій області;
- складання системи алгебраїчних рівнянь шляхом мінімізації деякої величини, пов'язаної з фізичною постановкою завдання, і рішення цієї системи щодо вузлових значень – температури в задачах теплопровідності, зсувів в міцнісних завданнях і т. ін. Ця стадія виконується автоматично, вбудованими процедурами пакету.

Постпроцесорна стадія складається з наступних етапів:

- висновок результатів розрахунку в графічній і текстовій формах (поля швидкостей, деформацій та напружень, потоки тепла, температурні градієнти та ін.);
- аналіз отриманих результатів.

Математичну основу моделі складають закони збереження маси, імпульсу і енергії, які представлені у вигляді наступних рівнянь [92-93].

Рівняння нерозривності, що відповідає закону збереження маси, має вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0, \quad (2.5)$$

де v_x, v_y, v_z – компоненти вектора швидкості у напрямках x, y і z відповідно; ρ – густина; x, y, z – глобальні декартові координати; t – час.

Закон збереження імпульсу, що зв'язує напруження та швидкість деформації рідини для трьох напрямів, можна представити у вигляді рівнянь Нав'є-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial z} + T_x; \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_y v_z)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial z} + T_y; \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_z v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_z)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial z} + T_z, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де g_x, g_y, g_z – компоненти вектора прискорення вільного падіння в напрямках x, y і z відповідно; μ_e – ефективна в'язкість; T_x, T_y, T_z – компоненти вектора в'язких втрат у напрямках x, y і z відповідно:

$$T_x = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial v_z}{\partial x}; \quad (2.9)$$

$$T_y = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial v_z}{\partial y}; \quad (2.10)$$

$$T_z = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial v_z}{\partial z}. \quad (2.11)$$

Ефективна в'язкість враховує ламінарну в'язкість μ (яка визначається властивостями розплаву) і турбулентну в'язкість μ_t (яка розраховується за моделлю турбулентності):

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (2.12)$$

Для опису турбулентності була використана SST модель (Shear Stress Transport Model) (двошарова модель Ментера), яка поєднує в собі переваги як стандартної k-ε моделі, так і k-ω моделі. При цьому рівняння кінетичної енергії і питомої швидкості дисипації турбулентної кінетичної енергії мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \min(\mu_t \Phi, C_{1mt} \varepsilon) - C_{\mu} \rho k \omega + \frac{C_4 \beta \mu_t}{\sigma_k} \left[g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right]; \quad (2.13) \\ \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x \omega)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y \omega)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z \omega)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) + \gamma \rho \Phi - \beta' \rho \omega^2 + \frac{(1-C_3) \beta \rho}{\sigma_t} \left[g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \\ + \frac{2(1-F_1) \rho \sigma_\omega^2}{\omega} \left[\frac{\partial k}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial k}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right], \quad (2.14) \end{array} \right.$$

де C_μ – коефіцієнт турбулентності, $C_\mu = 0,09$; k – турбулентна кінетична енергія; ε – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії; $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – константи турбулентності відповідно рівні $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $C_3 = 1,0$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_t = 0,85$; $\sigma_\varepsilon = 1,0$; Φ – дисипація в'язкості, що враховує внутрішні джерела тепла.

$$\Phi = \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \frac{\partial v_x}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \frac{\partial v_x}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \frac{\partial v_y}{\partial z} \quad (2.15)$$

Константи моделі SST: $C_{\text{limt}} = 10^{15}$; $\sigma_{k1} = 1.176$; $\sigma_{\omega 1} = 2.0$; $\gamma_1 = 0.5532$; $\sigma_{\varepsilon 1} = 0.075$; $\sigma_{k2} = 1.0$; $\sigma_{\omega 2} = 1.168$; $\gamma_2 = 0.4403$; $\sigma_{\varepsilon 2} = 0.0828$; F_1 – функція змішування, яка дорівнює одиниці поблизу поверхні стінок і нулю далеко від стінок (за допомогою F_1 SST модель автоматично перемикається на k - ω модель поблизу стінок і на k - ε модель далі від стінок).

Переходячи від запису рівнянь у часткових похідних до матричної формі, формується система рівнянь, рішенням яких є значення компонентів вектора швидкості та тиску в межах розглянутої розрахункової області. Цей перехід виконується вбудованими алгоритмами пакета ANSYS [91].

За початкову інформацію для створення геометричної моделі розрахункової області прийнято креслення футерівки 160 т конвертера. В якості розрахункової області при створенні геометричної моделі прийнято внутрішній обсяг агрегату, займаний рідкої сталлю глибиною $H_b = 1500$ мм (рисунок 2.4). Модель побудована у тривимірній постановці.

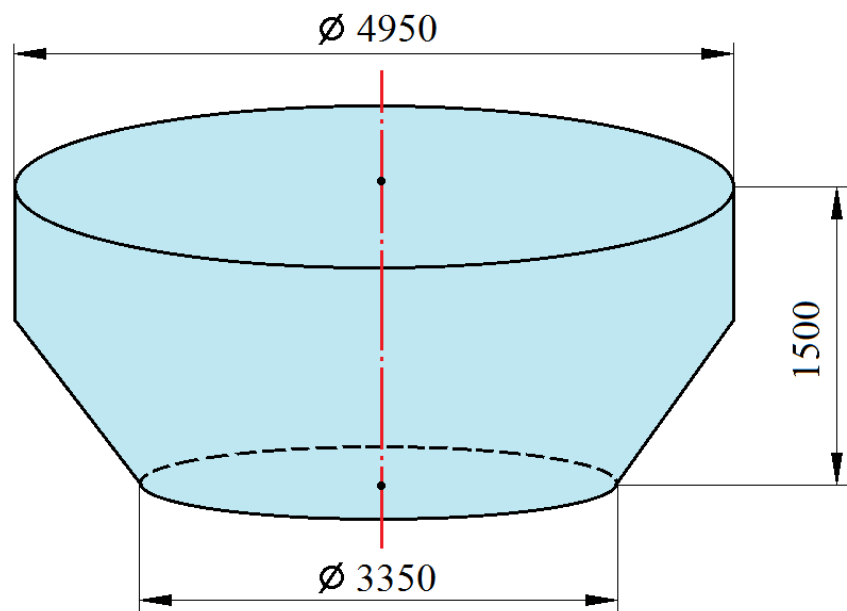


Рисунок 2.4. – Основні розміри розрахункової області ванни 160 т конвертера.

При вирішенні задачі в тривимірній постановці в якості основи використовувалася двовимірна розрахункова область, яка потім шляхом застосування операції «обертання» навколо вертикальної осі перетворювалася в сукупність обсягів, що відповідають обсягу, займаного сталлю.

У модулі Flotran передбачено два типи кінцевих елементів: двовимірні 4-х вузлові - 2D FLOTRAN 141 і тривимірні 8-ми вузлові - 3D FLOTRAN 142, які відповідно застосовуються в двовимірній і тривимірній постановках задачі.

Для кожної лінії, що утворює розрахункову область, в ручному режимі задавалося кількість поділів, відповідних числу елементів. Для створення регулярної сітки прагнули, щоб розрахункова область була обмежена 6 площами. В окремих випадках використовувалось довільне розбиття на кінцеві елементи. В результаті була сформована кінцево-елементна модель розрахункової області, яка представлена на рисунку 2.5.

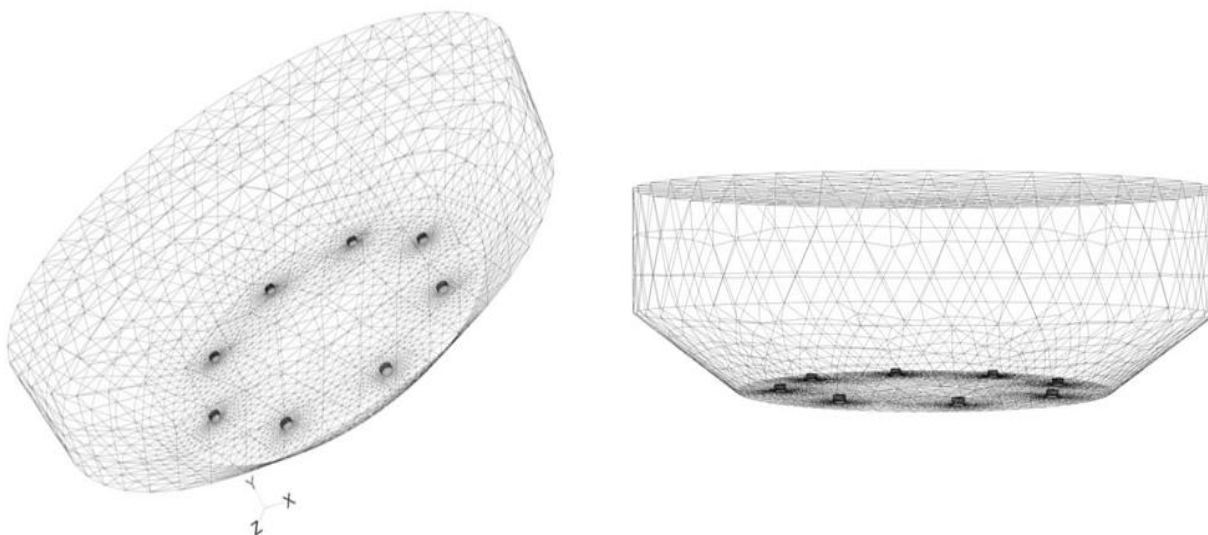


Рисунок 2.5. – Вид кінцево-елементної моделі розрахункової області конвертерної ванни (тривимірна задача, довільна сітка).

Дослідження виконувалися в постановці нестационарної задачі для нестисливої рідини з турбулентним плином. Кількість ітерацій, які використовуються при вирішенні системи рівнянь, приймалося рівним 52. Інтервал часу, для якого здійснювався пошук рішення (тривалість продування), становив від 600 до 1200 с.

Математична модель перемішування розплаву враховувала густину і в'язкість сталі. Ці параметри розглянуто залежними від температури, для виразу залежностей. На підставі довідкових даних були розраховані коефіцієнти в рівняннях, що описують дані властивості. Теплопровідність і теплоємність сталі приймалися постійними і незалежними від температури в розглянутому діапазоні. У результаті в модель були внесені наступні вирази, що описують властивості рідкої сталі (Т - температура, К):

– густина, кг/м^3

$$\rho = 7700 - 95,7 \cdot 10^{-3}(T - 293) - 15,471 \cdot 10^{-6}(T - 293)^2 \quad (2.16)$$

– в'язкість, $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$

$$\mu = 0,0035 \exp \left[10699,32 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{1473} \right) + 3,8 \cdot 10^{-11} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{1473} \right)^2 \right] \quad (2.17)$$

– теплоємність, $c = 840 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

– теплопровідність, $\lambda = 27 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Для кожного з розраховуваних параметрів (складові швидкості, тиск, і ін.) було задано методи вирішення системи рівнянь та похибка для пошуку їх збіжності. Далі автоматично виконувалось рішення систем рівнянь для кожного тимчасового кроку.

Результатами розрахунку були значення векторів швидкості та сумарної швидкості в кожній вузловій точці або загальному обсязі розрахункової області для кожного тимчасового кроку, які можна представити у табличній і графічній формі (векторній або контурній). Також була можливість оцінити кінетичну енергію і її дисипації, ламінарну та ефективну в'язкість розплаву, дотичні напруження і турбулентність у пристінковій зоні.

Для прикладу отриманих в ході математичного моделювання даних, на рисунку 2.6 представлена графічна картина характеру та швидкості руху потоків в обсязі рідкої ванни конвертера.

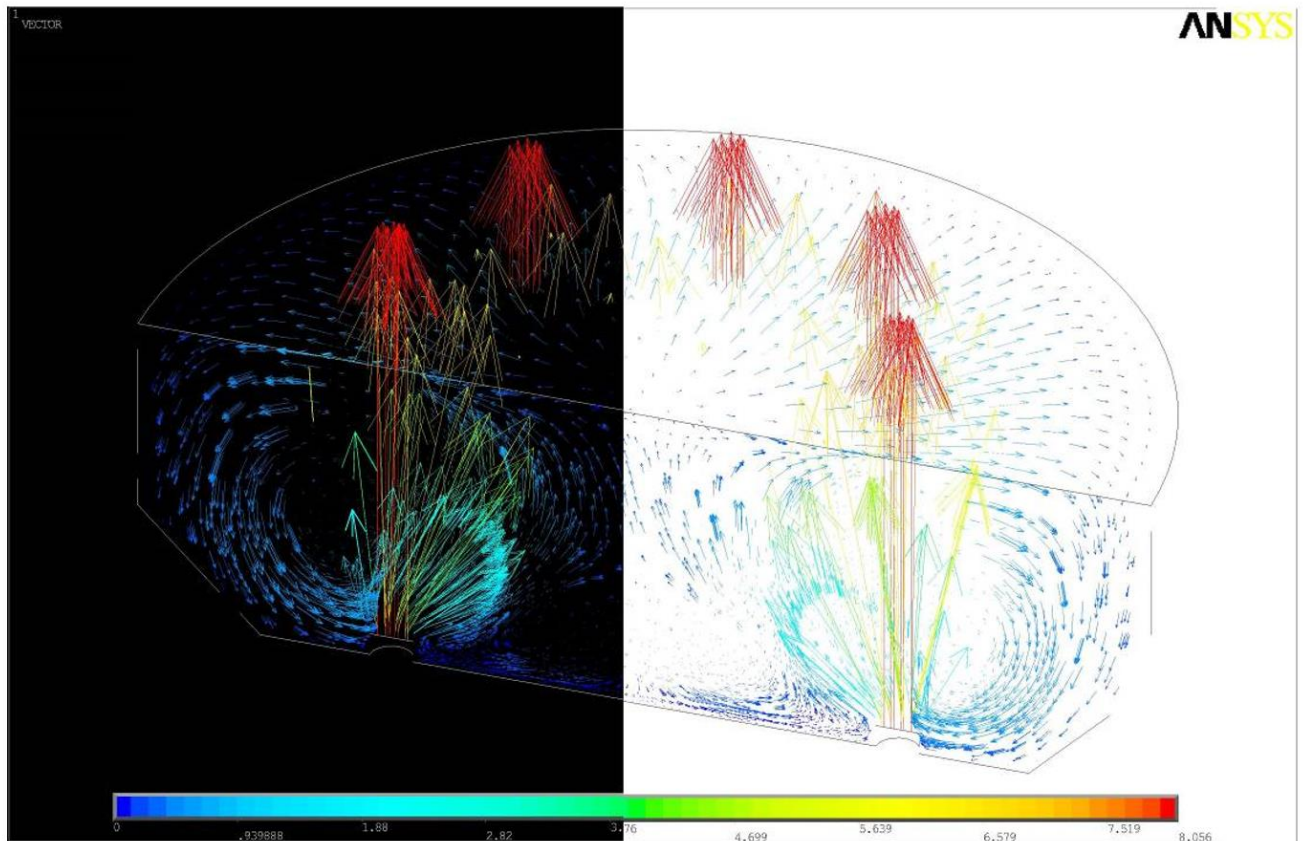


Рисунок 2.6. – Поле розподілу векторів швидкостей потоку в рідкій ванні конвертера (перетин).

Розроблена математична модель перемішування розплаву в конвертері у достатній мірі дозволяє оцінити гідродинамічний стан ванни в процесі продування і виконати дослідження з оцінки оптимальних режимів вдування газу, включаючи його витрата, положення продувних вузлів і ймовірний ерозійний знос футерівки. Це досягається завдяки отриманню векторних картин швидкостей руху потоків розплаву на тривимірній моделі, що дозволяє кількісно оцінювати характер переміщення рідини. Крім того, в

розробленій моделі може бути оцінено розподіл турбулентної кінетичної енергії за обсягом.

2.3. Розробка фізичної моделі та методики дослідження процесів нанесення захисного гарнісажного шару на футерівку конвертера

Нанесення на робочий шар футерівки гарнісажу методом роздування через фурму струменями азоту при попередньому модифікуванні кінцевого конвертерного шлаку є ефективним методом збільшення ресурсу футерівки кисневого конвертера. Формування гарнісажу на поверхні футерівки конвертера відбувається за рахунок твердіння шлакової суспензії, отриманої модифікуванням кінцевого конвертерного шлаку спеціальними магнезійними матеріалами [70,71].

Механізм роздування шлаку азотом вивчався за допомогою фізичного моделювання [95, 96], як правило, на холодних моделях. У таких моделях використовуються безрозмірні параметри (критерії подібності) з метою отримання кількісних даних про той чи інший механізм або явище з можливістю перерахунку на «натурний об'єкт».

З метою отримання додаткових даних про механізми нанесення гарнісажного покриття на футерівку конвертера була розроблена фізична модель 160 т конвертера в масштабі 1:20.

В якості визначального критерія подібності було обрані модифікований критерій Фруда (Fr) $= idem$ [72]. На рисунку 2.7 представлено загальний і схематичний вигляд лабораторного стенду для вивчення процесів нанесення шлакового гарнісажу. Узагальнені дані про динамічні параметри дуття і геометричні розміри моделі і експлуатовані сопла представлені в таблиці 2.4.

Установка моделі виконана в масштабі 1:6 і оснащена фурмою для верхнього продування. Прозорість стінок моделі забезпечила можливість безперервного спостереження, а також фото і відео фіксації процесу налипання гарнісажного шару. Переміщення фурми здійснюється за допомогою рейки і зубчастої передачі редуктора від електричного двигуна. Тиск на зрізі сопла реєструється манометром.

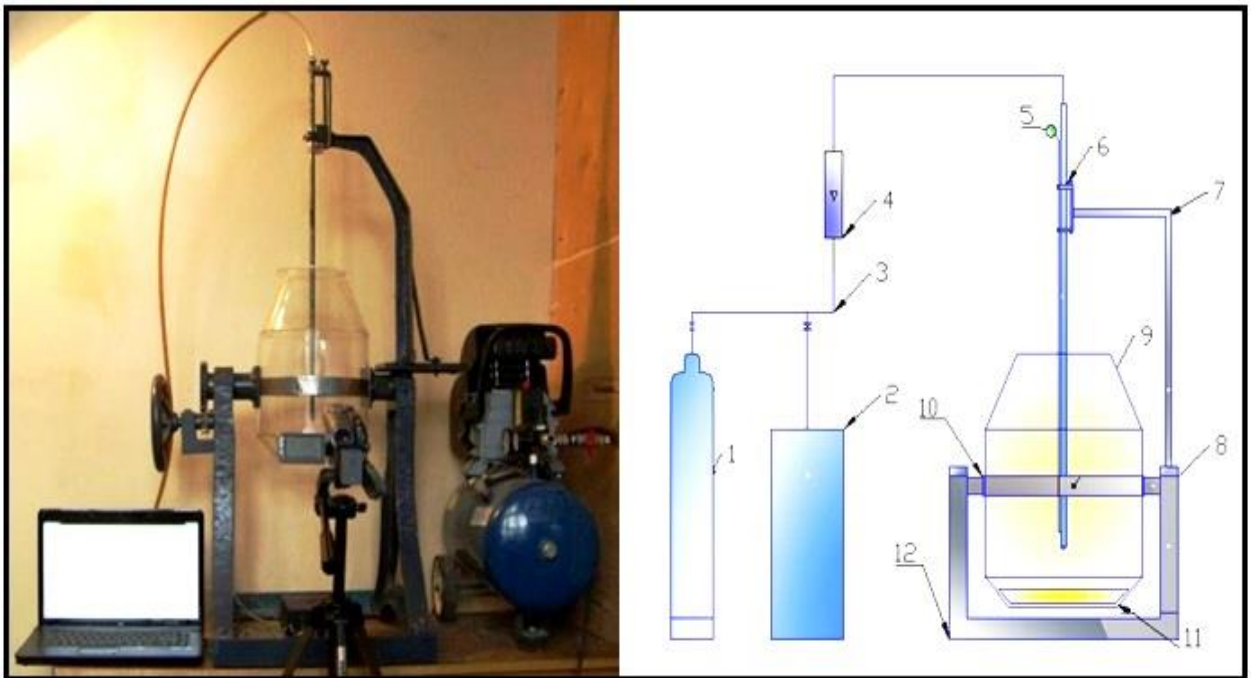


Рисунок 2.7. – Загальний та схематичний вигляд лабораторної установки, де: 1 – балон, 2 – компресор, 3 – трубопровід, 4 – ротаметр, 5 – манометр, 6 – фурма, 7 – опора фурми, 8 – цапфа, 9 – посуд, 10 – опорне кільце, 11 – моделююча рідина.

Таблиця 2.4

Основні параметри фізичної моделі конвертера

Параметри	Реальний агрегат	Модель
Геометричні характеристики, масштаб	1	1:20
Обсяг шлакової ванни, м ³	5-6	$7 \cdot 10^{-4}$ - $8 \cdot 10^{-4}$
Рівень шлака, м	0,25-0,35	0,025-0,035
Рівень рідкої ванни, м	1,5-1,6	0,08
Висота підйому верхньої фурми (H_{ϕ}), м	0,5 – 1,8	0,02-0,1
Тип наконечника верхньої фурми	Шестисопловий	Шести - / п'ятисопловий
Діаметр критичного перерізу сопла ($d_{кр}$), мм	32	1,7/1,9
Довжина сопла, l_c (мм)	87	4
Тиск перед соплами (P), МПа	1,5 – 1,6	0,13
Витрата газу через верхню фурму (Q), м ³ /хв	430 – 450	0,054
Модифікований критерій Фруда (Fr)'	0,6 – 1,2	0,7-3,3

Роздування рідкої ванни здійснювали двома типами наконечників з 6-ю і 5-ю соплами. Конструкцію наконечників було обрано, як найбільш поширену в умовах конвертерних цехів України.

В якості продувального газу використовувалось повітря високого тиску. Основною особливістю рідини моделюючої гарнісажне покриття, що наносили, була в'язкість, характерна для підготовленого шлаку насиченого оксидом MgO у межах 7-9% і фізична природа, що забезпечує швидке твердіння шару, що наноситься і адекватну адгезію до поверхні сосуда.

Необхідні властивості були досягнуті сумішшю синтетичного клейстера зі спеціальними «в'язучими» добавками і сплаву Вуда з дрібнодисперсним наповнювачем. В якості в'язучої добавки диспергованої в синтетичному клейстері використовувався тіосульфат натрію ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Сплав Вуда «насихували» молібденовою крихтою. Добавки в обох випадках мали фракцію 0,5-2 мм.

Дисперсні наповнювачі вибирались відповідно до густини моделюючих середовищ, які забезпечують їх співвідношення на рівні $\approx 1/1,3$. Таке співвідношення густини визначається подібністю диспергування важкорозчинної фракції періклазового зерна (густина – 3,7-4,0 г/см³) у конвертерного шлаку (густина – 3,0-3,5 г/см³). Так, розчин синтетичного клейстеру має густину 1,2 г/см³, а тіосульфат натрію – 1,67 г/см³ (1/1,38). Густина сплаву Вуда – 9,72 г/см³, а молібдену – 10,22 г/см³ (1/1,10).

На рисунку 2.8 представлена початкова стадія роздування шлаку з розкриттям каверн з об'єднаними зовнішніми межами.

Набризкування здійснювали, як безперервно, так і дискретно для визначення маси гарнісажу, що наноситься. Прозорість стінок дала можливість оцінці рівномірності покриття та динаміки його «наростання» за рахунок зміни густини світлового потоку, що пропускається в тому чи іншому секторі сосуда.

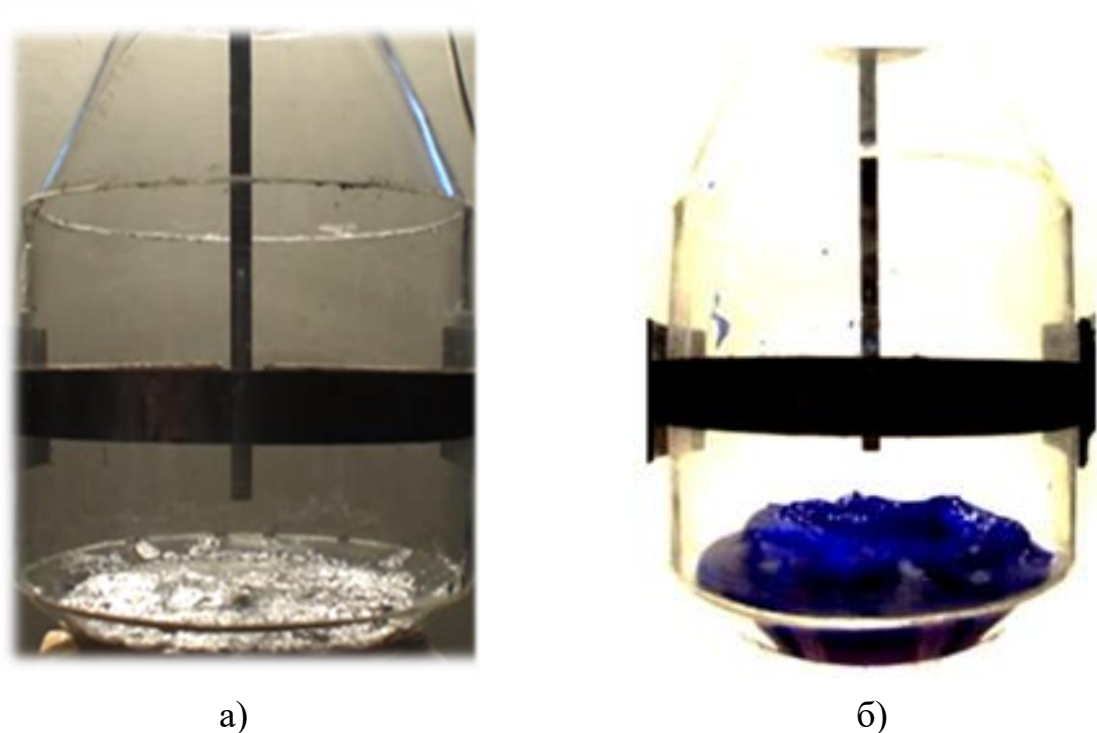


Рисунок 2.8. – Моделювання процесу роздування шлаку, початкова стадія (1 с) і «розкриття» каверн; а) – модифікований сплав Вуда, б) – підфарбований синтетичний клейстер.

Спеціально підібрана за своїми фізичними властивостями моделююча речовина, забезпечила можливість отримання кількісних даних (рівномірність, «ефективна» кількість, у т. ч. в одиницю часу, гарнісажного шару) про механізм і якість гарнісажу, що наноситься в залежності від зміни параметрів продування (висота фурми, витрата і т. ін.), а також властивостей шлаку.

В цілому розроблена фізична модель і методика набризкування гарнісажного шару дозволяє оптимізувати технологічні параметри роздування, такі як витрата дуття, положення верхньої фурми і т. ін. Фізичне моделювання процесу нанесення гарнісажного шару за допомогою управління фізичними властивостями шлаку дозволяє забезпечити необхідну рівномірність покриття, що наноситься в тій чи іншій зоні випереджаючого зносу футерівки.

2.4. Розробка методики оцінки фізико-хімічних властивостей модифікованого шлаку і гарнісажного покриття

Моделювання процесів, що супроводжують механізми модифікування кінцевого шлаку, утворення гарнісажного покриття, його фізико-хімічних властивостей, дає можливість прогнозування його якості у виробничих умовах.

Розроблена під час досліджень комплексна методика включає оцінки впливу фізичних властивостей кінцевого шлаку і вмісту в ньому MgO після модифікування на ефективність адгезії до робочої поверхні періклазоуглеродистої цегли (у т. ч. смочуваності) і температурного інтервалу плавлення (тугоплавкості) гарнісажу. Ці основні фактори, в кінцевому рахунку, і визначають стійкість захисного покриття.

Для проведення досліджень, в частині оцінки налипання гарнісажного покриття у залежності від фізико-хімічних властивостей шлаку, запропонована в роботі оригінальна методика реалізовувалась в 3 етапи [97,98].

На першому етапі особливу увагу було приділено підготовці зразків вогнетривких «підкладок», що імітують двостадійний знос футерівки агрегату. Для досягнення подібності поверхонь вогнетривкого матеріалу модельні зразки відпалювали у нагрівальній печі з метою звільнення поверхневого вуглецю і імітації першої стадії зносу. Відпал здійснювали методом термоцикування (1000↔1600 °C) протягом 1 години (2-3 термоцикла) в окислювальній атмосфері. Потім «підкладка» при температурах конвертерного процесу просочувалась шлаком – друга стадія зносу вогнетрива. У кінцевому рахунку, була отримана адекватна поверхня вогнетрива, схожа з реальною, схильною до зносу в процесі кампанії конвертера.

На рисунку 2.9 представлено зовнішній вигляд підготовленого зразка вогнетривкої підкладки розміром 30×30×30 мм.



Рисунок 2.9. – Підготовлена вогнетривка підкладка, що імітує футерівку агрегату (30×30×30 мм); А – глибина інфільтрації шлака у вогнетрив.

На другому етапі здійснювали безпосередню зміну конвертерного шлаку поруч спеціально підготовлених магнезійних матеріалів, що мають різний хіміко-мінералогічний склад. На цьому етапі проводились необхідні якісні та кількісні виміри параметрів: час розчинення присадок, характер взаємодії шлаку та модифікатора, в'язкість розплаву, ступінь його засвоєння, відбір проб для визначення хімічного і мінералогічного складів.

Експериментальна установка складається з наступних основних частин (рисунок 2.10). Електродвигун 1 постійного струму, закріплений до корпусу за допомогою спеціально виготовлених охоплюючих його сталевих деталей на штативі 2, передає обертання валу зі шпинделем 3 через блок підшипників 4, який нижньою частиною поміщений в мідний холодильник 5 для

запобігання можливого впливу температури на силу тертя в підшипниках. Розплав шлаку поміщений у молібденовий тигель 6, в дно якого вводили термопару 7 ВР-5/20. Тигель зі шлаком розташували в ізотермічній зоні печі так, що температури в тиглі і у районі термопари були однакові. Величину термо-е. д. с. і зміна сили струму на якорі електродвигуна при зміні навантаження на ньому фіксували за допомогою реєстраційного блоку 9 з аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) для передачі даних на комп'ютер 10. Спеціальна програма обробляла дані, що надходили на комп'ютер і будувала графік залежності в'язкості від температури.

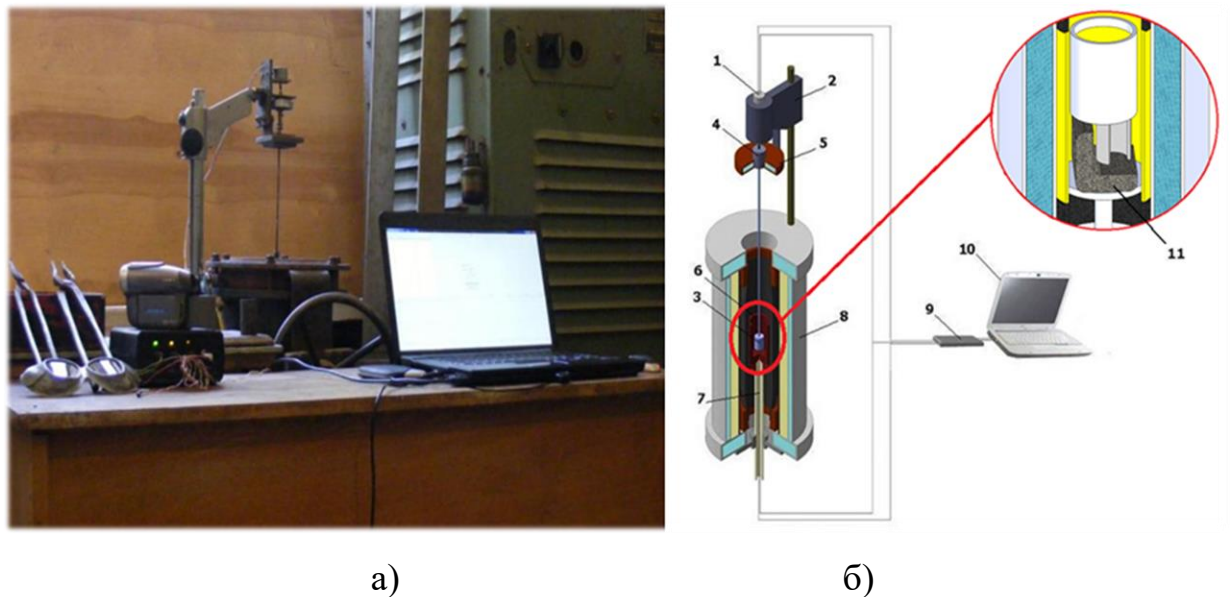


Рисунок 2.10. – Загальний а) і схематичний б) вид лабораторного обладнання для проведення другого методичного етапу, де: 1 – електродвигун; 2 – штатив; 3 – молибденовий вал зі шпинделем; 4 – блок підшипників; 5 – мідний водоохолоджуваний холодильник; 6 – молибденовий тигель з розплавом шлаку; 7 – термопара; 8 – піч Таммана; 9 – реєстраційний блок з аналогово-цифровим перетворювачем; 10 – комп'ютер, 11 – вогнетривкий «зразок» - підкладка.

Реєстраційний блок віскозиметра призначений для вимірювання ЕДС вольфрам-ренієвої термопари, струму якоря двигуна постійного струму і температури навколишнього середовища (датчик DS1820) з подальшою передачею результатів на персональний комп'ютер для їх обробки і збереження в файл. Вимірювання в'язкості шлаків вироблялося до і після модифікування магnezіальних матеріалами.

Найбільш простим, надійним і доступним є ротаційний метод вимірювання в'язкості. Віскозиметри цієї групи дозволяють проводити вимірювання в'язкості від 0,01 до 10^3 Па·с і відрізняються досить високою чутливістю показань [99, 100]. З усіх ротаційних методів для вимірювання в'язкості розплавлених шлаків найбільше підходить електроротаційний метод, який відрізняється компактністю, високою відтворюваністю результатів і досить широким діапазоном вимірюваних величин в'язкості. Великою перевагою електроротаційних віскозиметрів є також можливість автоматичного запису результатів вимірювань.

В якості метода експериментального визначення в'язкості розплавлених шлаків у роботі було обрано електроротаційний, основи якого розглянуті в роботі [99]. Сутність цього методу полягає в наступному. У досліджуваній розплав занурюють шпindel, що приводиться електродвигуном в обертання. Зміна сили струму на валу електродвигуна при цьому характеризує зміну навантаження на ньому, яка, в свою чергу, пропорційна величині в'язкості розплаву. Ця зміна сили струму, як правило, фіксується за допомогою мастикової схеми амперметром. Чутливість методу залежить від електричних характеристик застосовуваного двигуна, а також від діаметра занурюваного в розплав зонда.

Характер і час розчинення присадок магnezіальних модифікаторів оцінювався за допомогою безперервної фото і відео фіксації процесу. На рисунку 2.11, в якості прикладу представлено початковий етап розчинення наважки модифікатора марки БК-4.

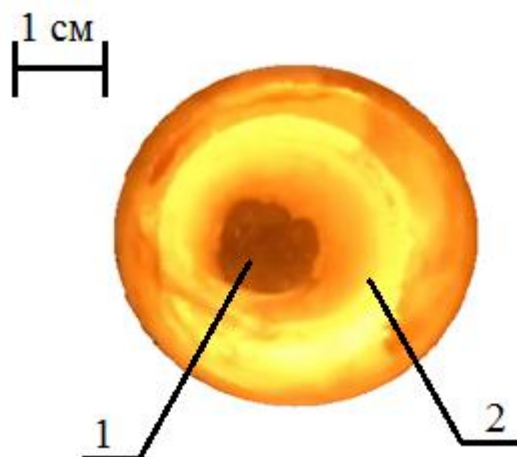


Рисунок 2.11. – Характер розчинення модифікатора марки «БК-4», де 1 – наважка «БК-4», 2 – рідкий шлак.

У даному випадку час асиміляції наважки модифікатора «БК-4» становить 31 сек. Спостерігається інтенсивне спінювання шлаку, що збільшує уявний об'єм шлаку та сприяє більш ефективному його роздуванню азотом.

Після модифікації шлаку кожним із розроблених складів відбирались проби (рисунок 2.12) для хімічного і гранулометричного аналізів.

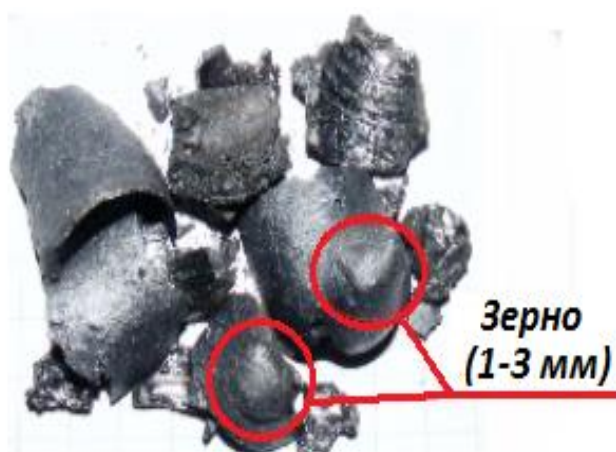


Рисунок 2.12. – Зразок підготовленого (модифікованого) шлаку; нерозчинені фракції (зерна) в охолодженому гарнісажі.

На підставі результатів другого модельного етапу сформульовано концептуальний підхід до фізико-хімічних властивостей флюсів-модифікаторів призначених безпосередньо для наведення шлаку «під гарнісаж». Так, концепція передбачає підвищення в'язкості кінцевого шлаку шляхом його модифікування до дисперсної системи з чітко регламентованою гранулометричною складовою. У цьому випадку передбачається утворення значної кількості тугоплавких феритних фаз у підготовуваному шлаці та формування міцного «скелета» в охолодженому гарнісажному покритті за рахунок нерозчинених фракцій – «зерен».

З метою перевірки та підтвердження розробленої концепції на третьому етапі оцінювали адгезію підготовленого гарнісажу до періклазоуглеродистого вогнетрива та термостійкість (тугоплавкість) вистигшого покриття.

Відомо, що адгезія рідини та твердого тіла, як правило, досягає високих значень внаслідок повного контакту по всій площі зіткнення [101, 102]. При цьому термін адгезія використовується для визначення процесу взаємодії між клеючим матеріалом, у даному випадку шлаком, і пограничним шаром – вогнетривом. На етапі першого контакту «клею» і підкладки доцільніше говорити про змочувані поверхні пограничного шару клеючим матеріалом. Змочуваність, характеризує «схильність» твердого матеріалу до контакту з однієї рідиною (у даному випадку шлаковий розплав певного хімічного складу), ніж з іншого. Тому, про адгезії судили по крайовому куту змочування «підкладки» краплею шлаку. Термостійкість оцінювали температурним інтервалом плавлення гарнісажу.

Суть модельного етапу полягала в наступному: на базі теоретичних уявлень про фазово-температурні перетворення шлакових розплавів, сили і механізм змочування різнорідних речовин, реалізувати на практиці термостійкий, міцний гарнісаж.

Для цього, на підготовлений, вогнетривкий куток, нагрітий до температури футерівки конвертера перед роздуванням (1500 °C) (рисунок 2.13) поміщались крапля ($M_k = 4 - 5$ г) модифікованого шлаку. За допомогою

масштабування фото і відео зйомки даного процесу визначались крайові кути змочування крапель шлака модифікованого матеріалами різного хімічного і гранулометричного складів.

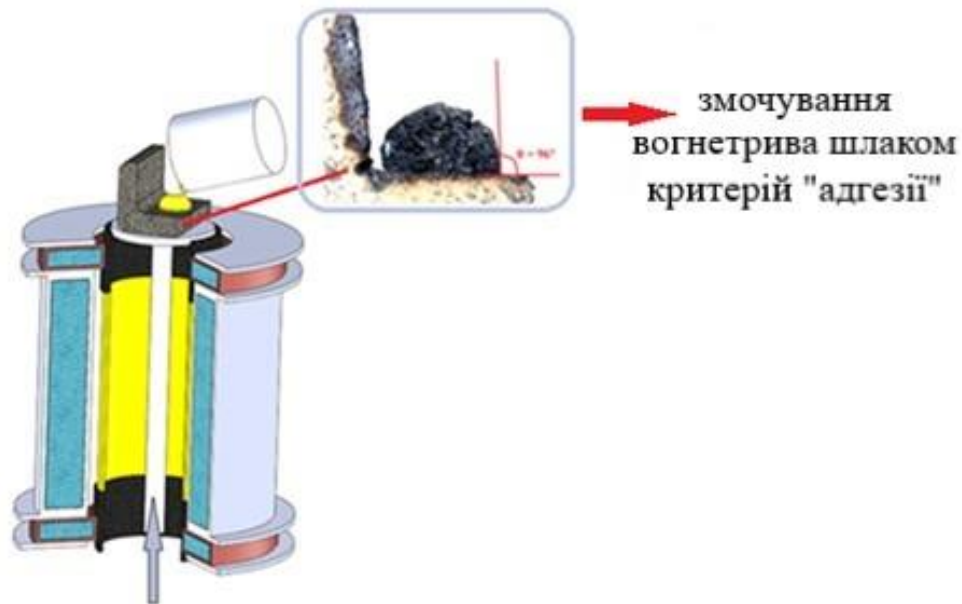


Рисунок 2.13. – Схематичне уявлення визначення адгезії гарнісажного покриття до вогнетривкої «підкладки»

У сукупності з забезпеченням крайового кута змочування (θ), що характеризує ефективне «скріплення» гарнісажа з поверхнею вогнетривки, проводили оцінку вогнетривкості захисного шару. Для реалізації такого роду експериментів була модернізована лабораторна установка для вивчення поверхневого натягу рідких розплавів методом лежачої краплі (рисунок 2.14).

Зразок «підкладки» з краплею шлаку вміщався в горизонтальну нагрівальну піч. При цьому встановлювалось горизонтальне положення «кутка» (рисунок 2.15, а).

По досягненню заданих температур (1550 – 1650 °С), здійснювали поворот зразка на кут в 90 °, імітуючи вертикальну стінку футерівки агрегату (рисунок 2.15, б)). За допомогою безперервної фото і відео фіксації процесу, паралельно з температурою проводили оцінку стійкості гарнісажу в температурному інтервалі конвертерної плавки.

Таким чином, розроблена комплексна методика оцінки впливу фізичних властивостей кінцевого шлаку після його модифікування на ефективність адгезії до робочої поверхні періклазовуглецевої цегли (у т. ч. змочування) і температурний інтервал плавлення (тугоплавкість) гарнісажу. Методика дозволяє досліджувати існуючі магнезіальні матеріали в якості модифікаторів кінцевого шлаку, механізми адгезії гарнісажного покриття до вогнетривів будь-якого складу і розробляти нові види флюсів виходячи з доступної сировинної бази для будь-яких виробничих умов.

2.5. Розробка методики оцінки фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей саморозтічної магнезіальної підварювальної маси

Для розробки, аналізу та оптимізації фізико-хімічних властивостей саморозтічної підварювальної маси була розроблена спеціальна методика. Агрегатом для проведення експериментів за оригінальною методикою [103,104] обрана нагрівальна піч роторного типу [105]. Схема та зовнішній вигляд експериментальної установки представлено на рисунку 2.16.

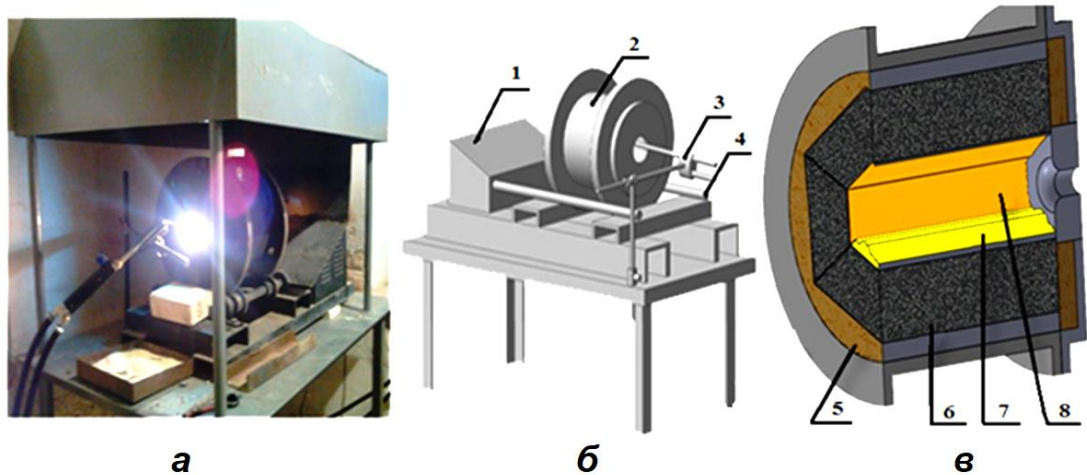


Рисунок 2.16 – Загальний вигляд (а) і схема установки (б, в) експериментального стенду печі роторного типу, де: 1 – двигун; 2 – корпус печі; 3 – газово-кисневий пальник, 4 – приводний вал; 5 – теплоізоляція; 6 – періклазовуглецева футерівка (конвертерні вогнетриви); 7 – підварювальна маса (експериментальні склади); 8 – робоча поверхня вогнетрива (пропитка продуктами плавлення).

Методика експериментальних досліджень була розділена на три етапи.

Перший етап. Підготовка вогнетривких зразків до операції підварювання. В якості зразків були взяті вогнетриви «цапфової» зони 350 т конвертера ПрАТ «МК» Азовсталь».

Основні фізико-хімічні показники вогнетрива наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5.

**Фізико-хімічні показники конвертерного вогнетриву (зона цапф)
марки PN-MT-16A**

Зона футерівки	Марка виробу	Масова частка основних компонентів, %		Межа міцності при стисненні, МПа	Позірна пористість, %	Густина, г/см ³
		MgO	C			
Зона цапф	PN-MT-16A	≥ 69	≥ 16	≥ 35	≤ 3	≥ 2,90

Схема робочої футерівки роторної печі (зразки вогнетриву) представлена на рисунку 2.17.

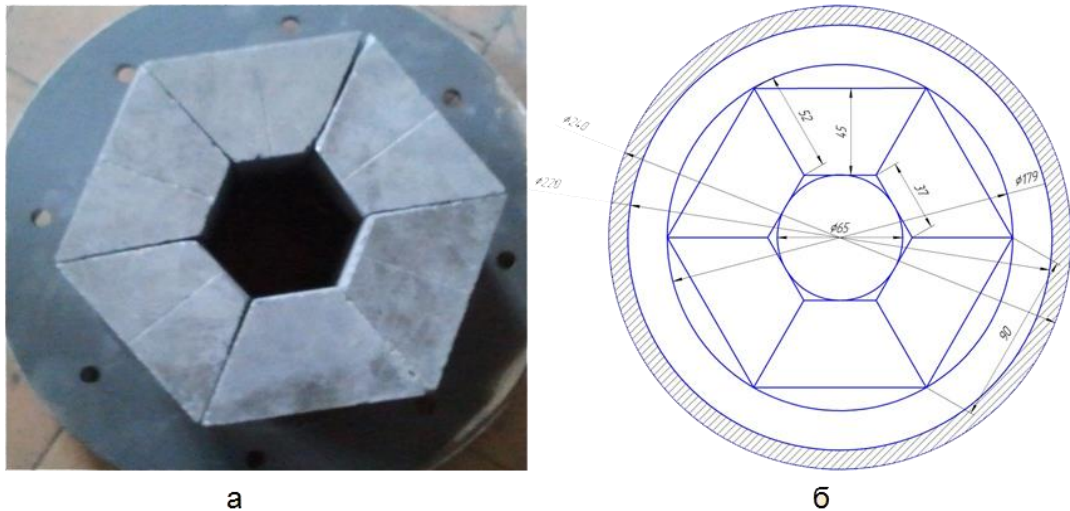


Рисунок 2.17. – Загальний (а) та схематичний (б) вигляд футерівки роторної печі.

У порожнині печі розплавляли шлакометалеву емульсію (конвертерний шлак + метал). Температура рідкої ванни – 1630 °С. Примусовий знос внутрішнього простору здійснювався за допомогою обертання печі навколо своєї осі з частотою 10-12 обертів/хв. Нерівномірність зносу внутрішнього простору досягали нахилом печі відносно горизонтальної осі. Тривалий контакт (3,5 години) робочої поверхні зі шлакометалевою емульсією імітував ерозійний та корозійний знос періклазовуглецевої цегли з інфільтрацією рідких продуктів плавлення у вогнетрив, що в достатній мірі відповідало механізмам зносу в реальних умовах конвертерного плавлення. Після надання адекватних реальним властивостям робочої поверхні вогнетривів перейшли до другого етапу – підварювання зношеної зони еталонним і експериментальними складами.

Другий етап. Заповнення ремонтної масою зони випереджаючого зносу. Перед засипанням маси в порожнину печі продукти плавлення

зливались. Температура робочого простору після зливу плавлення – 1450 °С. Маса подавалась по тічці у внутрішній простір на зношену ділянку футерівки. Витрата маси на операцію – 0,5 кг. На рисунку 2.18 представлено зовнішній вигляд наважки магнезійної ремонтної маси.



Рисунок 2.18. – Наважка магнезійної ремонтної маси марки «GIR-RB-X» 0,5 кг - експериментальний зразок.

Перевірку «рухомості» маси оцінювали при обертанні печі навколо горизонтальної осі реверсом у дві сторони на 45 °. Заповнення зношеної ділянки відбувалось рівномірно, без передчасного спікання маси. Потім піч повертали в початкове положення і витримували протягом 15 хв, до повного прогрівання наважки та спікання (рис. 2.19 а)).

Ступінь адгезії маси після спікання до поверхні оцінювали обертанням печі навколо горизонтальної осі. Перевірялась спікливість і адгезія до футерівки.

Третій етап. Повторне розігрівання печі до робочої температури, яка становить 1630 °С; випробування ерозійної та корозійної стійкості підварювальної маси.

Після оцінки адгезійних властивостей і швидкості спікання робочий простір повторно розігрівався до температури конвертерного плавлення. При цьому в робочий простір завантажувались нові порції металу та шлаку до формування рідкорухомої ванни (1/3 внутрішнього обсягу печі) 4-5 кг.

Безперервне обертання печі зі шлакометалевою емульсією тривало протягом 1 години, для імітації ерозійного і корозійного зносу конгломерату підварювання. Після чого продукти плавлення знову зливались з печі. Приклад зовнішнього вигляду і залишкова кількість підварювальної маси після повторного розігрівання та зносу шлакометалевою емульсією представлено на рисунку 2.19.



Рисунок 2.19. – Зовнішній вигляд підварювального конгломерату в роторній печі: а) – рівномірне заповнення зношеної ділянки, б) – підварювання після повторного розігрівання і ерозійно-корозійного зносу.

Після якісної оцінки поведінки підварювальної маси, ступеня її адгезії до періклазовуглецевої цегли, часу спікання та корозійно-ерозійної стійкості піч охолоджували до кімнатної температури. Здійснювали демонтажу внутрішньої футерівки та відділення наважки спеченої маси від поверхні вогнетрива, а також зважували її на лабораторних вагах. Після цього відбирались та готувались зразки спеченої маси для механічних випробувань межі міцності на стиск (σ).

Таким чином, розроблено комплексну методику оцінки фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей магнезіальної, саморозтічної, підварювальної маси для гарячого ремонту футерівки конвертера. Методика

дозволяє розробляти й оцінювати якість ремонтного матеріалу для будь-яких конвертерних агрегатів і умов експлуатації, що досягається за рахунок її універсальності:

- футерівка печі виконується з періклазовуглецевої цегли футерівки конвертера;
- шлакометалева емульсія відбирається у цеху в необхідній кількості.

2.6. Висновки по розділу 2.

1. Для отримання додаткових відомостей щодо гідродинаміки рідкої ванни конвертера і характерних зон випереджаючого ерозійного зносу футерівки протягом кампанії розроблена фізична модель кисневого конвертера в масштабі 1:6. Відпрацьована в ході фізичного моделювання методика дозволила уточнити режими продування конвертерної ванни з метою визначення зон нерівномірного зносу робочого шару футерівки конвертера.

2. Розроблено математичну модель перемішування рідкої ванни конвертера з використанням прикладного пакету Ansys Int., що дозволяє оцінювати гідродинамічний стан розплаву в процесі продування і визначити зони футерівки, схильні до підвищеного ерозійному зносу.

3. Розроблено фізичну модель 160 т конвертера в масштабі 1:20 і методика для якісної оцінки механізму нанесення гарнісажного покриття на футерівку агрегату. Розроблена фізична модель та методика набризкування гарнісажного шару дозволяє оптимізувати технологічні параметри роздування, такі як витрата дуття, положення верхньої фурми і т. ін.

4. Розроблена комплексна методика оцінки впливу фізичних властивостей кінцевого шлаку після його модифікації на ефективність адгезії до робочої поверхні періклазовуглецевої цегли (у т. ч. змочування) і температурний інтервал плавлення (тугоплавкість) гарнісажу.

5. Розроблена комплексна методика оцінки фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей магнезійної, саморозтічної, підварювальної маси для гарячого ремонту футерівки конвертера. Методика дозволяє розробляти й оцінювати якість ремонтного матеріалу для будь-яких конвертерних агрегатів і умов експлуатації. Це досягається за рахунок її універсальності:

- футерівка печі виконується з конвертерної цегли;
- шлакометалева емульсія відбирається у цеху в необхідній кількості.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ЗОН ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ РОБОЧОГО ШАРУ ФУТЕРІВКИ КОНВЕРТОРА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧИХ РЕМОНТІВ

Відомо, що ефективність багатьох фізико-хімічних процесів, які протікають у кисневому конвертері, в значній мірі залежать від характеру і інтенсивності примусового перемішування. У певних випадках примусове перемішування збільшує швидкості протікання хімічних реакцій при перенесенні реагентів у місце їх протікання та видаляє продукти цих реакцій у шлак. Воно також впливає на тривалість температурного і хімічного усереднення металу в рідкій ванні (гомогенізація).

У вивченні гідро- та газодинамічної поведінки рідини в конвертері особлива увага приділялась верхньому продуванню, а точніше параметрам реакційних зон, як результату механічної взаємодії газового струменя з поверхнею ванни. Цей процес супроводжується значним імпульсом газового потоку, який переходить в роботу по перемішуванню, що тягне за собою зміну ерозійного навантаження на вогнетривку футерівку «зони сталі» в конвертері [107,108].

3.1. Дослідження на фізичній моделі особливостей перемішування рідкої ванни конвертера під час продування

Явище перемішування рідини у конвертері вивчалось на водяній фізичній моделі, в якій перемішування здійснювалось через розташовані у днищі 8 канальних пробок (1 мм) у парі з верхньою подачею дуття, за допомогою спеціального обладнання і програмного забезпечення.

Верхнє продування здійснювали двома типами п'ятисоплових наконечників з циліндричними та соплами Лаваля.

Для визначення розмірів реакційних зон, що утворюються під час продування через циліндричні сопла і сопла Лавалю тиск дуття в першому випадку змінювали від 1,0 до 1,7 аті, а в другому від 1,7 до 1,9 аті. Вимірювання проводили при фіксованих положеннях верхньої фурми над рівнем спокійної ванни.

Для циліндричних дуттєвих отворів висота підйому фурми була прийнята 200, 250 і 300 мм. Реакційна зона для фурми з соплами Лавалю досліджена на 2-х рівнях 200 і 220 мм. Під час продування здійснювалась безперервна фото і відео зйомка. Геометричні розміри реакційної зони визначали масштабуванням фото та відео матеріалів. Для спрощення процедури вимірювань проекція реакційної зони на поверхню ванни була прийнята рівновісною. На обраних висотах установки фурми відхилення геометричних розмірів за рахунок еліпсності не перевищували 0,5 – 1%.

При підвищеному тиску дуття 1,7 – 1,9 аті реакційна зона, що утворюється в нижній частині мала характерні завихрення. В цьому випадку, при обробці масштабних знімків значення мінімальної та максимальної глибини усереднювали. Отримане середнє значення $N_{срдн}$ представляли як дані декількох вимірювань.

Обробка отриманих даних дозволила встановити зміну площі реакційної зони при максимальному тиску дуття через циліндричні сопла від 0,0038 до 0,0063 м². При цьому в разі встановлення фурми на висоту 200 мм ця величина становила 0,0038 м², а на висоту 250 і 300 мм відповідно 0,0054 і 0,0063 м². Реакційна зона при таких параметрах дуття становила 3,01% - 4,96% від загальної площі ванни – 0,51 м².

Окрім геометричних параметрів реакційних зон, фіксувались і динамічні параметри такі як витрата дуття Q_r (м³/хв), і швидкість витікання газу з сопла W_0 (м/с). Узагальнені результати вивчення зміни основних параметрів реакційної зони при використанні наконечника з циліндричними соплами наведено в таблиці 3.1.

Застосування для продування наконечника з соплами Лавалю з $d_{кр.} = 5,1$ мм практично не змінило співвідношення площ реакційних зон до площі ванни. Для рівня підйому фурми 200 мм, при тиску дуття 1,7 аті співвідношення збільшилось на 0,57% (абс.). У той же час, через раціональну організацію струменя газу, співвідношення глибини проникнення струменя до діаметру реакційної зони збільшилось у 1,2 - 1,5 рази. Під час продування через циліндричні сопла і рівні підйому фурми 200 мм та тиску дуття в 1,7 аті, величина h/D становила 0,742. При такому самому режимі продування, але через сопла Лавалю значення h/D становило 1,11.

Загальний вид реакційних зон при зазначених параметрах дуття (1-ша с.) з використанням п'ятисоплового (сопла Лавалю) наконечника представлено на рисунку 3.1.

Більш високе співвідношення h/D , тобто «глибока» каверна свідчить про те, що застосування фурми аналогічної конструкції, але з соплами Лавалю забезпечує більш «розвинену», з точки зору гідро- і газодинаміки реакційну зону.

Узагальнені результати вивчення зміни основних параметрів реакційної зони при використанні наконечника з соплами Лавалю наведені в таблиці 3.2. Відповідно до даних з таблиці 3.2 і візуальних спостережень зміни гідродинаміки ванни в часі, реакційні зони (каверни) характеризуються великою кількістю спонтанних вихрових потоків. Це так само підтверджує більш активна взаємодія газового струменя з рідкою ванною.

Таблиця 3.1.

Параметри реакційних зон під час продування через циліндричні сопла.

№	Н = 200 мм (5-ти соплова фурма)									
	№	P(аті)	H _{срдн.} (мм)	D _{срдн.} (мм)	h/D	S _{р.зони (1 л.)} (м ²)	S _{р.зони (заг.)} (м ²)	S _{р.з./ S_{ванни}} (%)	Q _{г.} (м ³ /хв)	W ₀ (м/с)
1	1	1	43,3	82,6	0,524	0,0054	0,0214	4, 21	0,3	99,8
	2	1,2	48,7	75,6	0,644	0,0045	0,0181	3, 56	0,33	109,5
	3	1,7	51,8	69,8	0,742	0,0038	0,0153	3, 01	0,39	129,4
Н = 250 мм (5-ти соплова фурма)										
2	№	P(аті)	H _{срдн.} (мм)	D _{срдн.} (мм)	h/D	S _{р.зони (1 л.)} (м ²)	S _{р.зони (заг.)} (м ²)	S _{р.з./S_{ванни}} (%)	Q _{г.} (м ³ /хв)	W ₀ (м/с)
	1	1	37,4	96	0,389	0,0072	0,0289	5,68	0,3	99,8
	2	1,2	40,5	90	0,45	0,0064	0,0254	4,99	0,33	109,5
3	1,7	45,2	83	0,544	0,0054	0,0216	4, 25	0,39	129,4	
Н = 300 мм (5-ти соплова фурма)										
3	№	P(аті)	H _{срдн.} (мм)	D _{срдн.} (мм)	h/D	S _{р.зони (1 л.)} (м ²)	S _{р.зони (заг.)} (м ²)	S _{р.з./ S_{ванни}} (%)	Q _{г.} (м ³ /хв)	W ₀ (м/с)
	1	1	29,6	103,7	0,285	0,0084	0,0337	6,62	0,3	99,8
	2	1,2	31,2	97,5	0,32	0,0075	0,0298	5,87	0,33	109,5
3	1,7	33,5	89,7	0,373	0,0063	0,0252	4, 96	0,39	129,4	

Таблиця 3.2.

Параметри реакційних зон під час продування через сопла Лаваля.

№	H = 200 мм (5-ти соплова фурма (сопла Лаваля $d_{кр.}=5,1$ мм))									
	№	P(аті)	H _{срдн.} (мм)	D _{срдн.} (мм)	h/D	S _{р.зони (1 л.)} (м ²)	S _{р.зони (заг.)} (м ²)	S _{р.з./ S_{ванни}} (%)	Q _{г.} (м ³ /хв)	W ₀ (м/с)
1	1	1,7	89,6	80,8	1,11	0,00513	0,0308	6,05	1,83	463,5
	2	1,8	91,2	74,4	1,23	0,00435	0,0261	5,13	1,95	487,5
	3	1,9	96,5	69,7	1,38	0,00382	0,0229	4,49	2,1	510,4
H = 220 мм (5-ти соплова фурма(сопла Лаваля $d_{кр.}=5,1$ мм))										
2	1	1,7	77,4	106,2	0,73	0,00886	0,0532	10,45	1,83	463,5
	2	1,8	80,5	98,7	0,82	0,00765	0,0459	9,02	1,95	487,5
	3	1,9	85,2	93,1	0,92	0,00681	0,0408	8,02	2,1	510,4

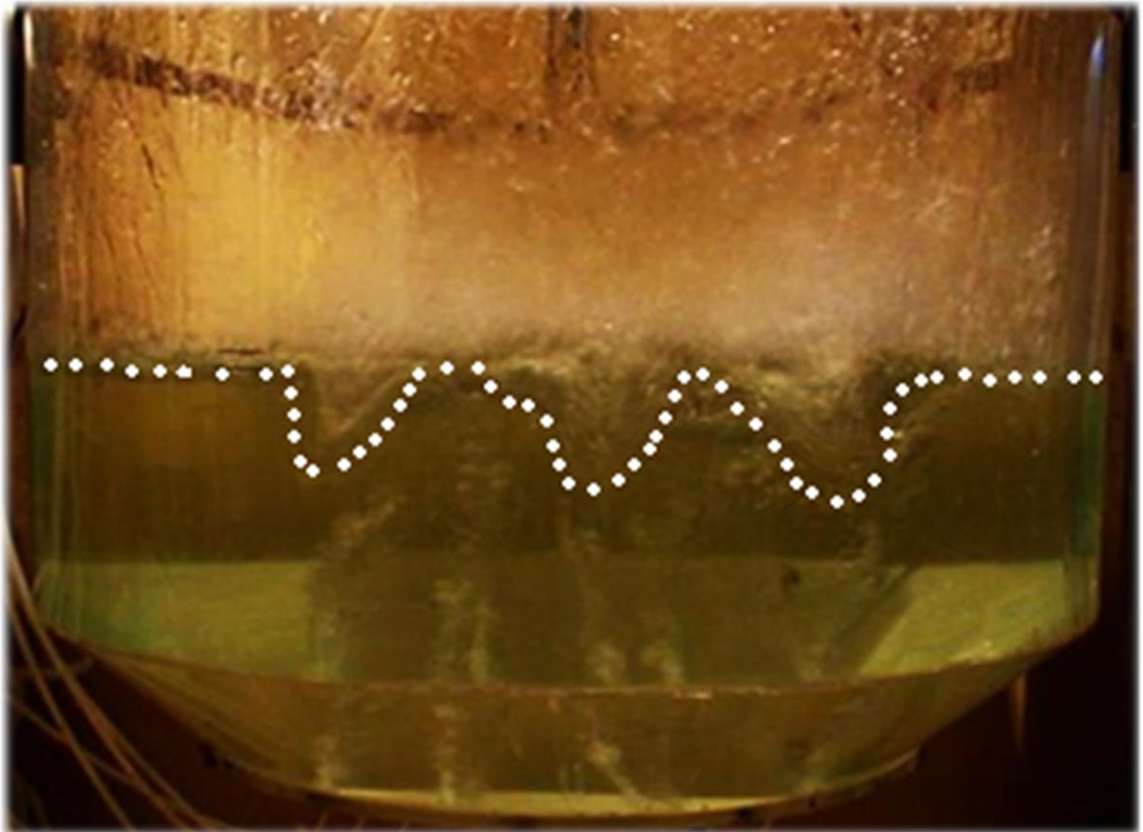


Рисунок 3.1. – Загальний вигляд реакційних зон (сопла Лаваля) на 1 с продування.

Виконані дослідження та представлені дані дозволяють судити про гідродинаміку взаємодії газового струменя з металевим розплавом, геометричні параметри зон, що відображають ці взаємодії та про ту чи іншу міру їх впливу на інтенсивність перемішування ванни [109,110].

Геометричні розміри реакційних зон вказують на можливі та найбільш раціональні взаємні положення донної і верхньої фурми з метою не допущення співпадіння різноспрямованих струменів продувних газів і їх взаємогасящегоо впливу. Схематичний розподіл різноспрямованих потоків, що виключає взаємний вплив при комбінованому продуванні представлено на рисунку 3.2.

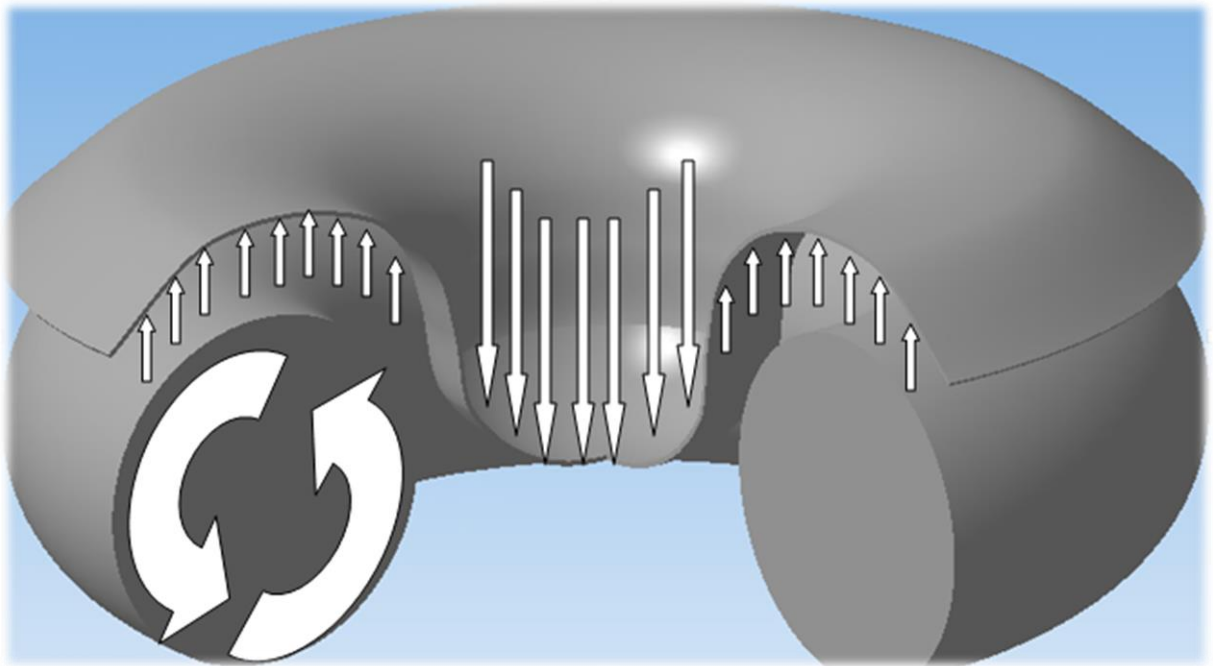


Рисунок 3.2. – Схематичне зображення напрямку руху потоків у рідкій ванні: \uparrow – потоки рідини при верхньому продуванні, \Rightarrow – потоки рідини при нижньому продуванні

Виключення взаємогасящого (що послабляє) впливу, а також взаємного посилення різноспрямованих потоків рідини, викликаних верхнім і нижнім продуванням, можливо лише при певному розташуванні донних продувних пристроїв і фіксованому положенні верхньої фурми. Загальний вигляд реакційної зони і потоку газу від донної фурми в положенні $0,76R$ (R – радіус днища конвертера) представлені на рисунку 3.3.

Такі діапазони розташування донних фурм, які спираються на розрахункові гідродинамічні та геометричні параметри механічної взаємодії газових струменів з обсягом рідкої ванни, схематично представлені на рисунку 3.4.

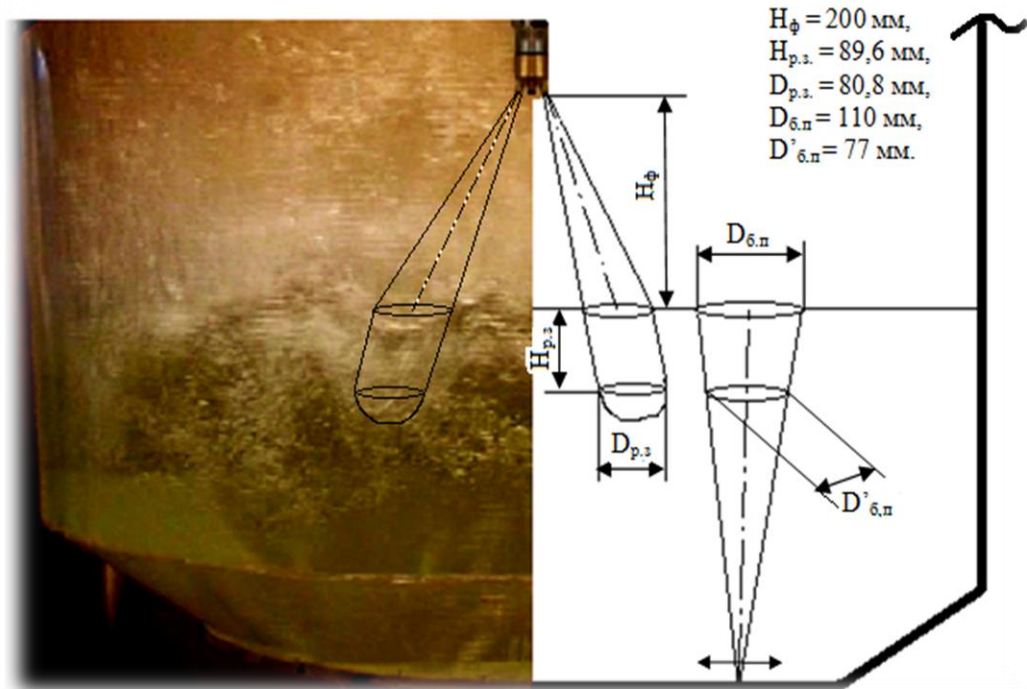


Рисунок 3.3 – Схематичне зображення різноспрямованих потоків газу при положенні фурм: верхня $H_{\phi} = 200$ мм, нижні – $0,76R$ і витраті: верхній – $1,83 \text{ м}^3/\text{хв}$, нижній – 30 л/хв .

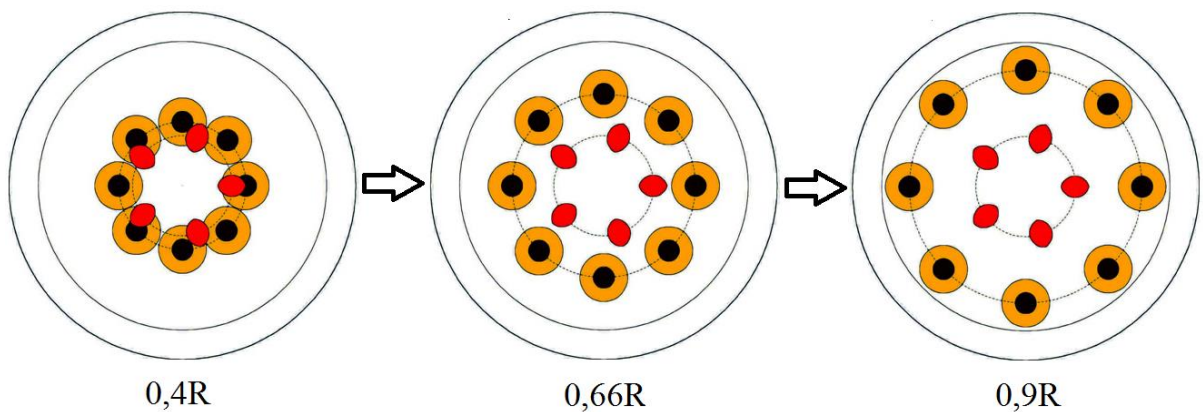


Рисунок 3.4. – Схематичне зображення положень проєкцій реакційних зон і барботажних плям на поверхні ванни; ● – реакційні зони, ● – барботажні плями.

Таким чином, встановлено, що в діапазоні розташування донних фурм $0,4R - 0,66R$ має місце накладення потоків один на другий, що тягне за

собою їх взаємне ослаблення. У діапазоні $0,66R - 0,9R$ – взаємний вплив різноспрямованих потоків зменшується і при положеннях $0,7R - 0,74R$ приймає мінімальне значення. Це створює додаткові передумови для ефективного перемішування рідкого обсягу ванни. Подальше переміщення фурм від центру до периферії ($0,74R - 0,8R$) виводить зустрічні потоки верхнього і нижнього продування з зони спільної взаємодії. Наближення донних фурм до конічної частини днища тягне за собою ослаблення циркуляції рідини в «центральному» обсязі ванни. Причиною цього є порушення симетричності тороїдоподібного руху потоків від донних фурм, що викликане пристінковим ефектом. Такий ефект, у свою чергу, інтенсифікує ерозійний вплив потоків на футерівку нижнього конуса та зони сталі. В результаті формується «грибоподібне» зношення кладки.

Розглянуті висновки дозволили обрати місця положення донної продувної системи при проведенні досліджень з організованим комбінованим продуванням [108,109]. Беручи до уваги отримані результати, слід відмітити раціональне положення донних продувних вузлів у діапазоні $0,7R - 0,74R$ днища при якому відсутній пристінковий ефект, і, як наслідок, інтенсивне зношення (ерозія) вогнетривкої кладки нижнього конуса футерівки.

3.2. Математичне моделювання розвитку конвективних потоків у рідкій ванні конвертера

Для підтвердження та кількісного аналізу отриманих даних в ході фізичного моделювання гідродинамічного поведінки рідкої ванни конвертера була розроблена математична модель в пакеті ANSYS. Модель розглядалася як нестационарна, турбулентна, з однофазним представленням розплаву сталі.

За інших рівних умов щодо верхнього продування, як положення верхньої фурми над рівнем ванни $H_{\phi} = 1,2 \text{ м} = \text{const.}$, витрати верхнього дуття $Q_{o_2} = 650 \text{ м}^3/\text{хв} = \text{const.}$ та тиску на зрізі сопел $P_{\phi} = 15 \text{ аті}$ змінювали положення донних продувних пристроїв і витрату перемішуючого газу через

них. Зміни брали в «оптимальних» діапазонах, отриманих у результаті фізичного моделювання. Так, витрата становила 8 м³/хв і 10 м³/хв, відповідно. Положення донних продувних вузлів – 0,68R – 0,78R, з кроком у 0,02R. Для кожного з розрахованих параметрів (швидкості руху потоку, тиску), у т. ч. напрямку руху, задавались покрокові методи вирішення системи рівнянь і похибка для пошуку їх збіжності. Далі, для кожного тимчасового кроку, шуканого і того, що вводиться параметра, обчислення необхідних систем рівнянь виконувалось автоматично, за допомогою прикладного пакету ANSYS.

Результатами розрахунку були значення векторів швидкості та сумарної швидкості, в кожній вузловій точці розрахункової області для кожного тимчасового кроку, які можна представити у табличній і графічній формі (у вигляді векторних або контурних величин). У таблиці 3.3 представлені зведені дані про швидкості направлених потоків у рідкій ванні, їх напрямку в обсязі розплаву у залежності від положення донних фурм і витрати газу, що перемішує.

Таблиця 3.3.

Параметри руху потоків у рідкій ванні конвертера.

Витрата аргону, м ³ /мин	Положення донних фурм, 0,_R	Напрямок потоку	Швидкість руху потоку*, м/с
8,0	0,68R	Асиметричний тороїд	0,695
	0,70R	-//-	0,842
	0,72R	Симетричний тороїд	0,898
	0,74R	-//-	0,900
	0,76R	-//-	1,047
	0,78R	Асиметричний тороїд	1,120
10,0	0,68R	Асиметричний тороїд	0,803
	0,70R	Симетричний тороїд	0,949
	0,72R	-//-	1,032
	0,74R	Асиметричний тороїд	1,135
	0,76R	-//-	1,201
	0,78 R	-//-	1,280

* – середня, максимальна швидкість руху, що обиралась у «пристінковій зоні», як місці підвищеного ерозійного зносу вогнетривкої кладки.

З таблиці 3.3 видно, що оптимальне положення донних фурм відповідає $0,70R - 0,72R$ днища при обох витратах донного продування. Зміна положень у той чи інший бік призводить до порушення симетричності потоку, що в свою чергу негативно впливає на перемішування під час плавлення (утворення застійних зон і т. ін.), а також «посилення» пристінкового ефекту і локалізацію ерозійного зносу.

На рисунку 3.5, представлені поля розподілу швидкостей при порушеній симетричності тороїдоподібного руху потоків при положенні донних фурм – $0,68R$, $Q_{Ar} = 8 \text{ м}^3/\text{хв}$, що спричинило за собою велику кількість застійних зон.

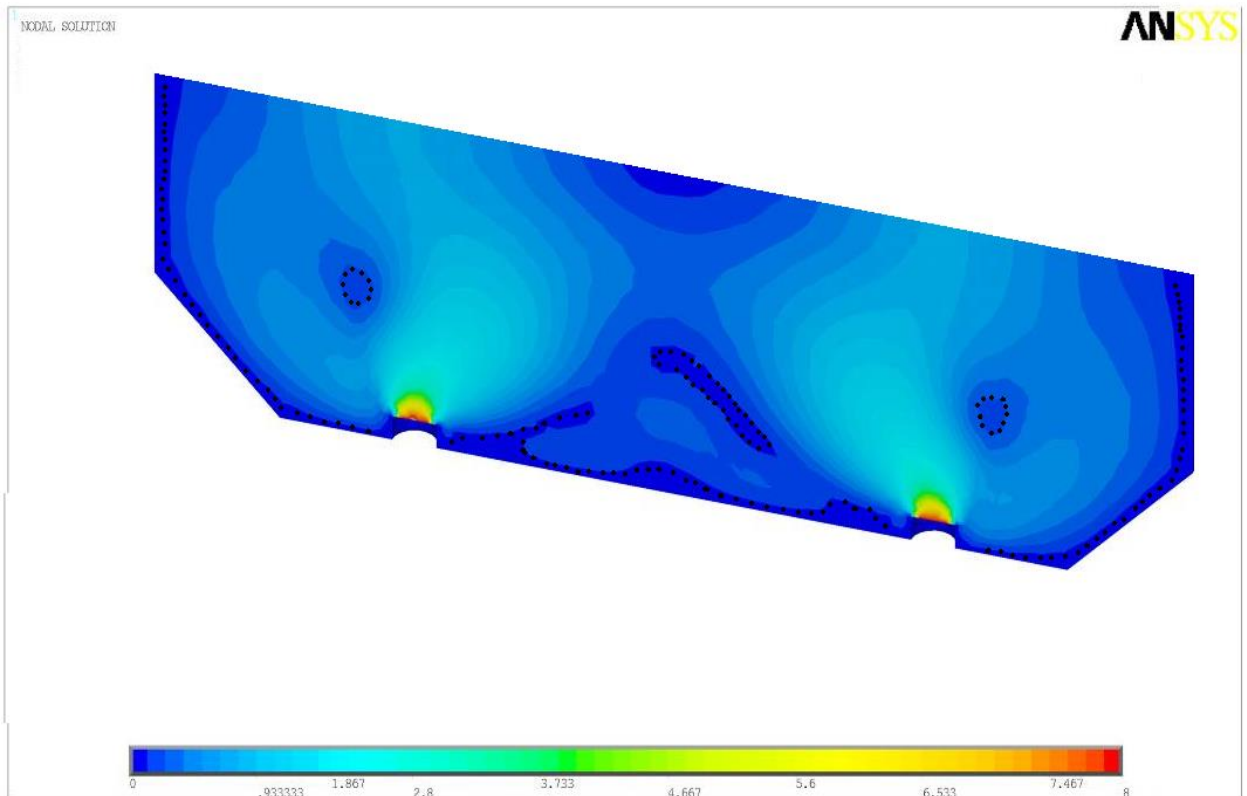


Рисунок 3.5. – Поля розподілу швидкостей потоку (розріз), положення донних фурм – $0,68R$, $Q_{Ar} = 8 \text{ м}^3/\text{хв}$; асиметричний тороїд; де ... – застійні зони в рідкій ванні конвертера.

Тоді як на рисунках 3.7 і 3.8 показано розріз і загальна картина гідродинаміки рідкої ванни у векторній інтерпретації з діаграмою швидкості руху потоків, що характерна «оптимальній» організації продування: стан донних фурм – $0,72R$, $Q_{Ar} = 8 \text{ м}^3/\text{хв}$. У таких умовах організації комбінованого продування, забезпечується мінімальний час перемішування (усереднення) рідкої ванни з мінімальним ерозійним зношенням футерівки зони сталі. Так, з рисунків 3.6 і 3.7 видно, що швидкості тороїдоподібного руху потоків у пристінковій зоні не перевищують $1,032 \text{ м/с}$.

Таким чином, шляхом математичного моделювання встановлено оптимальні значення положення донної продувної системи – $0,72R$ і витрата інертного газу – $8 \text{ м}^3/\text{хв}$, що забезпечують симетричність організації потоків в обсязі рідкої ванни конвертера і мінімізацію їх ерозійного впливу на футерівку.

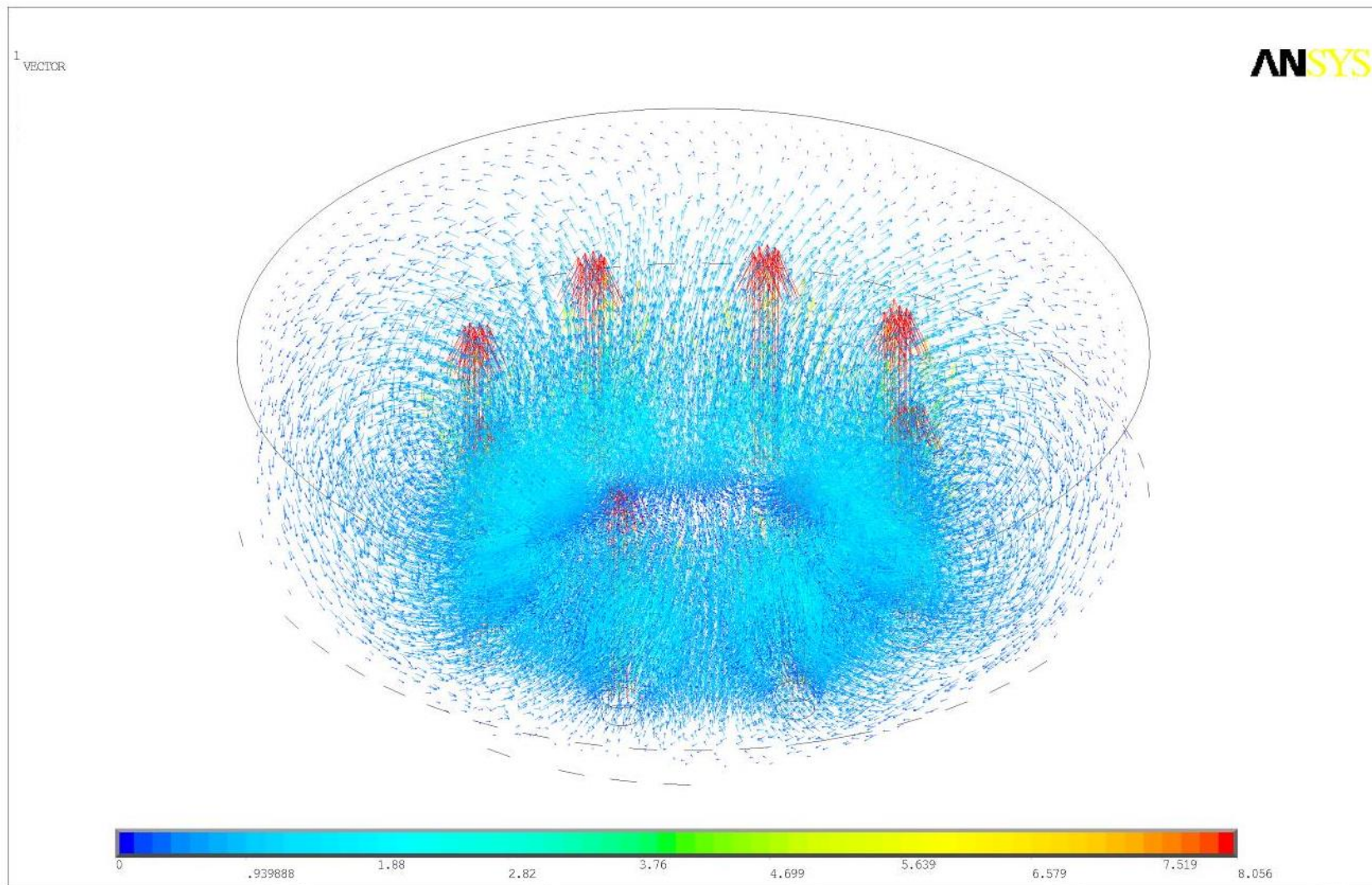


Рисунок 3.6. – Векторна картина розподілу швидкостей потоку (загальний вигляд, об'ємна модель), положення донних фурм – $0,72R$, $Q_{Ar} = 8 \text{ м}^3/\text{хв}$; симетричний тороїд.

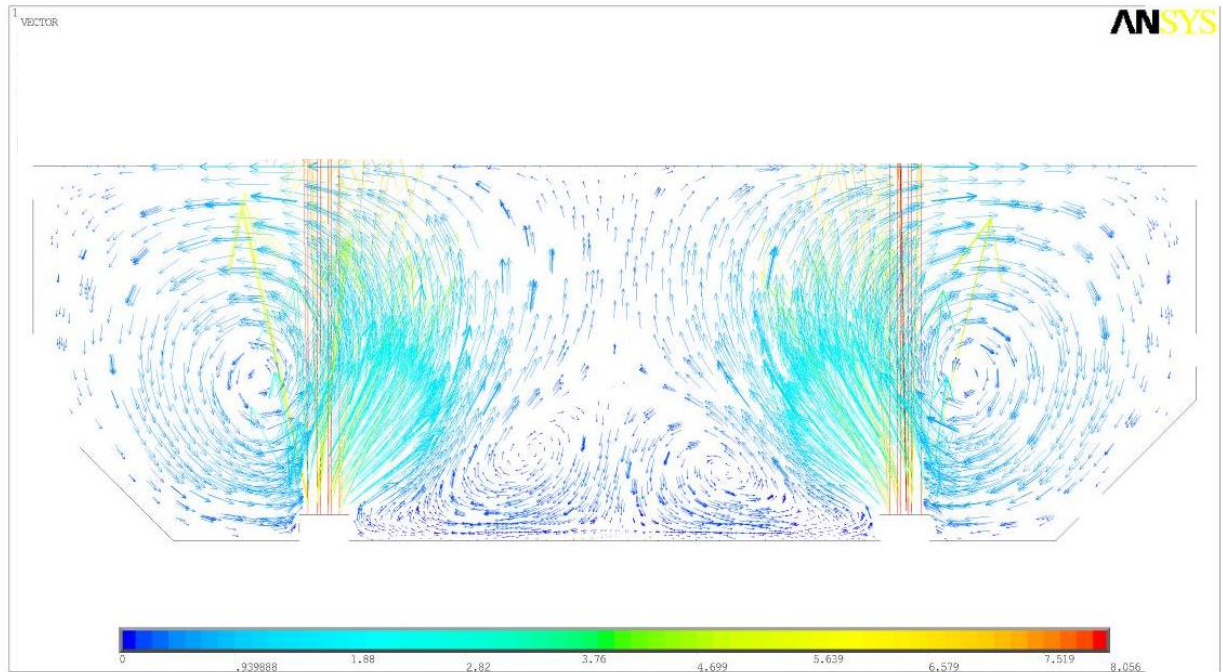


Рисунок 3.7. – Векторна картина розподілу швидкостей потоку (розріз), положення донних фурм – $0,72R$, $Q_{Ar} = 8 \text{ м}^3/\text{хв}$; симетричний тороїд.

Слід особливо відзначити високий рівень збіжності отриманих результатів у ході фізичного та математичного моделювання гідродинамічних процесів. Так, різниця між отриманими даними щодо раціонального положення донних фурм у ході фізичного ($0,74R$) і математичного ($0,74R$) моделювання не перевищує 3% абс.

Співвідносячи отримані дані в ході моделювання з виробничою практикою зношення вогнетривкої футерівки більшості конвертерів, як з верхнім, так і з комбінованим продуванням, вдалось визначити теоретичні передумови випереджуючого зношування футерівки нижнього конуса конвертера, т. зв. «грибоподібну зношування» (рисунок 3.8). Таке зношування, в першу чергу, пояснюється тороїдоподібним напрямком руху потоків у рідкій ванні, і тим сильніше, чим менше «організований», з точки зору симетрії, такий рух. До того ж оптимізація потоку залежить від розташування донних фурм і витрати газу, що перемішує.



Рисунок 3.8. – Випереджуючий знос вогнетривкої кладки нижнього конуса конвертера, стійкість футерівки 2457 плавок. ПАТ «АМК» (комбіноване продування).

Однак, як показують результати досліджень, загальна картина результуючого потоку не залежить від організації дуття (комбіноване і / або верхнє продування) і спрямована від центру ванни до її периферії. Тому, повністю виключити ерозійний вплив останнього на вогнетриви нижнього конуса шляхом оптимізації гідродинаміки не представляється можливим. Отже, поряд з оптимізацією режиму дуття виникає необхідність реструктуризації схеми кладки конвертера з внесенням змін до конструкції нижнього конуса, а також пошуку ефективних методів ремонту «важкодоступної» зони нижнього конуса, схильної до випереджуючого зносу, в тій чи іншій мірі інтенсивності.

3.3. Дослідження на фізичній моделі умов нанесення гарнісажного покриття при роздуванні підготовленого кінцевого шлаку азотом

Основним завданням фізичного моделювання процесів супроводжуваних формування гарнісажного шару було вивчення можливості рівномірного відновлення випереджаючого «грибоподібного зношування» футерівки, за допомогою оптимізації дуттєвих параметрів і фізичних властивостей шлаку [111-113].

На першому етапі досліджень оцінювали ефективність використання 5-ти і 6-ти соплового наконечника фурми. Дослідним шляхом встановлено, що використання 6-ти соплового наконечника (стандартна конструкція) з кутом розкриття сопел 16° забезпечується більш рівномірний і «розширений» викид бризок у зони нижнього конуса і цапф. Такий ефект досягається за рахунок об'єднання зовнішніх меж кратерів-каверн по периферії реакційних зон.

Разом з тим, необхідно врахувати, що при однакових значеннях загальної витрати повітря і висоти фурми над ванною збільшення кількості сопел у наконечнику супроводжується зниженням питомого тиску струменя на рідину, що викликає необхідність адекватного зниження висоти фурми над ванною з метою забезпечення досягнення краплями рідини верхніх горизонтів футерівки конвертера.

Для подальших досліджень і оцінки кількісних характеристик, що супроводжують нанесення гарнісажного покриття, використовувалась фурма з 6-ти сопловим наконечником. Як приклад, на рисунку 3.9, представлена кінограма динаміки утворення гарнісажного покриття на внутрішній поверхні футерівки сосуду в часі, з використанням синтетичного клейстера.

Прозорість стінок давала можливість визначення рівномірності покриття та динаміки його «наростання» за рахунок зміни густини світлового потоку, що пропускається в тому чи іншому секторі сосуда.

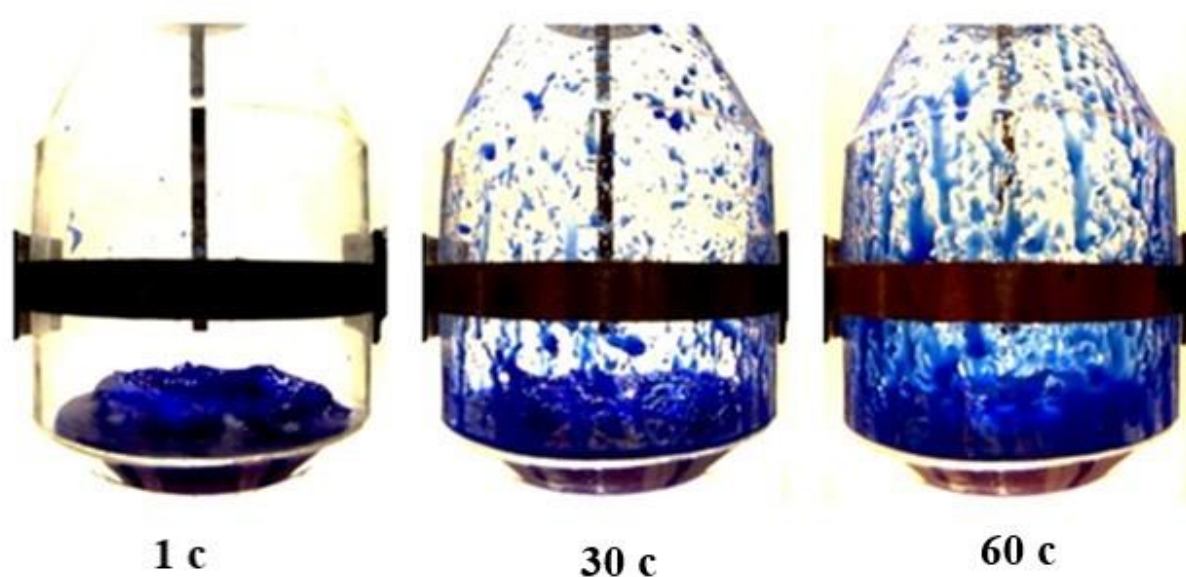


Рисунок 3.9. – Кінограма набризкування шлакового гарнісажа на поверхню футерівки конвертера (клейстер + тіосульфат натрію).

Як видно з рисунка 3.9 «наростання» гарнісажного шару більшою мірою схильні до зони «кишень» (стик нижнього конуса і циліндра) та зони цапф. Ці ділянки футерівки агрегатів, як встановлено, і є найбільш «проблемними» з точки зору випереджуючого зносу і труднощів у виконанні гарячих ремонтів методом підварювання і ошлакування.

Спеціально підібрана, за своїми фізичними властивостями моделююча речовина (сплав Вуда + молібденова крихта), забезпечила можливість отримання кількісних даних (рівномірність, «ефективна» кількість, у т. ч. в одиницю часу, гарнісажного шару) про механізм і методи нанесення гарнісажу в залежності від зміни параметрів продування (висота фурми, витрата і т. ін.) і властивостей шлаку.

Набризкування здійснювали, як безперервно, так і дискретно для визначення маси гарнісажу, що наносили. На рисунку 3.10 представлена кінограма динаміки утворення гарнісажного покриття з використанням сплава Вуда.

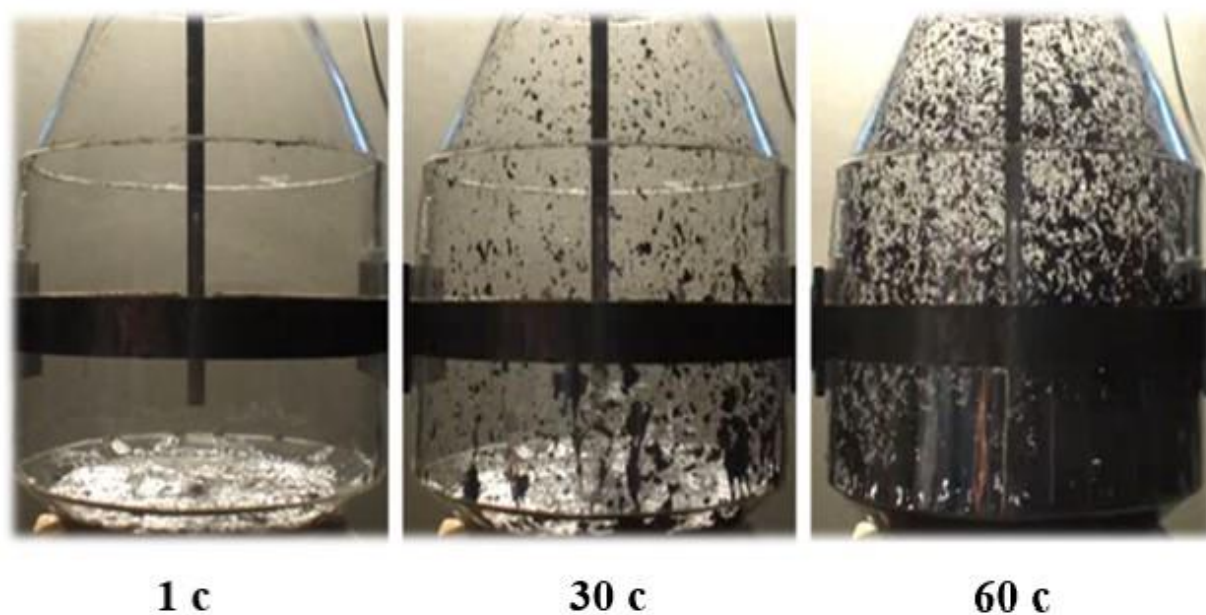


Рисунок 3.10. – Кінограм набризкування шлакового гарнісажу на поверхню футерівки конвертера (фізична модель: сплав Вуда + диспергована фаза (Mo)).

Звертає на себе увагу той факт, що динаміка утворення гарнісажного шару, тобто її якісна картина, представлена на рисунку 3.9. і рисунку 3.10 практично ідентичні і характеризуються «ущільненням» шару від нижнього конуса до зони опорного кільця. Це свідчить про адекватність фізичних властивостей підібраних моделюючих рідин і дотриманні визначальних критеріїв подібності, а також дає можливість здійснення кількісного аналізу процесу.

Так, на рисунку 3.11, в якості прикладу представлені фрагменти гарнісажного шару після 60 сек безперервного роздування (сплав Вуда). На рисунку 3.12 представлена залежність маси гарнісажного покриття, що наноситься від висоти положення продувної фурми при постійній витраті газу.

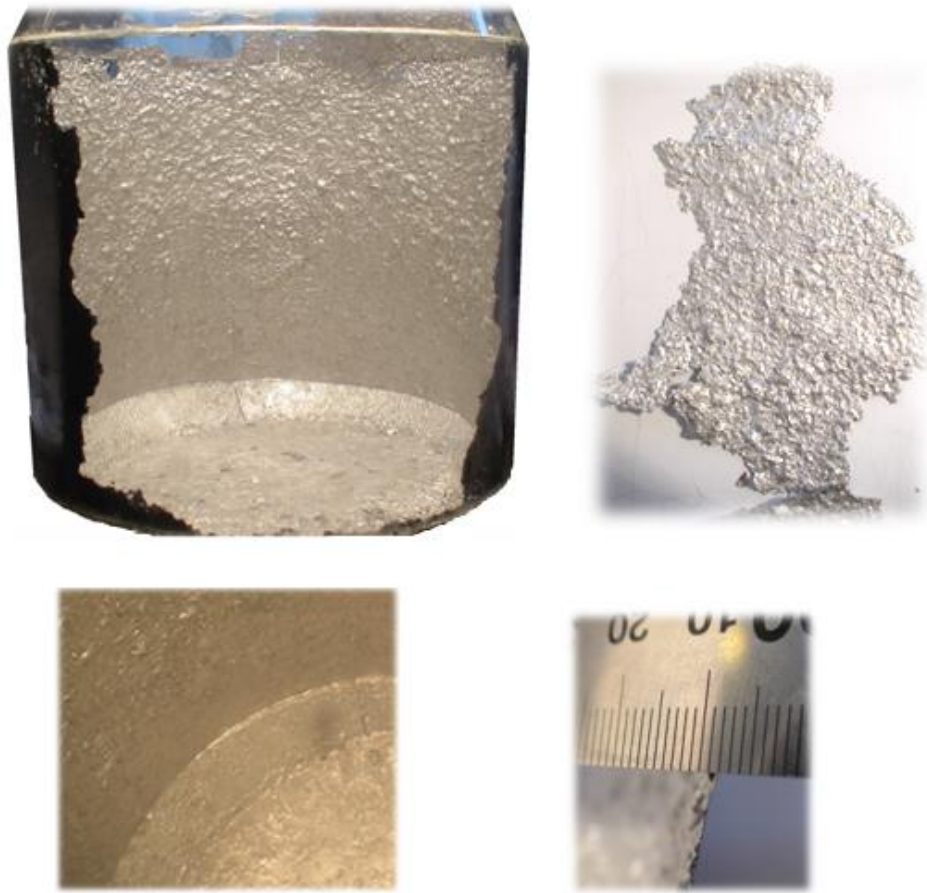


Рисунок 3.11. – Фрагменти аналізованого гарнісажного покриття.

Слід відзначити, що витрата газу, що вдувається обрана в максимальному обсязі відповідно виробничим реаліям цеху в складі 3-х 160 т конвертерів.

У перерахунку на натуральний об'єкт $Q_{г.} = 480 \text{ м}^3/\text{хв}$, а $P_{г.} = 16 \text{ аті}$. Такі показники взяті в зв'язку з забезпеченням «ефективної» роботи 6-ти соплового наконечника (сопла Лавалю) і забезпечення максимального динамічного напору струменя азоту в процесі роздування.

На рисунку 3.13 показана залежність динаміки утворення гарнісажного шару (в одиниці часу, г/с) від об'ємної частки диспергованої твердої фази в рідині.

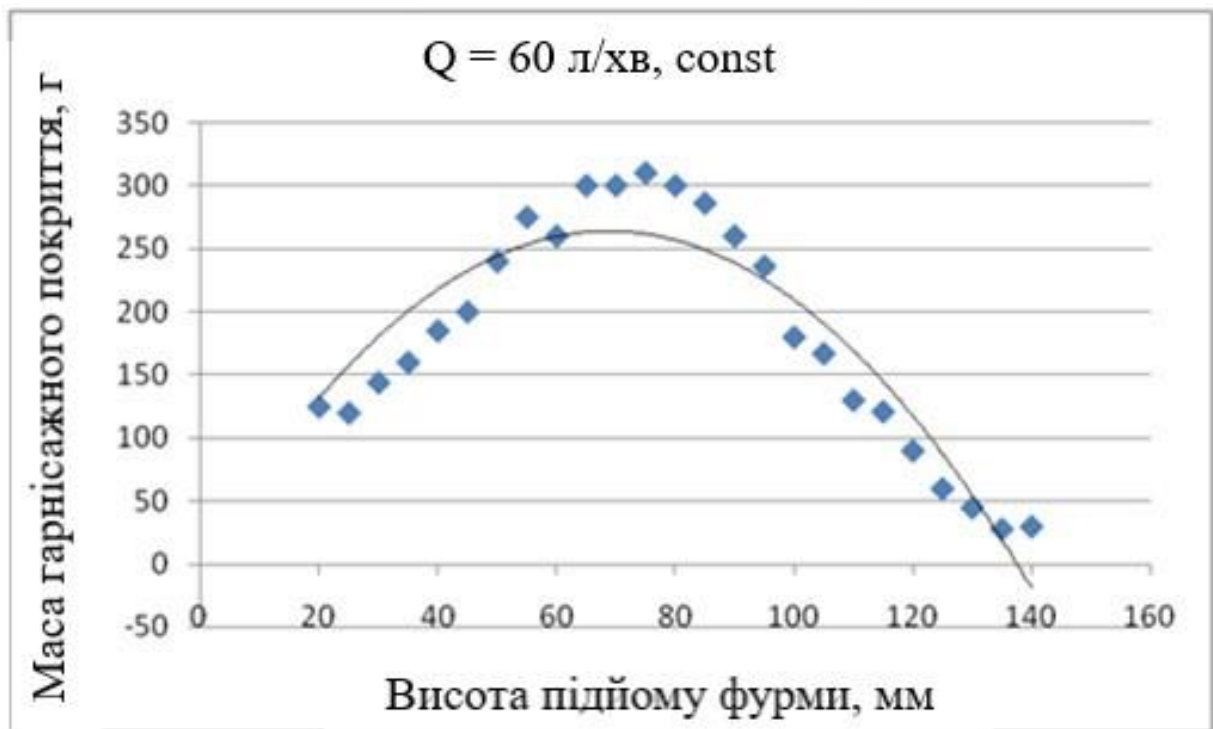


Рисунок 3.12. – Залежність маси гарнісажу від висоти підйому фурми.

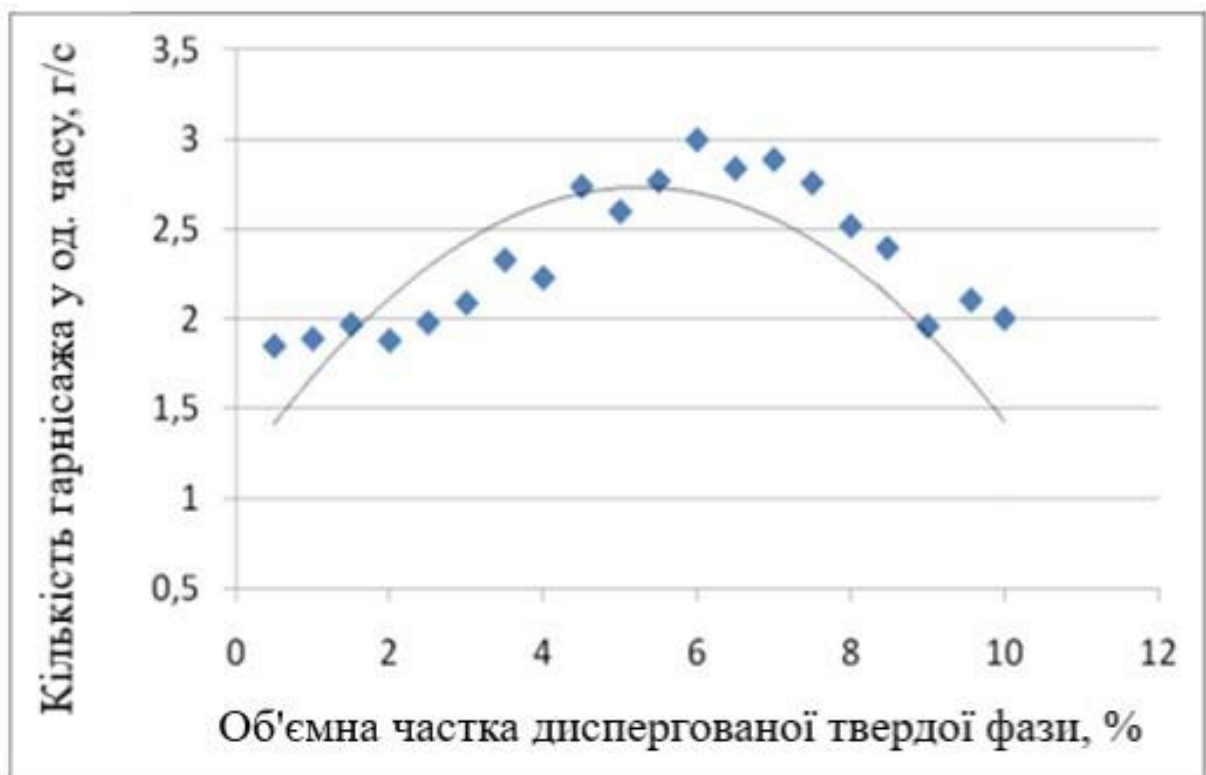


Рисунок 3.13. – Залежність динаміки нанесення гарнісажу від об'ємної частки диспергованої твердої фази

З представлених на рисунках 3.12 і 3.13 даних видно, що обидві залежності носять екстремальний характер, тобто мають точки перегину (оптимумів).

У першому випадку наявність оптимуму пояснюється особливостями кавітації рідини при зустрічних потоках продувних струменів, а саме зміною хвилі по межі каверни та величиною порцій відривання шлаку [112]. У другому випадку при постійній витраті та постійній висоті положення (оптимальному) фурми, визначальним критерієм є динамічна в'язкість розплаву, зростаюча зі збільшенням об'ємної частки диспергованої твердої фази [113]. Так, зі зростом об'ємної частки (0-7%) підвищення в'язкості сприяє укрупненню порцій (крапель), які «відриваються» від поверхні ванни, а в діапазоні (7-11%) відбувається різка гетерогенізація шлаку, що пояснює такий характер кривої.

Таким чином, у результаті фізичного моделювання процесу нанесення гарнісажного покриття вдалось встановити раціональні режими роздування, що забезпечують рівномірність його нанесення в зонах підвищеного ерозійного зносу. При цьому за рахунок об'єднання зовнішніх границь кратерів-каверн по периферії реакційних зон використання 6-ти соплового наконечника є більш ефективним, з точки зору рівномірності покриття.

Встановлено, що при постійній витраті азоту і його тиску в магістралі ($Q_{г.} = 480 \text{ м}^3/\text{хв}$, а $P_{г.} = 16 \text{ аті}$) маса гарнісажного покриття екстремально залежить від висоти положення фурми. Максимальній кількості нанесеного гарнісажу відповідає діапазон положення фурми в 1,3-1,7 м над рівнем шлакової ванни. При цьому об'ємна частка диспергованої твердої фракції в обсязі шлака, у кількості 6-7%, забезпечує максимально «ефективну витрату» гарнісажу, при інших рівних умовах.

3.4. Розробка та дослідження фізико-хімічних властивостей шлаків модифікованих магнезійними матеріалами

Нанесення шлакового гарнісажу на робочу поверхню футерівки кисневого конвертера методом роздування через верхню фурму струменями азоту, попередньо модифікованого магнезійними матеріалами кінцевого конвертерного шлаку, є ефективним методом збільшення ресурсу робочого шару вогнетривкої футерівки.

Знання особливостей нерівномірного зносу кладки, а також наявність можливості управління процесом роздування, у т. ч. фізико-хімічними властивостями кінцевого шлаку, дає можливість ефективного управління якістю та стійкістю гарнісажного покриття, що наноситься.

Одним з основних факторів, які забезпечують ефективність методу роздування шлаку азотом, є застосування спеціальних магнезійних добавок-модифікаторів для формування кінцевого шлаку з утворенням ерозійно- і корозійностійкого гарнісажу та низькою «агресивністю» до матеріалу вогнетривкої футерівки.

Застосування флюса т. зв. «універсального» складу практично не представляється можливим. Це пояснюється різними технологічними аспектами виробництва сталі, зокрема фізичними та хімічними властивостями сталеплавильних шлаків (вміст FeO, MgO, основності, в'язкості, кількості і т. ін.). Знання та контроль цих властивостей, для певних виробничих умов є необхідним для цілеспрямованої модифікації хімічного і фазового складів кінцевого конвертерного шлаку, що забезпечує підвищення температури його твердіння до рівня температури поверхні футерівки, і прогнозу динаміки утворення гарнісажу для оптимізації тимчасового режиму процесу.

Утворення гарнісажного шару на робочій поверхні вогнетривкої футерівки відбувається за рахунок твердіння шлакової суспензії, що утворюється при модифікації магнезійними матеріалами кінцевого

конвертерного шлаку, залишеного після випуску плавлення, під час її роздування струменями азоту високого тиску.

За рахунок тепловідведення через футерівку конвертера – від внутрішнього робочого шару, який контактує зі шлакової суспензією, до зовнішнього, відбувається охолодження гарнісажного шару та підвищення в ньому об'ємної частки твердих фаз. Тверднення шлаку і утворення захисного шару відбувається, коли об'ємна частка кристалізованих у ньому твердих фаз переходить через межі, необхідні для їх перколяції (50 - 55 об.%) з урахуванням рівномірного розподілу центрів початкової кристалізації і утворення твердих частинок, утворюючи твердий каркас в обсязі шлакового розплаву [114,115].

У результаті досліджень встановлено, що цей процес є керованим за допомогою «впровадження» необхідної об'ємної і масової кількості «зернової» важко розчинної фракції, що вноситься спеціальними магнезіальними модифікаторами.

Зокрема, як показує виробнича практика, присутні на українському ринку, флюси імпортного виробництва не забезпечують ефективності формування високостійкого гарнісажного покриття. Це, перш за все, пов'язано з технологічними особливостями їх виробництва, високою міцністю брикету, що забезпечує тривале транспортування на шкоду якісним характеристикам матеріалу.

Для підтвердження та подальшого розвитку даної гіпотези була розроблена комплексна методика оцінки впливу фізико-хімічних властивостей кінцевого шлаку до та після його модифікування на ефективність адгезії до робочої поверхні періклазовуглецевої цегли (у т. ч. змочуваності) і температурного інтервалу плавлення (тугоплавкості) гарнісажу [116]. Ці основні фактори, в кінцевому рахунку, і визначають стійкість захисного покриття.

Для проведення досліджень відповідно до розробленої методики було здійснено відбір зразків кінцевого («повалочного») шлаку з 10 промислових

плавок 350-тонних конвертерів ПАТ «МК «Азовсталь». У таблиці 3.4 представлено хімічний аналіз шлаку за даними ЦЗЛ комбінату.

Таблиця 3.4.

Хімічний склад кінцевого («повалочного») конвертерного шлаку

Марка сталі	Хімічний склад, %						Основність (В*)
	CaO	MgO	FeO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	
S355J2(T1)	42,66	4,95	16,04	15,72	0,72	1,51	2,9
10Г2ФБ	42,70	3,87	15,47	16,52	0,80	1,64	2,7
RPSTP-1A	42,63	4,00	15,22	15,94	0,78	1,60	2,8
SS400(H)	50,25	3,51	12,22	16,59	0,85	1,21	3,1
A342	43,79	4,36	16,3	14,16	0,74	1,33	3,2
A343	49,57	4,11	13,34	16,13	0,81	1,42	3,2
A344	48,18	4,14	14,37	15,47	0,78	1,43	3,2
B041	43,22	5,38	12,7	16,41	0,66	1,76	2,8
10Г2ФБ	38,32	6,29	18,54	14,72	0,69	1,55	2,9
A263	39,19	8,97	14,07	14,74	0,66	2,37	3,1
Усереднена проба	44,05	4,96	14,83	15,64	0,75	1,58	2,99

* - Основність (В) розраховано за формулою: $V = (CaO + MgO) / (SiO_2 + P_2O_5)$

Відібрані 10 зразків кінцевого шлаку усереднили в одну наважку.

Першою стадією проведених лабораторних досліджень була оцінка ефективності використання існуючих магнезійних флюсів, переважно імпортного виробництва, за розробленою методикою.

У якості зразків були відібрані 7 марок матеріалів, широко використовуваних у конвертерному виробництві металургійних підприємств України. Хімічний склад флюсів представлено в таблиці 3.5. При детальному

дослідженні фізико-хімічних властивостей представлених марок магнезійних флюсів встановлено, що всі, без винятку зразки не мають «постійного» гранулометричного складу і мають надзвичайно високу міцність. Так, при розсві подрібнених матеріалів фракційний склад різнився від 0,01 мм до 7 мм у різних пропорціях, які іноді розрізнялися на порядок від брикету до брикету однієї і тієї ж марки. При цьому міцність на стиск у вибілених випадках досягала 40-45 МПа при випробуванні на лабораторному гідравлічному пресі.

Таблиця 3.5.

Хімічний склад магнезійних флюсів імпорного виробництва

Фірма виробник	Марка флюса	Хімічний склад, %					
		SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	C
Dalmond (КНР)	"P55"	2,0	-	85,7	1,9	-	-
	"P60"	3,3	16,5	68,5	5,3	-	-
Комбінат «Магнезит» (РФ)	"P66"	3,1	16,3	74,2	5,2	-	-
	"P71"	3,0	-	75,2	5,9	-	4,5
ПАО «ДФКД»	"ОДФ"	3,1	57,0	34,0	4,0	-	-
Puyang (КНР)	"PN60"	0,5	3,7	68,3	6,5	0,2	-
	"PN65"	1,0	3,0	67,0	5,4	-	-

Присадка магнезійних матеріалів в якості модифікуючих добавок здійснювалась на рідкий конвертерний шлак, розігрітий до 1630 – 1650 °С, з оцінкою часу і характеру розчинення.

На рисунку 3.14 представлено час розчинення наважки магнезійних матеріалів 7 досліджуваних марок з об'ємом наважки у 10% від маси модифікованого шлаку.

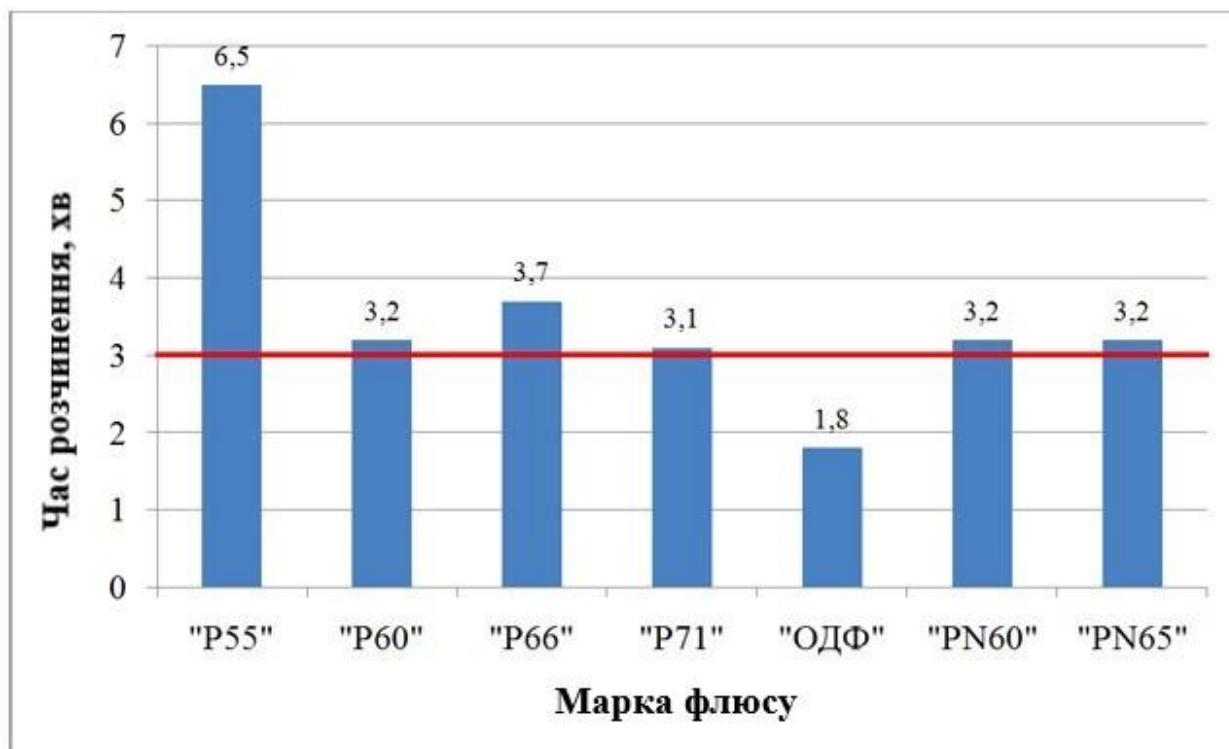


Рисунок 3.14. – Час розчинення наважки магnezіальних флюсів імпортного виробництва в якості модифікаторів шлаку.

З метою мінімізації часу виробничих простоїв вся операція з підготування та роздування шлаку азотом зазвичай не перевищує 3-4 хв, а на деяких підприємствах – 2-3 хв, при цьому на асиміляцію порції матеріалу відводиться не більше 1-1,5 хв, а найчастіше подачу флюсу здійснюють «під струмінь». У зв'язку з цим, представлені на рисунку результати свідчать про невідповідність флюсів марок «P55», «P60», «P66», «P71», «PN60» і «PN65» модифікуючих кінцевий шлак властивостями. З причини великої кількості зв'язки в брикеті його високої міцності, низької пористості, максимального вмісту обпалених компонентів у складі, значно зростає час розчинення матеріалу. При цьому динаміка розчинення залежить виключно від розмірів брикета і носить поверхневий характер, тобто під час модифікування шлаку присутній ефект «омилків» – нерозчинених за відведений час шматків. Такий характер веде до зниження ефективності модифікування кінцевого шлаку і значних перевитрат флюса.

На другій стадії досліджень виконувалась розробка власних складів модифікуючих добавок на основі регіональної сировини, у порівнянні з існуючими марками магнезійних флюсів. Принциповим аспектом на стадії розробки була доступність підходящої сировинної бази, що забезпечує порядок з економічною конкурентоспроможністю, досягнення необхідних фізико-хімічних властивостей модифікаторів.

Висока імпортозалежність від магнезійних матеріалів вітчизняних металургійних підприємств, пов'язана, перш за все, з відсутністю розвіданих запасів копалин магнезійної сировини (магнезитів) на нашій території, зумовила необхідність пошуку альтернативних джерел, доступних для промислових розробок.

Пропрацювавши сировинний ринок магнезійних матеріалів України та найближчого зарубіжжя, у т. ч. поклади техногенних відходів і баланс б/у магнезійних матеріалів на активах металургійних підприємств у шихтовку лабораторних складів включили ряд компонентів представлених у таблиці 3.6.

Брикетування розроблених складів здійснювали в лабораторних умовах з використанням органічного сполучного (меляса) у кількості 5-8% по масі. Присадка наважки як модифікуючої добавки, попередньо розрахованої маси (11-12% від маси шлаку) здійснювалась на рідкий шлак при температурі 1630-1650 °С. Оцінку часу та характеру розчинення визначали у т. ч. за допомогою аналізу фото і відео матеріалів безперервно записаного процесу.

На рисунку 3.15, у якості прикладу представлена кінограма розчинення розробленого модифікатора марки «БК-4».

Таблиця 3.6.

**Шихтові компоненти та розроблені склади
магнезійних модифікаторів кінцевого конвертерного шлаку**

Сировинні компоненти	Марки флюсів-модифікаторів											
	"X50"	"X65"	"БК-4"	"X70"	"БС"	"МСД"	"БДМ"	"Р70"	"ДМ"№1	"ДМ"№2	"Ф70/30"	"Ф60/40"
	%											
Бій MgO/С пегли*	0,0	70,0	65,0	25,0	70,0	0,0	70,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Серпентиніт мелений **	10,0	30,0	0,0	30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Серпентиніт кусковий **	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	20,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Доломіт обпалений **	45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Доломіт сирий**	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Магнезит обпалений *	45,0	0,0	0,0	45,0	0,0	45,0	0,0	65,0	40,0	50,0	70,0	60,0
Відходи доломітового виробництва **	0,0	0,0	35,0	0,0	0,0	0,0	30,0	35,0	60,0	50,0	30,0	40,0
Вугілля (АКО)	5,0	0,0	0,0	5,0	0,0	5,0	0,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Хімічний склад	%											
MgO	57,6	66,8	59,9	70,4	67,1	57,5	62,9	67,7	53,2	59,0	70,6	64,8
CaO	25,7	1,1	17,5	1,1	1,1	17,5	15,0	17,5	30,0	25,0	15,0	20,0
SiO ₂	9,7	11,1	4,2	11,1	11,1	7,4	3,2	2,5	4,0	3,6	2,0	3,0
Сума корисних оксидів	83,3	67,9	77,4	71,5	68,2	75,0	77,9	85,2	83,2	84,0	85,6	84,8
С (понад 100%)	4,7	10,5	8,8	4,7	10,5	4,7	9,5	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
п.в.п. (з урахуванням С)	7,1	11,8	20,5	9,5	11,8	9,9	15,1	12,1	24,3	20,1	16,4	18,0

*- тугоплавке, важко розчинне "зерно" фракція 2-6 мм (спечений магнезит, периклаз);

** - легкорозчинний наповнювач, фракція 0-1мм

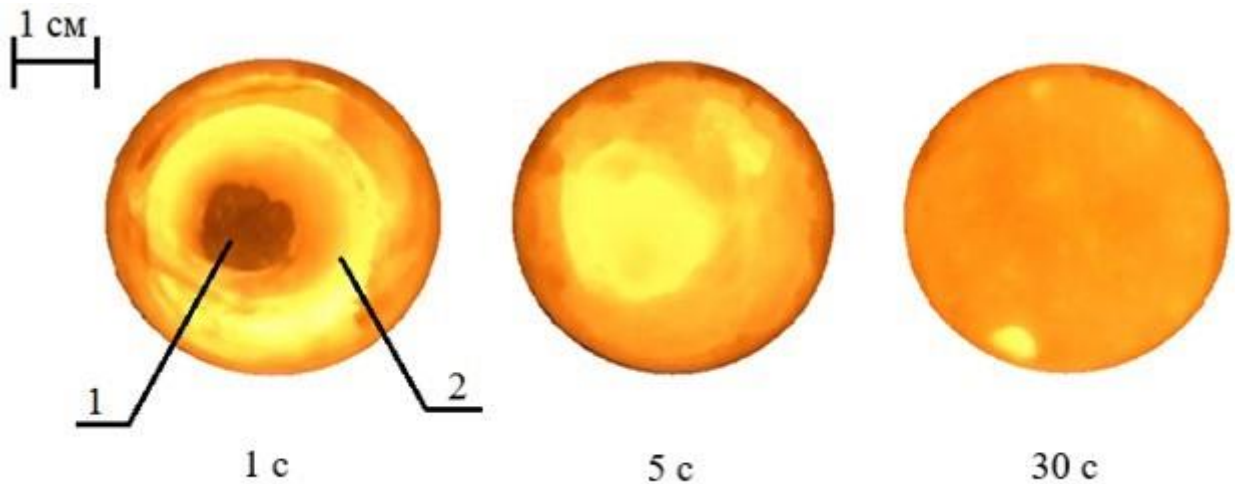


Рисунок 3.15. – Характер розчинення модифікатора марки «БК-4», де 1 – наважка «БК-4», 2 – рідкий шлак.

Як впливає з рисунка 3.15, за рахунок оптимально підбраного шихтового (у т. ч. зв'язуючого) та гранулометричного складу матеріалу, наважка за 30-31 с повністю асимілювалась шлаком. При цьому мілкодисперсна магnezіальна складова розчинилась у розплаві, а велика фракція (2-6 мм), що представляє собою «зерна» периклаза рівномірно розосередилась в обсязі модифікуемого шлаку. У результаті шлак придбав гетерогенний стан, з підвищенням позірної в'язкості.

На рисунку 3.16 представлена гістограма часу розчинення наважок розроблених лабораторних складів магnezіальних модифікаторів.

Одним з основних завдань при розробці лабораторних складів була мінімізація часу асиміляції наважки модифікатора шлаком. З рисунку 3.16 видно, що час розчинення (асиміляції) розроблених складів не перевищує 60 секунд.

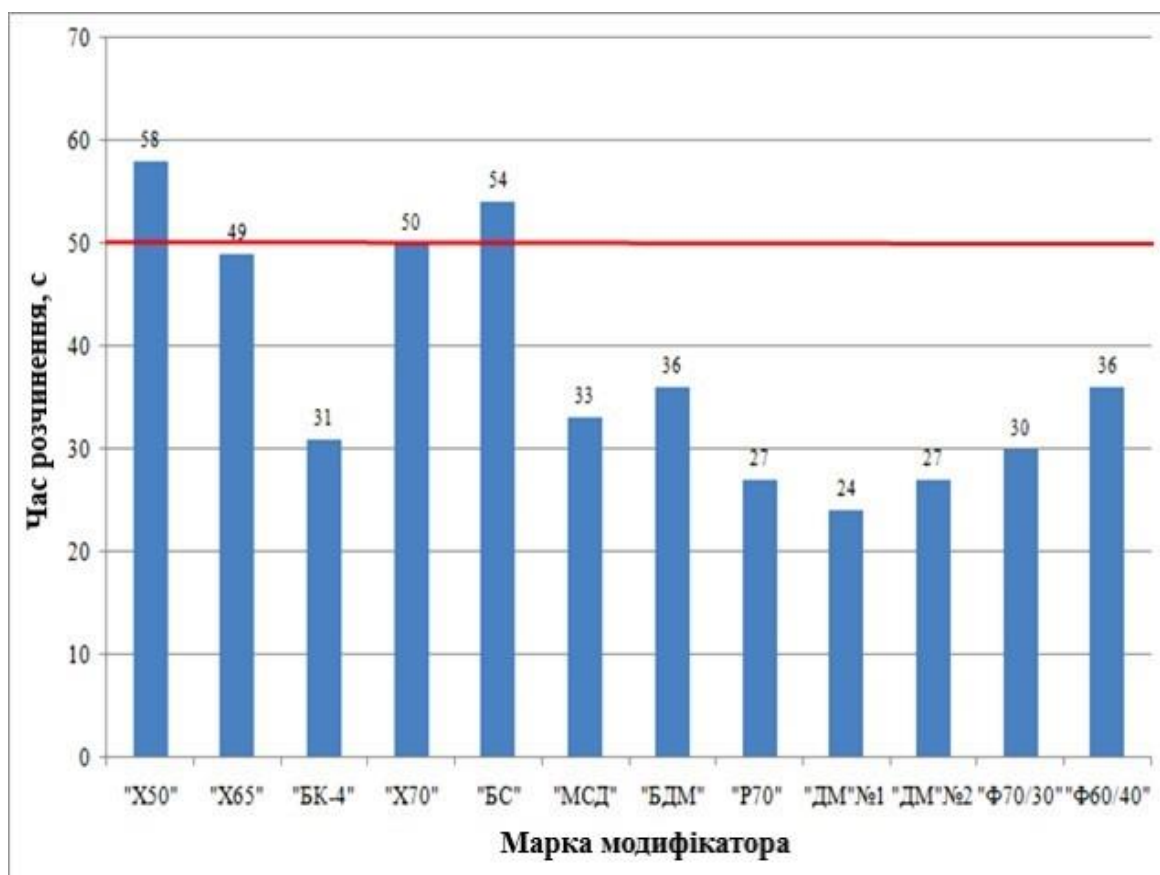


Рисунок 3.16. – Час розчинення (асиміляції) розроблених магnezіальних складів.

З технологічної точки зору оптимальним періодом засвоєння флюсу прийнято вважати діапазон у $\approx 20-40$ с, відповідний часу, відведеному на 1-2 похитування конвертера зі шлаком, що модифікується, перед початком подачі азоту на роздування. Властивостям асиміляції такої інтенсивності відповідають зразки модифіковані складами «БК-4», «МСД», «БДМ», «P70», «ДМ»№1», «ДМ»№1», «Ф70/30» и «Ф70/30».

Наступною не менш важливою задачею при розробці експериментальних модифікаторів було забезпечення оптимальних в'язкісних характеристик шлакового розплаву, що забезпечують його ефективне роздування азотом.

Тому паралельно з визначенням часу та характеру засвоєння наважок, розроблених магnezіальних модифікаторів, відбувався вимір динамічної та

позірної в'язкості підготовленого шлаку, модифікованого як існуючими марками флюсів, так і розробленими. Зокрема, на цій стадії експериментів здійснювався відбір проб шлаку для його хімічного та мінералогічного аналізу.

Як відомо, однією з найважливіших фізичних властивостей розплавлених шлаків є їх в'язкість. Властивість в'язкості тісно пов'язана зі структурою рідини та визначається міжчастковою взаємодією, тобто силами взаємодії атомів, іонів або молекул, складових рідини. Таким чином, в'язкість є однією з найбільш структурно чутливих характеристик рідини. Тому її вивчення поряд з вивченням інших фізико-хімічних властивостей дає можливість визначення структури шлакових розплавів, природи і величини сил взаємодії між компонентами. [117, 118].

Відомо [119, 120], що для оцінки ступеня деполімерізації розплаву використовується відношення мольних часток іонів кисню, що не володіють з'єднувальною функцією до атомів кисню, які беруть участь в утворенні полімерних аніонів – (NBO/T). Експериментально встановлено, що в'язкість шлакового розплаву знижується з ростом його деполімерізації, і навпаки, різко зростає при наближенні (NBO/T) до 0. Параметр (NBO/T) визначається хімічним складом шлакового розплаву і розраховується за формулою:

$$NBO/T = (Y_{NB}/X_T) \quad (4.1)$$

$$Y_{NB} = 2[x(CaO) + x(MgO) + x(FeO) + x(MnO)] + x(Na_2O) + x(K_2O) + 6(1 - f)x(Fe_2O_3) - 2xAl_2O_3 - 2fx(Fe_2O_3) \quad (4.2)$$

$$X_T = X(SiO_2 + 2X(Al_2O_3) + 2fx(Fe_2O_3) + x(TiO_2) + 2x(P_2O_5)) \quad (4.3)$$

$$f = x(Fe^{3+}) / (x(Fe^{3+}) + x(Fe^{2+})) \quad (4.4)$$

де $x(i)$ – мольна доля i -го компонента.

Таким чином, збільшення концентрації оксидів SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , P_2O_5 , Fe_2O_3 і т. ін. призводить до зростання в'язкості шлакового розплаву, а збільшення концентрації оксидів CaO , MgO , FeO , Na_2O , K_2O і т. ін. (що мають більш іонний характер) призводить до зниження його в'язкості.

Однак, з підвищенням основності шлаку, тобто збільшенням концентрації в ньому CaO і MgO , відбувається зниження його в'язкості, але лише до певної межі. Багаті CaO і MgO високоосновні шлаки малорухливі [121], оскільки при перевищенні концентрації основних оксидів над межею розчинності в'язкість шлаку підвищується внаслідок диспергування в ньому нерозчинених високовогнетривких фаз і утворення суспензії.

Відомо, що основні рідкі шлаки при температурах сталеплавильних процесів (~ 1650 °C) мають позірну в'язкість (0,05-0,15 Па·с). При цьому характерною особливістю таких шлаків є можливість течії по поверхні вогнетривів з такою же температурою. В'язкість суспензії вище в'язкості її рідкого дисперсійного середовища і зростає зі збільшенням об'ємного наповнення її твердою фазою.

Дисперсні системи (суспензії) можна розділити на [122]:

- золи, які представляють собою дисперсію твердої речовини в рідкому середовищі при малому об'ємному наповненні, поводять себе як рідини;
- гелі, що представляють собою дисперсію твердої речовини в рідкому дисперсійному середовищі, що відрізняється наявністю безперервної структурної сітки диспергованих частинок;
- студні, тверда фаза яких безперервна по всьому обсягу (перколірована), структура близька за своїми властивостями до твердих тіл.

При підвищенні об'ємної концентрації твердої фази відбувається перехід з золю в гель, і далі, при її перколяції, у студень. При підвищенні об'ємного наповнення в'язкість гелю безперервно зростає, прагнучи до нескінченності при перколяції твердої фази (перехід з гелю в студень).

У разі полідисперсної суспензії, де дисперсна тверда фаза представлена двома фракціями з різницею в розмірах не менше ніж на порядок, суспензія

дрібної фракції в дисперсійному середовищі може бути представлена як дисперсійне середовище для великої фракції [122, 123].

Відповідно введення в суспензію дисперсного наповнювача у вигляді 2-х фракцій дозволяє досягати більшої концентрації твердої фази у порівнянні з монодисперсним наповненням, при постійній в'язкості. Отже, присутність твердих частинок у підвішеному стані в шлаку забезпечує його гетерогенність і уповільнення течії по поверхні вогнетрива. Тоді як, поряд із забезпеченням значної кількості тугоплавких феритних фаз існує можливість управління «дисперсним» складом гарнісажного шлаку за допомогою введення модифікатора зі спеціально підбраною фракційною складовою.

Регулювання кількості і якості як легкоплавких (легкорозчинних), так і тугоплавких (важкорозчинних) компонентів у модифікаторі, враховуючи конкретні умови експлуатації конвертера, дозволяє досягти оптимальних фізико-хімічних властивостей кінцевого шлаку і, як наслідок, високої стійкості гарнісажного покриття.

Вважається, що область насичення MgO в основному конвертерному шлаці перебуває на рівні 7-9% і залежить, перш за все від його основності (рисунок 3.17). При цьому, такий насичений шлак володіє хорошою рідкорухомістю та низькою агресивністю до вогнетривкої футерівки конвертера [124-126].

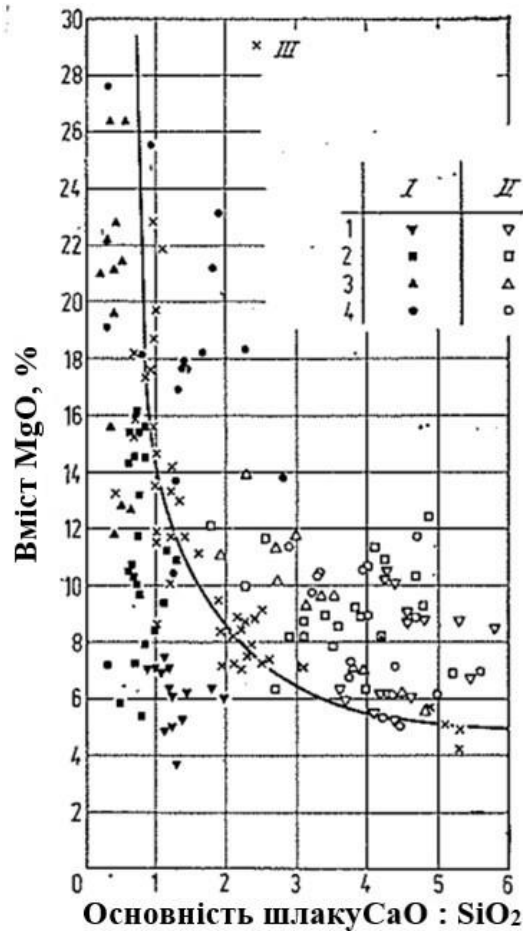


Рисунок 3.17. – Залежність ступеня насичення шлаків промислових конвертерних плавов від їх основності при температурі 1600 °С [127], де I – початковий шлак; II – кінцевий шлак; III – насичений шлак; 1,2,3,4 – серія дослідів.

З метою визначення ступеня впливу «зернової», важкорозчинної фракції (2-6 мм) в обсязі підготовленого шлакового розплаву на його позірну в'язкість усереднену наважку шлаку спочатку модифікували легкорозчинним магнезійним компонентом до концентрації $\text{MgO} \approx 8\%$. Потім здійснювали присадку крупнофракційного наповнювача в різних кількостях і проводили виміри в'язкості. Експериментальна залежність позірної в'язкості модифікованого шлаку від вмісту важкорозчинного, магнезійного компонента фракцією 2-6 мм представлена на рисунку 3.18.

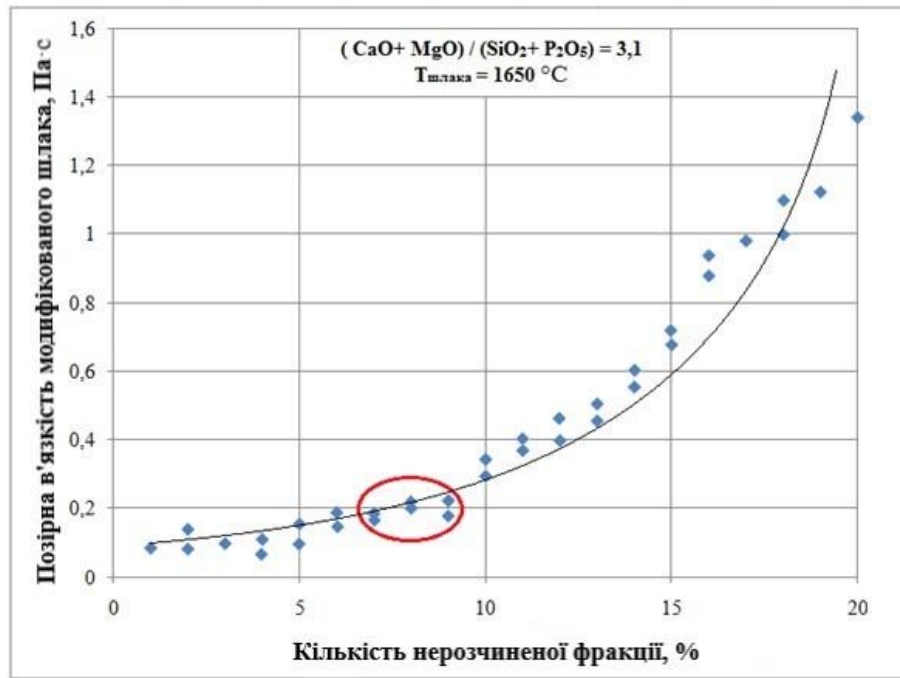


Рисунок 3.18. – Залежність позірної в'язкості підготовленого шлаку від кількості нерозчинених «зерен» (мас.%).

З представленої залежності видно, що з підвищенням кількості диспергованої твердої (нерозчиненої) фази в шлаку його в'язкість зростає. При досягненні концентрації 7-9% «зернової» фази шлак має «задовільну» в'язкість для здійснення операції набризкування. Тоді як зі збільшенням кількості «зерен» до 10% і більше спостерігається різке підвищення в'язкості пов'язане з інтенсивною гетерогенізацією розплаву. Такі дані добре корелюються з результатами фізичного (холодного) моделювання процесу роздування (8% зернової фракції).

На підставі отриманих даних сформульовано концептуальний підхід до хіміко-гранулометричних параметрів модифікаторів, що дозволяють цілеспрямоване управління фізико-хімічними властивостями кінцевого конвертерного шлаку. Так, наявність в магнезійному брикеті важкорозчинних компонентів у кількості 60 - 65% (мас.) щонайменше, 80% яких мають фракцію 2-6 мм, забезпечують необхідний обсяг «зернового» наповнювача і формування арматурного «скелета» в охолодженому гарнісажі

[125]. При цьому легкокорозчинний дрібнодисперсний, магнезійний компонент, взятий у кількості 40 - 45% (мас.) насичує шлак оксидом MgO до рівня 7-8% вже в перші секунди роздування.

Позитивний ефект від розроблених модифікуючих добавок досягається в результаті присаджування наважки у кількості 11-12% від маси кінцевого шлаку, що залишився. Вимірювання в'язкості усередненої наважки шлаку після модифікування експериментальними складами зі строго регламентованими хіміко-гранулометричними складами, здійснювали при температурі 1630-1650 °С. Паралельно проводили порівняльний аналіз «лабораторних» марок з існуючими магнезійними флюсами.

На рисунку 3.19 представлена гістограма позірної в'язкості кінцевого конвертерного шлаку модифікованого розробленими магнезійними матеріалами.



Рисунок 3.19. – Позірна в'язкість кінцевого конвертерного шлаку модифікованого експериментальними складами.

Узагальнюючи наведені дані, слід зазначити, що позірна в'язкість всіх зразків модифікованого шлаку знаходиться в діапазоні 0,1 - 0,25 Па·с і є

«задовільною» з точки зору «роздувності» розплаву на гарнісаж. Однак, як показує лабораторна практика, оптимальне значення даного параметра знаходиться в межах 0,20 - 0,25 Па·с, що забезпечує не тільки ефективне роздування, але й помітне зниження «плинності» нанесеного гарнісажного шару по поверхні вогнетрива, тобто його більш ефективну адгезію. Таким властивостями відповідають зразки шлаку, модифіковані складами «БК-4», «БДМ», «Ф70/30» та «Ф60/40».

В якості порівняльного прикладу на рисунку 3.19. представлена позірна в'язкість зразків шлаку модифікованих існуючими марками магнезійних флюсів «Р60» і «Р66», які не мають певного гранулометричного складу. Як видно з гістограми, позірна в'язкість таких зразків на 40-50% нижче, ніж шлаків модифікованих експериментальними матеріалами («Р70», «Ф70/30») аналогічного хімічного складу.

Паралельно з визначенням позірної в'язкості шлаку, після модифікації розробленими матеріалами здійснювали відбір проб для проведення петрографічного аналізу (рисунок 3.20).



Рисунок 3.20 – Зразок шлаку, що модифіковано складом «БК-4».

У пробі шлаку, що представлена на рисунку 3.20 видна присутність непрореагувавших (недорозчинених) фракцій розміром 1-3 мм, т. зв. «зерен» в обсязі шлакового гарнісажу, «оплавлених» по периферії.

За результатами оцінки макро- і мікроструктури зразків шлаку, визначили його мінералогічний склад. Встановлено, що у всіх зразках гарнісажного шлаку модифікованого експериментальними складами присутні тверді частинки, представлені непрореагувавшими в процесі плавлення залишками вапна і доломіту від мікро- до макро- включень. Тверді частинки периклазу, присутні в складі модифікатора, що вносяться до шлаку, розташовуються досить рівномірно в його обсязі та мають сталий розмір від 0,5 до 4 мм. При цьому такі «зерна» носять яскраво виражений характер центрів кристалізації та сприяють новоутворенню на цих центрах кристалів тугоплавких мінералів.

На рисунку 3.21, в якості прикладу представлена мікроструктура зразка шлаку модифікованого складом «БК-4». Дослідження виконувались на растровому електронному мікроскопі РЕМ 106U.

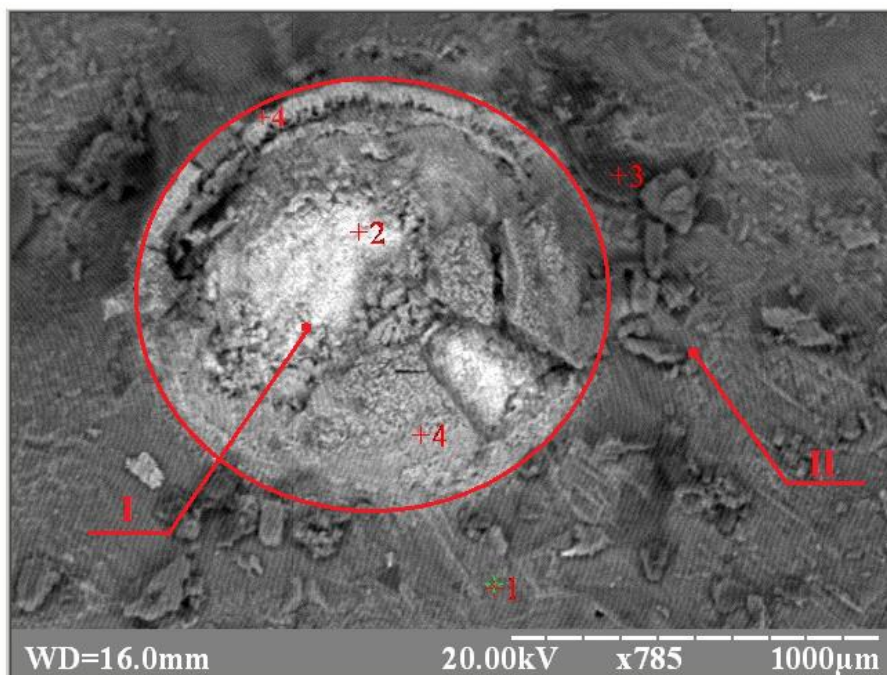


Рисунок 3.21. – Мінералогічний склад модифікованого шлаку складом «БК-4»: де I – непрореагувавше «зерно» розміром 1,8 мм; II – шлак; (+1) – дікальцієвий ферит; (+2) – периклаз; (+3) – монтичелліт; (+4) – вюстит-периклаз. Збільшення у 785 раз.

З рисунку 3.21 видно, що армуючий «скелет», що складається з введених непрореагувавших «зерен» периклазу з новоутвореними по периферії тугоплавкими мінералами вюстита-периклаза і монтичелліта цементується залишковим розплавом, з якого при повному затвердненні шлаку кристалізується легкоплавкий браунміллеріт з ізоморфною домішкою дікальцієвого фериту, феромонтичелліт і вюстит.

Порівняльні дані мінералогічних досліджень зразків шлаку модифікованих усіма розробленими складами представлені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7.

**Мінералогічний склад модифікованих зразків кінцевого
конвертерного шлаку**

Марка модифікатора	Вміст мінералів, %
	Сума тугоплавких мінералів
«Х50»	66,89
«Х65»	65,77
«БК-4»	70,83
«Х70»	66,40
«БС»	65,80
«МСД»	65,32
«БДМ»	72,51
«Р70»	73,20
«ДМ№1»	68,65
«ДМ№2»	69,97
«Ф70/30»	75,21
«Ф70/30»	70,56

Всі зразки модифікованого шлаку характеризуються високим вмістом тугоплавких мінералів. Однак варто виділити деякі модифікатори («Х50», «Х65», «Х70», «БС», «МСД»), у складі шихтування яких в якості легкокорозчинного дрібнодисперсного наповнювача використовувався серпентиніт. Серпентиніт на $\approx 40\%$ складається з SiO_2 і тому внесення цього оксида до складу гарнісажа через присадку модифікатора помітно знижує

кількість тугоплавких фаз (таблиця 3.7), а отже і термостійкість гарнісажного шару.

З метою перевірки і підтвердження представлені концепції характеризуючої хіміко-гранулометричний склад ефективного магнезійного модифікатора шлаку «під роздування» на заключному етапі здійснювали оцінку адгезії підготовленого гарнісажу до періклазовуглецевого вогнетрива. Паралельно оцінювали термостійкість (тугоплавкість) гарнісажного покриття при температурах конвертерного плавлення. Про адгезії судили за крайовим кутом змочування «підкладки» краплею шлаку, а тугоплавкість визначали «модифікованим» методом «лежачої» краплі. При цьому змочуваність характеризує «схильність» твердого матеріалу до контакту з однією рідиною (в даному випадку шлаковий розплав різного хімічного складу) ніж з іншою.

На підготовлений вогнетривкий куток (рисунок 3.22), нагрітий до температури футерівки конвертера перед роздуванням (1600 °С), поміщалась крапля модифікованого шлаку ($M_k = 4-5$ г).



Рисунок 3.22. – Схематичне уявлення визначення адгезії гарнісажного покриття до вогнетривкої «підкладки» (кут змочування $\Theta = 86^\circ$).

За допомогою масштабування фото і відео зйомки даного процесу визначались крайові кути змочування шлаку в залежності від його хімічного складу. В результаті експериментів встановлено, що основними параметрами, які визначають змочування, є вміст (FeO) і (MgO) у шлаці.

На рисунку 3.23 представлена залежність крайового кута змочування від вмісту FeO в шлаці з основністю (B) = 3,0 і фіксованою концентрацією MgO в 7-8% (близькою до межі його розчинення). На рисунку 3.24 показана залежність крайового кута змочування від вмісту MgO в шлаку з фіксованою концентрацією FeO 13-14%.

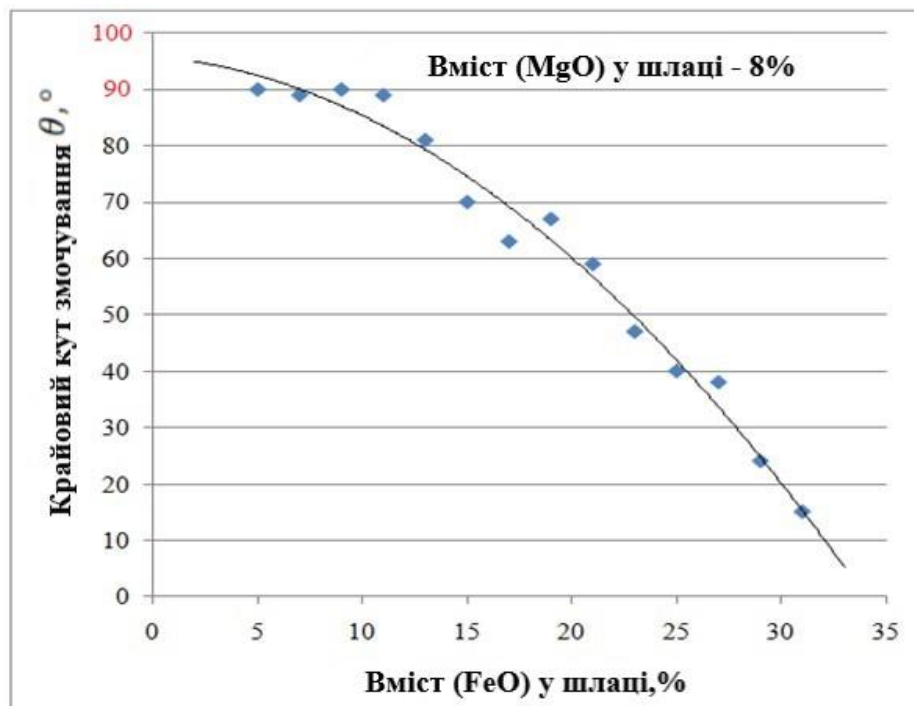


Рисунок 3.23. – Залежність крайового кута змочування від вмісту (FeO) у шлаці. При $\theta \geq 90^\circ$ – «негативне змочування».

Встановлено, що при вмісті (FeO) більше 25% кут змочування при вмісті MgO – 7-8% становить менше 30° . При зниженні вмісту FeO кут змочування збільшується і при наближенні до 13-15% становить $\sim 75-85^\circ$.

Подальше зниження концентрації FeO призводить до збільшення $\theta > 90^\circ$. При цьому змочування різко погіршується, а згодом відсутнє.

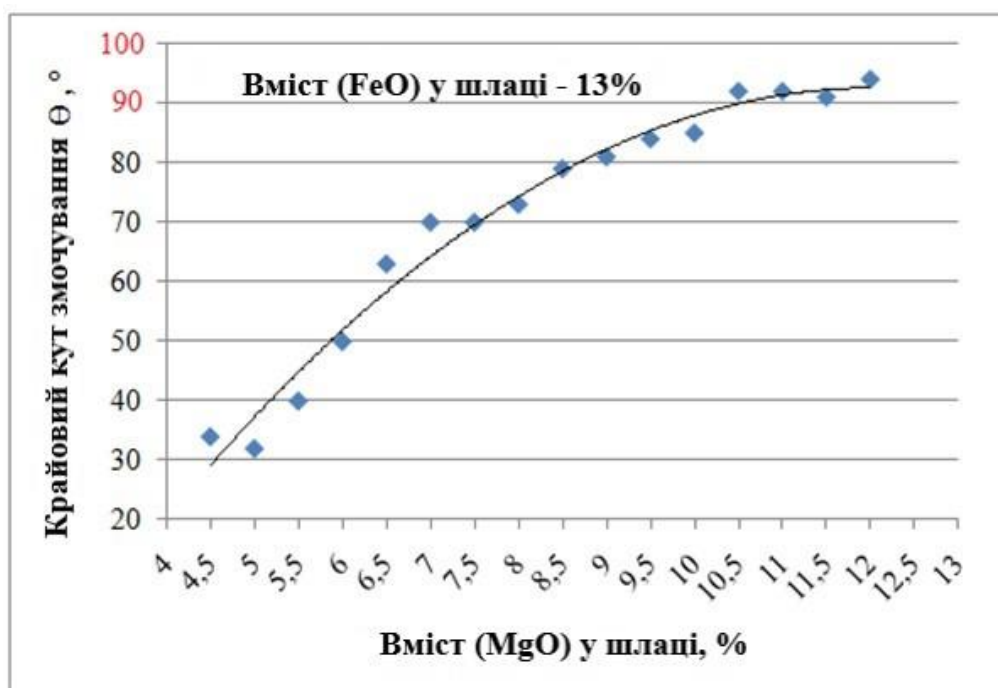


Рисунок 3.24. – Залежність крайового кута змочування від вмісту (MgO) у шлаці. При $\theta \geq 90^\circ$ – «негативне змочування».

Збільшення в шлаці вмісту MgO викликає погіршення змочування періклазовуглецевого матеріалу, причому ступінь підвищення кута θ сильно залежить від окислення шлаку. При вмісті FeO на рівні 30% збільшення концентрації MgO від 4 до 12% викликає зростання кута змочування з 10 до 20° , а при вмісті FeO на рівні 13-15% аналогічне підвищення MgO призводить до зміни кута до 90° (змочування відсутнє).

У сукупності із забезпеченням крайового кута змочування (θ), який характеризує ефективне «скріплення» гарнісажу з поверхнею футерівки, здійснювали фактичне вимірювання його тугоплавкості. Оцінку температури плавлення зразка шлаку модифікованого експериментальним складом (у кількості 11-12% від маси шлаку) здійснювали за розробленою методикою, «лежачі крапля» - «вогнетривкий кут», описаною у 2 розділі даної роботи.

На рисунку 3.25, в якості прикладу, представлені зразки гарнісажного шлаку, які модифіковані лабораторними складами «БДМ», «ДМ№2» і «Х65» відповідно.

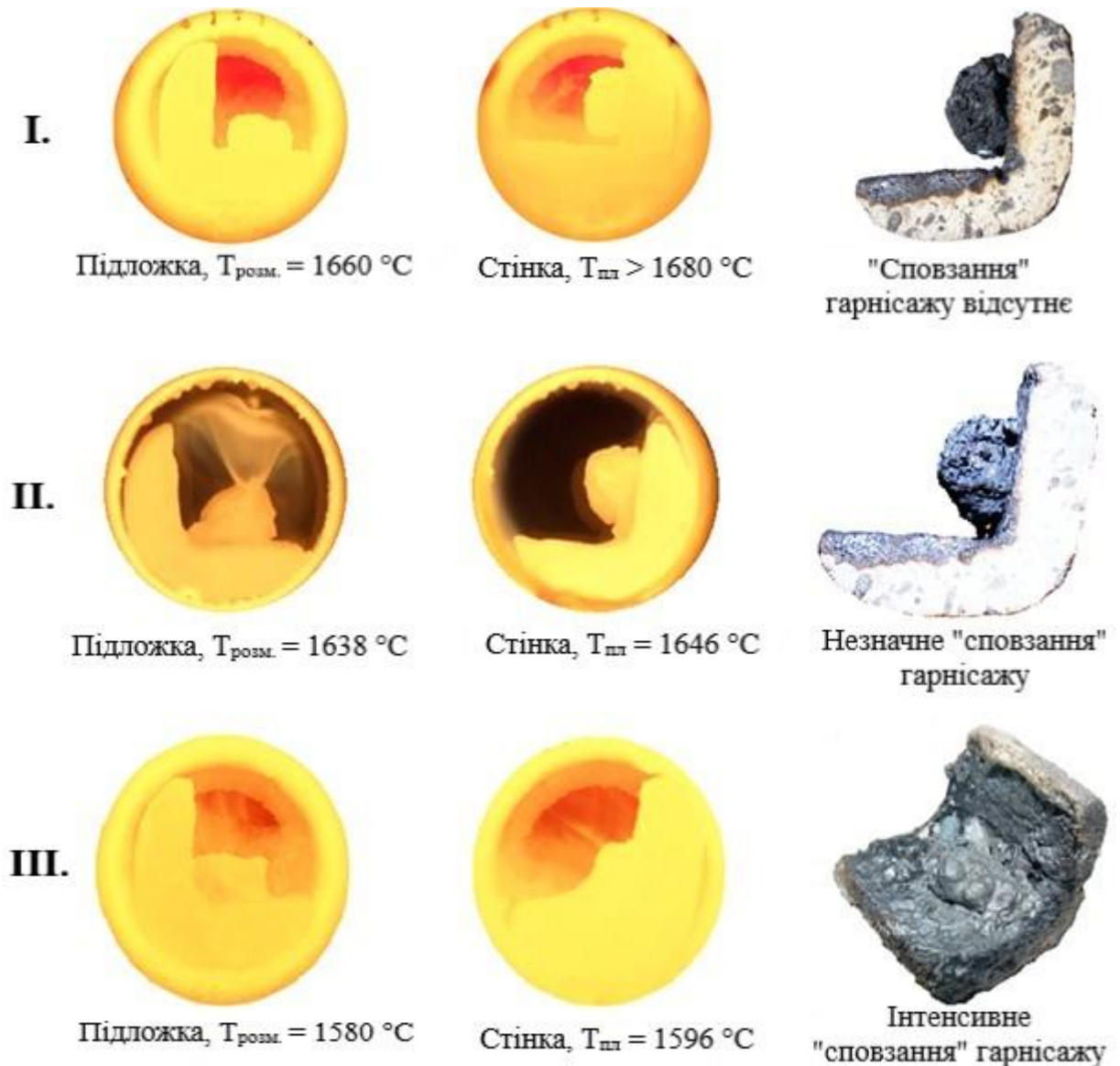


Рисунок 3.25. – Поведінка краплі гарнісажу в температурному інтервалі плавлення. I. – висока адгезія та тугоплавкість ($> 1680 \text{ }^{\circ}\text{C}$); II. – висока адгезія, низька тугоплавкість ($1646 \text{ }^{\circ}\text{C}$), незначне «сповзання» гарнісажу; III. – низька адгезія, незадовільна тугоплавкість ($1596 \text{ }^{\circ}\text{C}$), повніше «сповзання» гарнісажу

З представленого рисунка видно, що в першому випадку (рисунок 3.25, I)) при досягненні температур кінцевого періоду конвертерної плавки (1680 °С і більше) зразок шлаку, модифікований складом «БДМ», не досяг точки плавлення і не втратив адгезію до «кута», тобто «сповзання» захисного шару не спостерігалось. У другому випадку (рисунок 3.25, II)) вже по досягненню температури в 1638 °С, спостерігалось незначне поверхнєве оплавлення зразка шлаку з 11% присадкою модифікатора «ДМ№2». При цьому підвищення температури до 1646 °С зумовило незначне «сповзання» краплі по вертикальній стінці. Незадовільну якість гарнісажу представлено на рисунку 3.25 (III). Так в інтервалі 1580 - 1596 °С, зразок модифікованого шлаку повністю перейшов у рідку фазу та стік. Це пояснюється високим вмістом SiO₂ у складі модифікатора марки «Х65» і відповідне збільшення легкоплавких фаз в утвореному гарнісажі.

Узагальнені результати з оцінки величин тугоплавкості зразків гарнісажу модифікованих експериментальними складами представлені на рисунку 3.26.

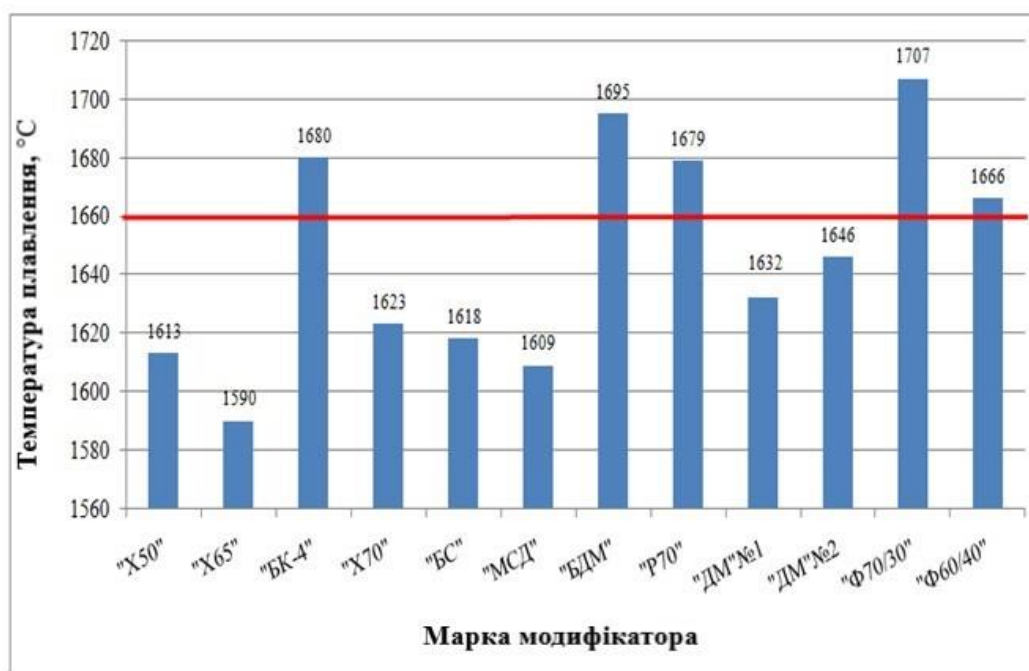


Рисунок 3.26. – Температура плавлення зразків шлаку, що модифіковані лабораторними складами.

Враховуючи, що середня максимальна температура випуску металу з конвертера становить 1650 - 1670 °С, задовільною тугоплавкістю гарнісажного шару слід вважати 1660 °С і більше. Як видно з представленого рисунка 3.26, значно перевищують цю межу тільки 4 марки експериментальних складів – «БК-4», «БДМ», «Р70» і «Ф70 / 30».

Експериментальні дані фізико-хімічних властивостей модифікованих розробленими складами зразків гарнісажу представлені у зведеній таблиці 3.8. В результаті аналізу масива отриманих експериментальних даних встановлено, що тільки 4 марки розроблених модифікаторів – «БК-4», «БДМ», «Р70» і «Ф70/30» забезпечують ефективне наведення, роздування та необхідну тугоплавкість гарнісажного шлаку. При цьому склади «БК-4» і «БДМ» виготовлені на основі бою периклазовуглецевої цегли та в якості «зернової» складової мають високочистий периклаз, а «Р70» і «Ф70 / 30» на основі спеченого магнезиту фракцією 2-6 мм.

Таблиця 3.8.

Фізико-хімічні властивості модифікованих зразків шлаку

Марка модифікатора	Основні властивості шлаку				
	Час розчинення наважки, с	Позірна в'язкість, Па·с	Сума тугоплавких мінералів, %	Крайовий кут змочування (θ), °	Температура плавлення, °С
«Х50»	58	0,171	66,89	69	1613
«Х65»	49	0,188	65,77	68	1590
«БК-4»	31	0,201	70,83	81	1680
«Х70»	50	0,178	66,40	77	1623
«БС»	54	0,193	65,80	76	1618
«МСД»	33	0,18	65,32	70	1609
«БДМ»	36	0,239	72,51	84	1695
«Р70»	27	0,2	73,20	82	1679
«ДМ№1»	24	0,179	68,65	76	1632
«ДМ№2»	27	0,196	69,97	77	1646
«Ф70/30»	30	0,223	75,21	87	1707
«Ф70/30»	36	0,244	70,56	81	1666

Таким чином встановлено, що основними параметрами, які визначають змочування, є зміст (FeO) і (MgO) в шлаку. Так, при вмісті (FeO) більше 25% кут змочування при вмісті MgO – 7-8% менше 30 °. При зниженні вмісту FeO кут змочування збільшується та при наближенні до 13-15% становить ~ 75-85 °. Подальше зниження концентрації FeO призводить до збільшення $\theta > 90^\circ$, при цьому змочування різко погіршується, а згодом стає відсутнім. Збільшення в шлаку вмісту MgO, викликає погіршення змочування периклазовуглецевого матеріалу, причому ступінь підвищення кута θ сильно залежить від окислення шлаку. При вмісті FeO на рівні 30% збільшення концентрації MgO від 4 до 12% викликає збільшення кута змочування з 10 до 20 °, при вмісті FeO – 13-15% підвищення MgO з 4 до 10% призводить до зміни кута до 90 ° – змочування відсутнє.

На підставі отриманих даних сформульовано концептуальний підхід до хіміко-гранулометричних параметрів модифікаторів, що дозволяють цілеспрямоване управління фізико-хімічними властивостями кінцевого конвертерного шлаку [129-130]. Наявність у магнезійному брикеті важкорозчинних компонентів, у кількості 0,60 - 0,65 (мас.%), щонайменше 80% яких мають фракцію 2-6 мм, забезпечують необхідний обсяг «зернового» наповнювача та формування арматурного «скелета» в охолодженому гарнісажі. При цьому легкорозчинний, дрібнодисперсний, магнезійний компонент, узятий в кількості 0,4 - 0,45 (мас.%) насичує шлак оксидом MgO до рівня 7-8% вже в перші секунди роздування.

Розроблені склади на основі недефіцитних вітчизняних матеріалів у кінцевому рахунку мають високу швидкість розчинення в шлакових розплавах і забезпечують високу вогнетривкість, механічну міцність, а отже і стійкість гарнісажного покриття. На ряду з високою технологічною ефективністю відібраних магнезійних модифікаторів визначальним параметром при подальшому дослідно-промисловому виробництві стала собівартість сировинних компонентів. Так, у промислове виробництво

компанією ТОВ «ГІР-ІНТЕРНЕСНЛ» взяті дві марки «БК-4» і «БДМ», що мають більш низьку вартість.

3.5. Розробка та дослідження фізико-хімічних і експлуатаційних властивостей саморозтічних магнезійних ремонтних мас

На підставі доступної вітчизняної сировинної бази спільно з фахівцями компанії ТОВ «ГІР-Інжиніринг» розроблялась рецептура саморозтічної підварювальної магнезійної маси марки «GIR-RB-X».

Розробка здійснювалась за оригінальною методикою на установці роторної печі в три етапи [103-105]:

1 етап – підготовка зразків периклазовуглецевої цегли (конвертерної). Виготовлялась футерівка роторної печі. Для додавання адекватної подібності зразків з реальними «зношеними» вогнетривами конвертера в порожнині печі розплавляли шлакометалеву емульсію. У якості шлакометалевої емульсії виступав конвертерний шлак і метал (Ст3 кп). Основні фізико-хімічні параметри використовуваного шлаку представлені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9.

Хімічний склад конвертерного шлаку

	Хімічний склад, %						Основність (В*)
	CaO	MgO	FeO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	
Усереднена проба	47,05	7,31	18,83	17,64	1,75	0,58	2,91

* - Основність (В) розраховується за формулою: $V = (CaO + MgO) / (SiO_2 + P_2O_5)$

Футерівка роторної печі піддавалось зносу (просоченню) рідкими продуктами плавлення (шлакометалевої емульсією) протягом 3,5 годин.

2 етап – безпосередньо операція підварювання зношеної ділянки ремонтною масою різного складу в т. ч. еталонного.

В якості еталонного зразка за всіма фізико-хімічними та експлуатаційними параметрами виступала ремонтна маса марки «PN-RXB»

виробництва КНР. Маса взята в якості еталонної, оскільки використовується скрізь у конвертерних цехах України і ближнього зарубіжжя протягом 10 років і має позитивні відгуки з усіх без винятку підприємств.

Основні фізико-хімічні дані ремонтної маси марки «PN-RXB» представлені в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10.

Фізико-хімічні показники підварювальної маси марки «PN-RXB»

Найменування показника	Норма для марки	Методи контролю
	PN-RXB	
1. Масова частка загальної вологи W, % не більше	2	ГОСТ 22939.2
2. Гранулометричний склад, мм у межах	0-8	ДСТУ 3210
3. Масова частка оксиду магнію MgO, % не менше	65	ДСТУ 3305.8 (ГОСТ 2642.8)
4. Масова частка вуглецю С, % не менше	12	ГОСТ 23581.9
5. Межа міцності при стисненні (після спікання 1600 °С), МПа не менше	35	ГОСТ 4071.1-94
5. Межа міцності на згинання (після спікання 1500 °С x 3 год), МПа не менше	2	

3-етап – випробування ерозійної та корозійної стійкості підварювальної маси методом обертання роторної печі з рідкою шлакометалевою емульсією.

На підставі наявних даних по ринку вторинних магнезійних і вуглецевих матеріалів України, а також основних параметрів подібних ремонтних мас, імпортованих аналогів, було обрано ряд «аргументів» для досліджень. Такими «аргументами» виступали: вміст основного оксиду MgO (%), вміст вільного С (%), вміст комплексної добавки-зв'язуючого S (%). Основними сировинними компонентами було взято брукс периклазовий (0-8 мм), периклазовуглецевий (0-8 мм), периклазохромітовий (0-8 мм) і графітовий. Для кількісної оцінки залишкового конгломерату після корозійно-ерозійного впливу був введений параметр (Q), як співвідношення

маси залишку підварювальної до сирії наважки, що подається в піч, з поправкою на в. п. п. (втрати маси при прожарюванні) випробуваного складу.

Результати досліджень залежності співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%), вмісту вільного С (%) і вмісту комплексної добавки-зв'язуючого S (%) представлені в таблицях 3.11 – 3.17 і рисунках 3.27 – 3.33.

Таблиця 3.11.

Залежність співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 2%

		Вміст MgO, %							Середн. макс. знач (Q)
		70,00	72,00	74,00	76,00	78,00	80,00	82,00	
Вміст вільного С, %	4	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,143
	6	0,12	0,13	0,14	0,13	0,14	0,13	0,148	
	8	0,14	0,12	0,1	0,15	0,14	0,139	0,142	
	10	0,145	0,14	0,135	0,15	0,14	0,145	0,142	
	12	0,132	0,14	0,14	0,14	0,15	0,145	0,139	
	14	0,09	0,12	0,15	0,12	0,12	0,138	0,144	
	16	0,065	0,085	0,105	0,1	0,11	0,12	0,12	

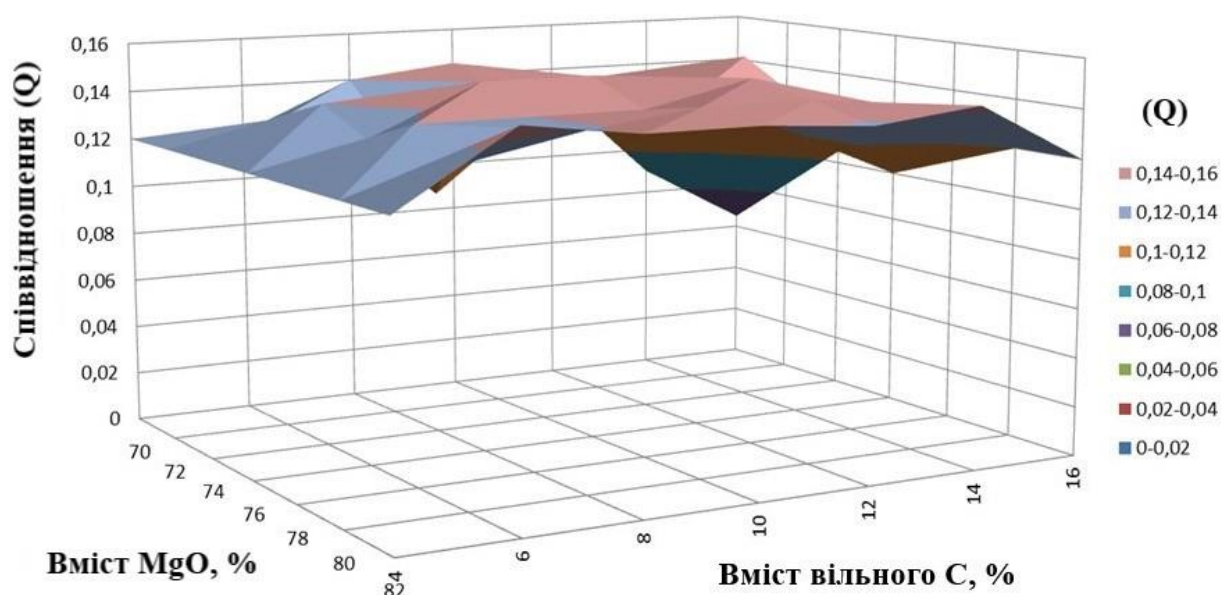


Рисунок 3.27. – Залежність співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 2%

Таблиця 3.12.

Залежність співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 4%

		Вміст MgO, %							Середн. макс. знач. (Q)
		70,00	72,00	74,00	76,00	78,00	80,00	82,00	
Вміст вільного С, %	4	0,2	0,2	0,25	0,25	0,25	0,27	0,26	0,341
	6	0,2	0,25	0,25	0,25	0,3	0,35	0,35	
	8	0,2	0,3	0,25	0,33	0,35	0,3	0,35	
	10	0,25	0,3	0,25	0,35	0,35	0,35	0,35	
	12	0,2	0,3	0,2	0,3	0,35	0,35	0,3	
	14	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	
	16	0,1	0,2	0,2	0,2	0,25	0,3	0,25	

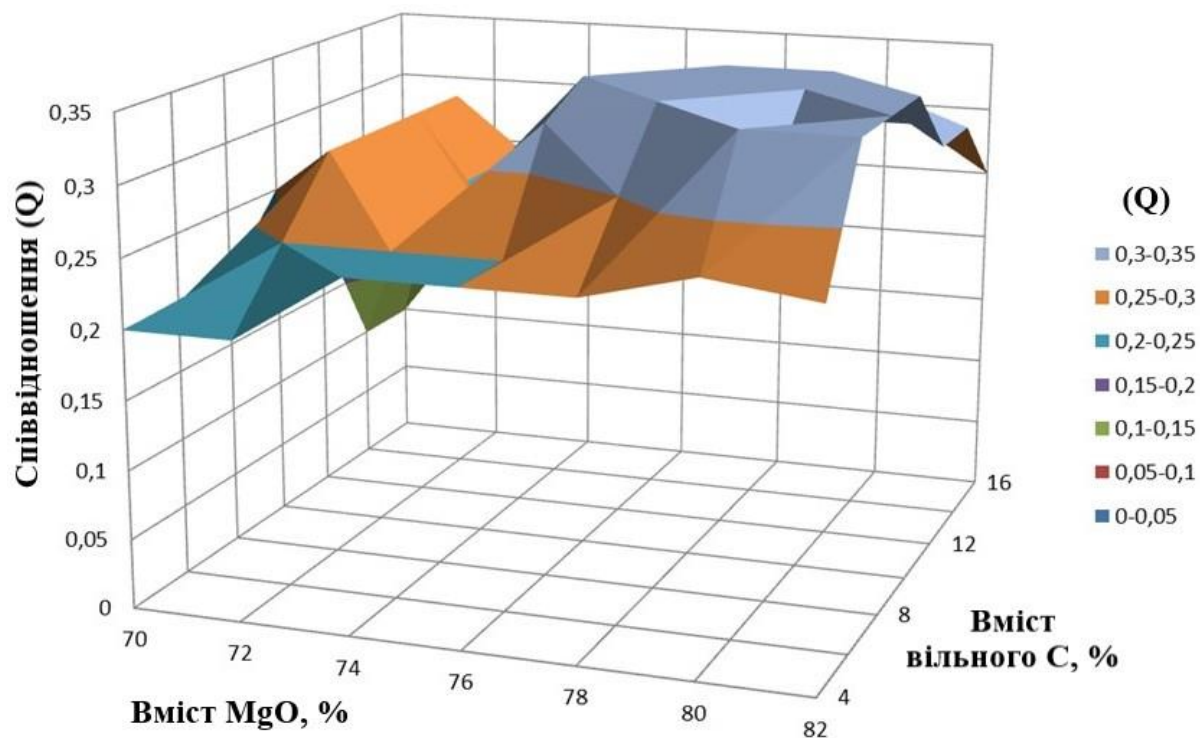


Рисунок 3.28. – Залежність співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) - 4%

Таблиця 3.13.

Залежність відношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) - 6%

		Вміст MgO, %							Середн. макс. знач. (Q)
		70,00	72,00	74,00	76,00	78,00	80,00	82,00	
Вміст вільного С, %	4	0,27	0,25	0,29	0,3	0,3	0,33	0,33	0,481
	6	0,25	0,29	0,29	0,34	0,4	0,42	0,4	
	8	0,33	0,3	0,37	0,4	0,4	0,47	0,45	
	10	0,35	0,35	0,44	0,47	0,45	0,5	0,45	
	12	0,35	0,4	0,4	0,47	0,47	0,52	0,5	
	14	0,4	0,4	0,4	0,4	0,47	0,39	0,5	
	16	0,3	0,3	0,3	0,4	0,36	0,36	0,41	

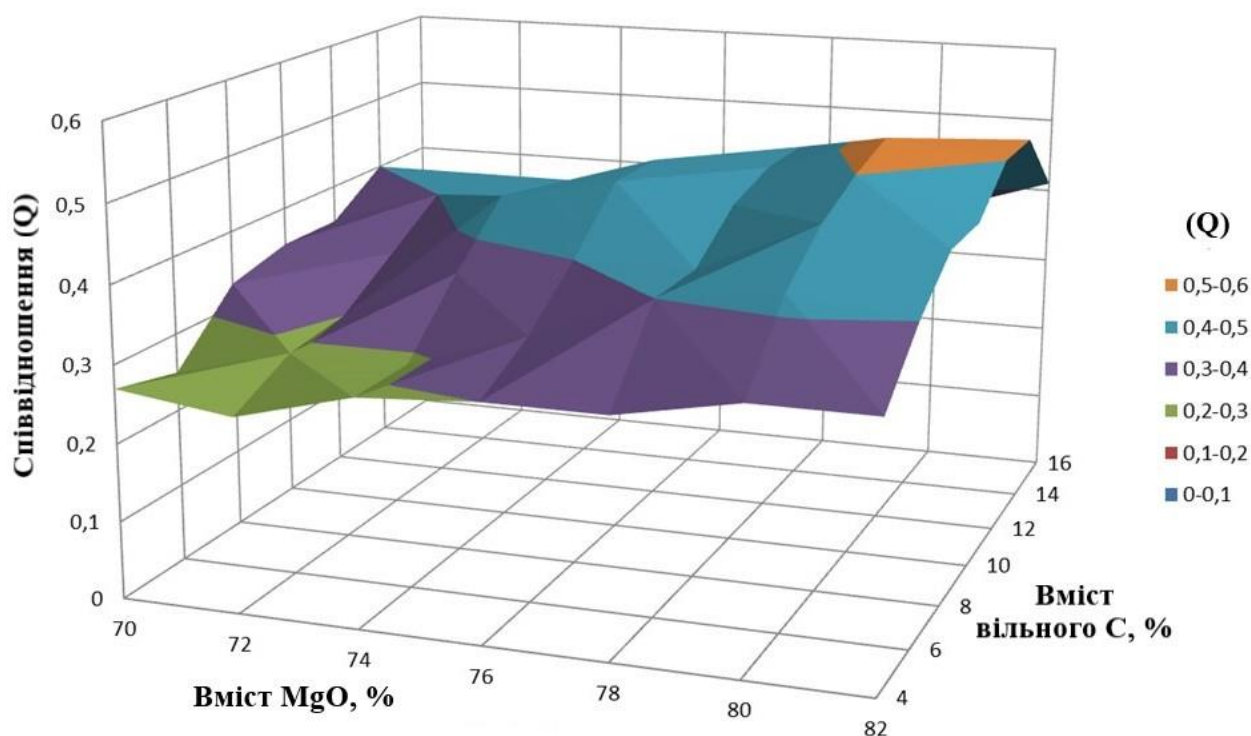


Рисунок 3.29. – Залежність співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 6%

Таблиця 3.14.

Залежність відношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 8%

		Вміст MgO, %							Середн. макс. знач (Q)
		70,00	72,00	74,00	76,00	78,00	80,00	82,00	
Вміст вільного С, %	4	0,38	0,38	0,42	0,45	0,51	0,54	0,54	0,683
	6	0,38	0,4	0,55	0,56	0,62	0,67	0,68	
	8	0,44	0,5	0,57	0,66	0,68	0,7	0,7	
	10	0,46	0,47	0,66	0,69	0,69	0,72	0,69	
	12	0,42	0,55	0,59	0,61	0,69	0,65	0,66	
	14	0,4	0,5	0,65	0,6	0,66	0,66	0,64	
	16	0,4	0,5	0,49	0,58	0,6	0,57	0,61	

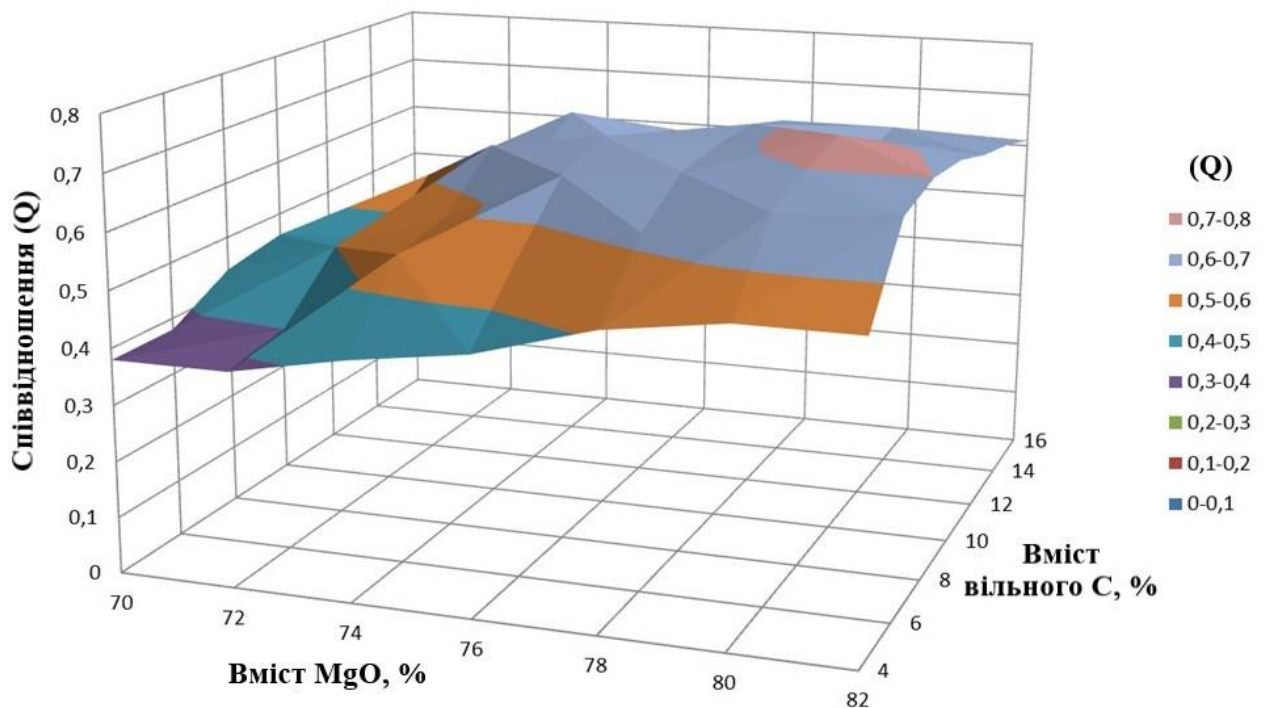


Рисунок 3.30. – Залежність співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) - 8%

Таблиця 3.15.

Залежність відношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 10%

		Вміст MgO, %							Середн. макс. знач (Q)
		70,00	72,00	74,00	76,00	78,00	80,00	82,00	
Вміст вільного С, %	4	0,46	0,49	0,49	0,55	0,59	0,61	0,61	0,908333
	6	0,51	0,62	0,66	0,66	0,73	0,69	0,72	
	8	0,57	0,68	0,74	0,8	0,82	0,85	0,85	
	10	0,66	0,74	0,77	0,83	0,86	0,9	0,93	
	12	0,71	0,75	0,81	0,84	0,9	0,93	0,93	
	14	0,71	0,74	0,69	0,77	0,87	0,9	0,9	
	16	0,59	0,65	0,68	0,77	0,81	0,85	0,85	

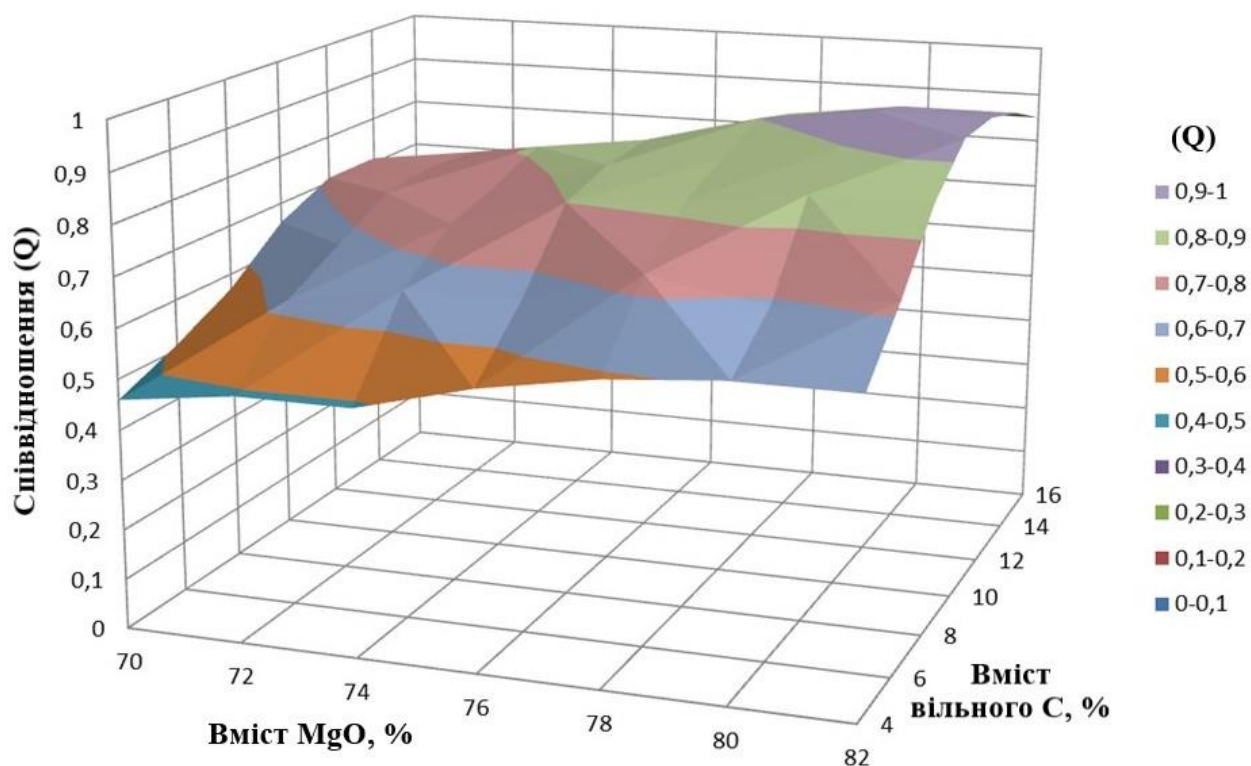


Рисунок 3.31. – Залежність співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 10 %

Таблиця 3.16.

Залежність відношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 12%

		Вміст MgO, %							Середн. макс. знач. (Q)
		70,00	72,00	74,00	76,00	78,00	80,00	82,00	
Вміст вільного С, %	4	0,46	0,46	0,55	0,59	0,64	0,66	0,7	0,894
	6	0,5	0,64	0,68	0,72	0,69	0,74	0,74	
	8	0,52	0,69	0,76	0,80	0,79	0,78	0,85	
	10	0,65	0,71	0,76	0,82	0,89	0,89	0,90	
	12	0,66	0,72	0,82	0,82	0,90	0,89	0,90	
	14	0,7	0,69	0,72	0,81	0,9	0,9	0,9	
	16	0,6	0,68	0,66	0,77	0,87	0,8	0,82	

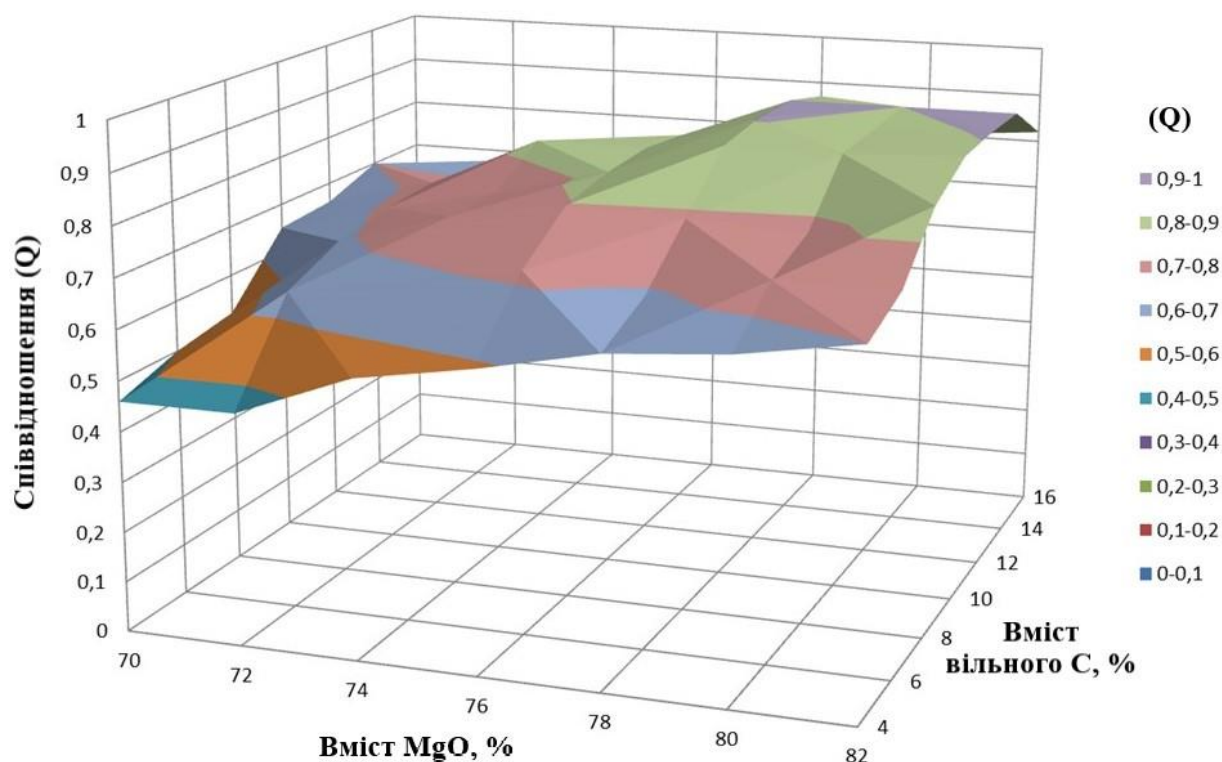


Рисунок 3.32. – Залежність співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 12 %

Таблиця 3.17.

Залежність відношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 14%

		Вміст MgO, %							Середн. макс. знач (Q)
		70,00	72,00	74,00	76,00	78,00	80,00	82,00	
Вміст вільного С, %	4	0,42	0,42	0,50	0,54	0,58	0,60	0,64	0,842
	6	0,46	0,59	0,62	0,66	0,63	0,68	0,68	
	8	0,48	0,64	0,70	0,74	0,73	0,72	0,78	
	10	0,60	0,65	0,70	0,75	0,82	0,82	0,83	
	12	0,63	0,69	0,79	0,79	0,87	0,86	0,87	
	14	0,63	0,62	0,65	0,73	0,81	0,81	0,81	
	16	0,49	0,55	0,53	0,62	0,70	0,65	0,66	

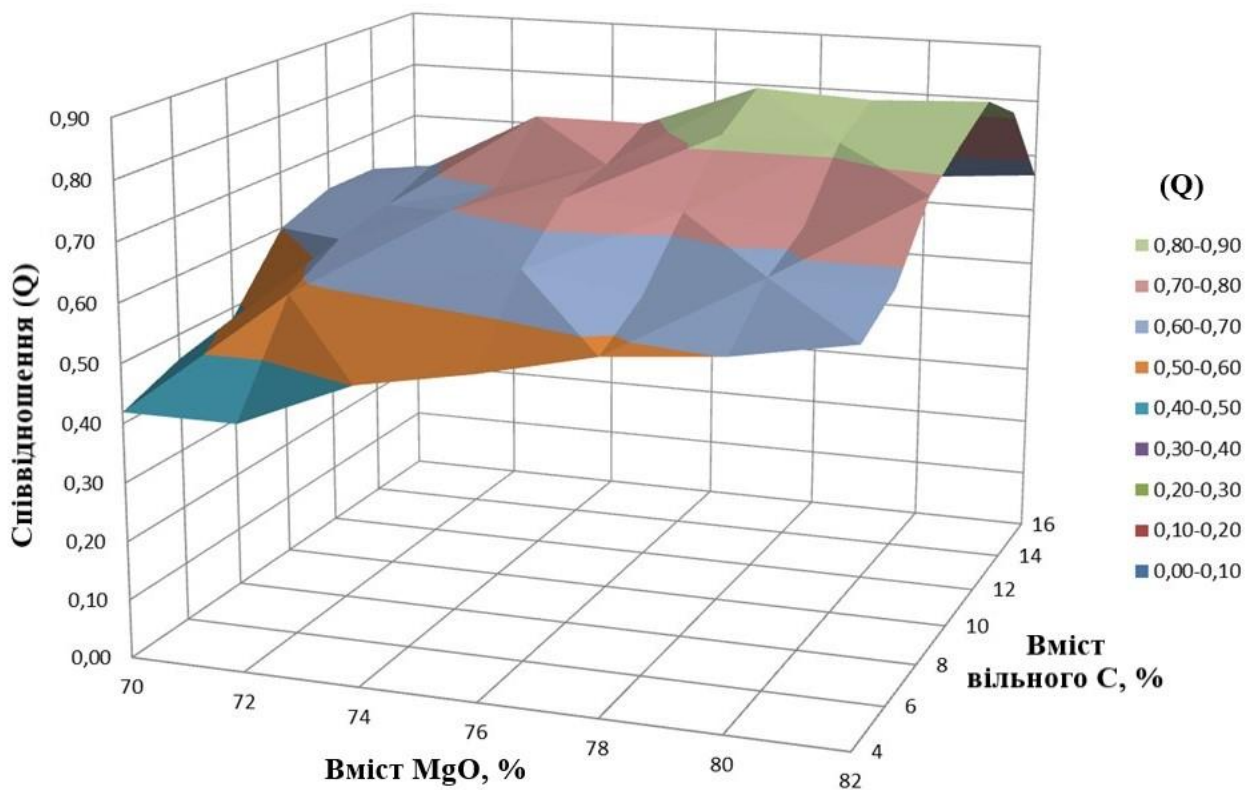


Рисунок 3.33. – Залежність співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%) і вмісту вільного С (%) при вмісті комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 14 %

З представлених експериментальних даних у таблицях 3.11 – 3.17 і на рисунках 3.27 – 3.33 видно, що залежності мають екстремальний характер, тобто на графіках присутні області «перегинів», що характерні для максимальних значень параметра (Q). Так, найбільш високий показник співвідношення (Q) представлено на рисунках 3.31. і 3.32., що відповідає наступному складу мас: вміст основного оксиду MgO (%) - 76-80%; вміст вільного С (%) - 10-12%; вміст комплексної добавки-зв'язуючого S (%) - 10-11%. У таблиці 3.18 і на рисунку 3.34 представлено підсумкові (середньо-максимальні) дані співвідношення показника (Q) у залежності від вмісту комплексної добавки-зв'язуючого S (%).

Таблиця 3.18.

Залежність результуючого (середньо-максимального) показника (Q) від вмісту комплексної добавки-зв'язуючого S (%)

Добавка-зв'язуюче, %	2	4	6	8	10	12	14
Середньо-максимальне значення (Q)	0,14	0,34	0,48	0,68	0,91	0,89	0,84

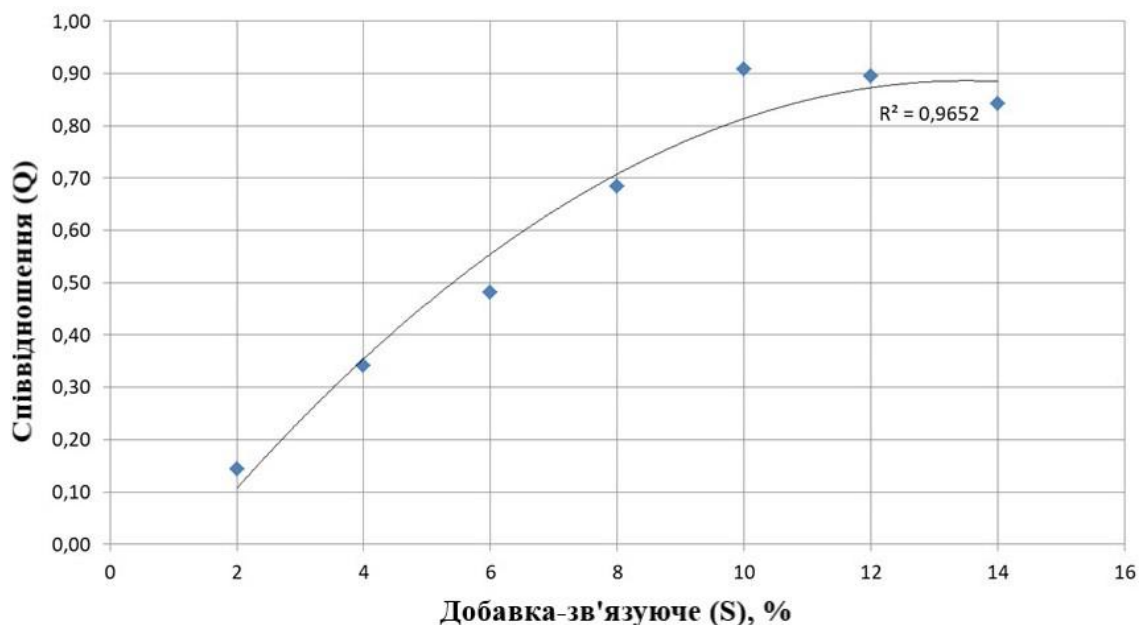


Рисунок 3.34. – Залежність результуючого (середньо-максимального) показника (Q) від вмісту комплексної добавки-зв'язуючого S (%).

Наступним етапом дослідження було визначення механічної міцності на стиск (σ) розроблених складів мас. Для проведення таких випробувань були відібрані зразки конгломерату що володіють найбільшою стійкістю (найбільшим показником Q). Після наважки, зразки конгломерату піддавали механічній обробці ($\approx 30 * 30 * 10$ мм) і здійснювали заміри міцності при стисненні на лабораторному пресі. Даний параметр вимірювався у МПа і становив 34-37 МПа, що відповідає найкращим імпортним аналогам.

На рисунку 3.35 представлено зразок спеченого конгломерату маси марки «GIR-RB-X» (розробка автора) після руйнування на пресі.



Рисунок 3.35. – Зразок конгломерату маси марки «GIR-RB-X»

У результаті отримані два основні параметри: Q – корозійно-ерозійна стійкість, σ – механічна міцність (міцність при стисненні), що у достатній мірі відповідали реаліям виробничого процесу.

На підставі отриманих експериментальних даних розроблена оригінальна саморозтічна, магнезіальна, підварювальна маса марки «GIR-RB-X» [131], що не поступається за експлуатаційними властивостями кращим зарубіжним аналогам. Основні фізико-хімічні показники розробленої маси представлені в таблиці 3.19.

Таблиця 3.19.

**Фізико-хімічні показники підварювальної маси
марки «GIR-RB-X»**

Найменування показника	Норма для марки	Методи контролю
	GIR-RB-X	
1. Масова частка загальної вологи W, % не більше	5	ГОСТ 22939.2
2. Гранулометричний склад, мм у межах	0-8	ДСТУ 3210
3. Масова частка оксиду магнію MgO, % не менше	75	ДСТУ 3305.8 (ГОСТ 2642.8)
4. Масова частка вуглецю С, % не менше	10-12	ГОСТ 23581.9
5. Межа міцності при стисненні (після спікання 1600 °С), МПа не менше	35	ГОСТ 4071.1-94

Розроблена саморозтічна, магнезіальна, підварювальна маса марки «GIR-RB-X» пройшла позитивні випробування дослідних партій в умовах конвертерних цехів підприємств України і була взята в промислове виробництво на активах компанії «GIR» з використанням недефіцитних вітчизняних вторинних матеріалів.

3.6. Висновки до розділу 3.

1. Співвідносячи отримані дані в ході моделювання з виробничою практикою зношення вогнетривкої футерівки більшості конвертерів, як з верхнім, так і з комбінованим продуванням, вдалось визначити теоретичні передумови випереджуючого зношування футерівки нижнього конуса конвертера, т. зв. «грибоподібну зношування» (рисунок 3.8). Таке зношування, в першу чергу, пояснюється тороїдоподібним напрямком руху потоків у рідкій ванні, і тим сильніше, чим менше «організований», з точки зору симетрії, такий рух.

2. Показана можливість рівномірного відновлення випереджаючого «грибовидного зносу» футерівки, викликаного особливостями гідродинаміки рідкої ванни, за допомогою оптимізації дуттєвих параметрів і фізичних властивостей роздуваного шлаку. Встановлено, що при постійній витраті

азоту і його тиску в магістралі ($Q_{г.} = 480 \text{ м}^3/\text{хв}$, а $P_{г.} = 16 \text{ аті}$) маса гарнісажного покриття екстремально залежить від висоти положення фурми.

3. Встановлено, що наявність у магнезіальному брикеті важкорозчинних компонентів, в кількості щонайменше 0,60-0,65% (мас.), 80% яких мають фракцію 2-6 мм, забезпечує необхідний обсяг «зернового» наповнювача і формування арматурного «скелета» в охолодженому гарнісажі. При цьому легкорозчинний, дрібнодисперсний, магнезійний компонент, узятий в кількості 0,4- 0,45% (мас.) насичує шлак оксидом магнію до рівня 7- 8%, вже в перші секунди роздування.

4. Показано, що з підвищенням кількості диспергованої твердої (нерозчиненої) фази в шлаці його в'язкість зростає, а при досягненні концентрації 7-9% «зернової» фази шлак має «задовільну» для виконання операції напризкування в'язкість. Тоді як, зі збільшенням кількості «зерен» до 10% і більше спостерігається різке підвищення в'язкості пов'язане з інтенсивною гетерогенізацією розплаву.

5. Для визначення експлуатаційних властивостей підварювальної маси введено параметр (Q), як відношення мас «відпрацьованої» підварки до сирової наважки, що подається в піч, з поправкою на в. п. п. (втрати маси при прожарюванні) досліджуваного складу.

6. В результаті досліджень залежності співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%), вміст вільного С (%) і вміст комплексної добавки-зв'язуючого S (%) встановлено, що залежності мають екстремальний характер, тобто на графіках присутні області «перегинів» характерні для максимальних значень параметра (Q).

7. Встановлено, що найбільш високий показник співвідношення (Q), а відповідно найбільша стійкість підварювальної маси відповідає наступному складу:

- вміст основного оксиду MgO (%) – 76-80%;
- вміст вільного С (%) – 10-12%
- вміст комплексної добавки-зв'язуючого S (%) – 10-11%.

РОЗДІЛ 4

ВИРОБНИЦТВО ВІТЧИЗНЯНИХ МАГНЕЗІАЛЬНИХ МОДИФІКАТОРІВ І РЕМОНТНИХ МАС ТА ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

Виробництво магнезійальних флюсуючих добавок і ремонтних мас на базі недефіцитних, вторинних і викопних ресурсів України та ближнього зарубіжжя є досить рентабельним. Організація такого виробництва в умовах діючих на території України підприємств вогнетривкої промисловості дозволяє, не тільки забезпечити гідну конкуренцію продукції, що імпортується, а також розвиває ресурсозберігаючі технології в металургії та цілих регіонах країни.

4.1. Дослідно-промислове випробування розроблених магнезійальних модифікаторів виробництва КНР і вдосконалення технології роздування шлаку азотом в умовах КЦ ПАТ «МК» Азовсталь»

На першому етапі досліджень виробництво дослідно-промислової партії обсягом 1500 т розроблених магнезійальних модифікаторів здійснювалось у КНР і Словаччині на активах компанії «Puyang Refractories Group Co., Ltd» відповідно до запатентованої технології [128].

Імпортна партія магнезійальних модифікаторів марок «PN-FL-65» і «PN-FL-60» постачалась виключно в упаковці типу біг-бег, ємністю 1 т з поліетиленовим вкладишем. Такий вид упаковки було обрано виходячи з умов тривалого транспортування, високих механічних навантажень і впливу погодних факторів.

Хімічний склад магнезійальних модифікаторів представлено в таблиці 4.1. Загальний вид і упаковка (біг-бег) матеріалів наведені на рисунку 4.1.

Таблиця 4.1

**Типові показники основних фізико-хімічних властивостей
модифікаторів марок «PN-FL-60» та «PN-FL-65»**

Найменування показника	Контрольні показники для марки			Методи контролю
	Виробництво Словаччина		Виробництво КНР	
	PN-FL-60	PN-FL-65	PN-FL-65	
1. Масова частка оксиду магнію MgO, %	59,4	64,7	65,2	ДСТУ 3305.8 (ГОСТ 2642.8)
2. Масова частка загальної вологи W, %	4,9	5,2	6,1	ГОСТ 22939.2
3. Масова частка шматків розміром менше 10 мм на партію, %	5	4	1,3	ДСТУ 3210
4. Механічна міцність на стиск, МПа	24,3	21	28	ГОСТ 21289-75
5. Втрати маси при прокалюванні (в. п. п.), %	6,3	8,6	3,0	ГОСТ 2642.2-86
6. Масова частка вуглецю С, %	2	3	1,7	ГОСТ 23581.9



Рисунок 4.1. – Магnezіальний модифікатор марки «PN-FL-65» в упаковці.

Випробування дослідно-промислової партії магнезійних модифікаторів марок «PN-FL-60» і «PN-FL-65» поставки ТОВ «Пуянг-Україна» і вдосконалення технології роздування шлаку азотом проводились в умовах ПАТ «МК «Азовсталь» (м. Маріуполь).

До складу сталеплавильного комплексу підприємства входить конвертерний цех, що обладнано двома кисневими конвертерами з верхнім дуттям місткістю 350 т кожен, сучасними установками позапічної обробки сталі: дві двопозиційні установки «ківш-піч» і двопозиційна установка вакуумування сталі. Також є відділення безперервного лиття заготовок з чотирма двострумковими, високопродуктивними слябовими МБЛЗ радіального типу.

Номінальна річна продуктивність цеху становить понад 5 млн т сталі. У період з 27.05.2012 р по 22.10.2012 р в конвертерному цеху ПАТ «МК» Азовсталь »на конвертері №2 експлуатувалась 18-я кампанія футерівки поставки фірми ТОВ «Пуянг-Україна».

Основним завданням дослідно-промислових досліджень розроблених матеріалів було вивчення можливості регламентованого використання того чи іншого магнезійного модифікатора в умовах нестабільної шихтовки конвертерної плавки. При відпрацюванні технології, в першу чергу, оцінювався вплив технічних (виробничих) аспектів технології: конструкція фурми, параметри дуття і т. ін.

Встановлено, що використання 6-ти соплового (центральне сопло – «завихрювач») наконечника, забезпечує об'єднання зовнішніх кордонів кратерів рідкого шлаку, що супроводжується утворенням більш розширеного виносу бризок на цапфові зони.

У всій серії промислових випробувань число сопел у наконечнику фурми, використовуваної для роздування кінцевого шлаку, визначало висоту мінімального розташування фурми над рівнем ванни, витрату і тиск азоту в магістралі. Такий зв'язок обумовлено аеродинамічними аспектами поширення струменів азоту, що забезпечують максимальний динамічний

«натиск». При цьому висота положення фурми коливалась у межах 1100 - 1200 мм над рівнем шлакової ванни, тиск азоту становив 13-14 кгс/см² з витратою в 1100-1200 м³/хв.

В ході експериментальної кампанії технічні складові технології роздування шлаку були «стабілізовані», але при цьому відповідали чинній внутрішньоцеховій технологічній інструкції. Тому про якісні показники гарнісажного покриття судили виключно виходячи з режиму присадок і витрати модифікаторів при інших рівних умовах.

Зокрема, специфіка роботи конвертерного цеху ПАТ «МК «Азовсталь» полягає у несвоєчасному експрес аналізі хімічного складу «повалочного» шлаку, що у значній мірі ускладнює управління процесом підготування шлаку до роздування азотом. Таким чином, у роботі виникла необхідність пошуку альтернативних, непрямих параметрів, що визначають властивості кінцевого конвертерного шлаку.

В ході лабораторних досліджень було показано, що основними фізико-хімічними властивостями кінцевого шлаку, які визначають якість формування гарнісажного шару, є його основність ($B = \text{CaO}/\text{SiO}_2$), вміст (MgO) і вміст (FeO). Позірна в'язкість (рідкорухомість) шлаку, в кінцевому рахунку, залежить від перерахованих параметрів.

Знаючи шихтування плавки, а також витрати шлакоутворюючих присадок по ходу її ведення, не складає великих труднощів досить точно розрахувати основність кінцевого шлаку і вміст у ньому (MgO), тоді як вміст (FeO) не є розрахунковим значенням. Даний параметр (FeO), по суті є визначальним у технології модифікування. Він залежить від великої кількості технологічних факторів і може бути виведений з масиву даних попередніх аналізів плавки.

У побудові регресійної моделі аналізу накопиченої бази даних в якості залежного критеріального параметра (Y) оцінки кінцевого шлаку при інших рівних умовах було вибрано вміст (FeO).

В якості незалежних змінних (предикторів) в умовах стабільного шихтування були обрані: температура чавуну $t_{ч.}$, °С; вміст кремнію в чавуні [Si]%; витрата кисню на продування V_{O_2} , м³/пл.; час продування $\tau_{пр.}$, хв; магістральний тиск кисню P_{O_2} , аті; середнє положення верхньої фурми $L_{ф.}$, м.

На підставі відібраних даних (дві кампанії конвертера загальної стійкістю в 7865 пл.) виконано оцінку окислення шлаку (FeO), а відповідно його рідкорухомість, яка базується на застосуванні регресійного аналізу. Параметри рівняння регресії визначались за допомогою методу найменших квадратів.

Для оцінки ступеня зв'язку між обраними величинами використовувався коефіцієнт множинної кореляції R Пірсона (кореляційне відношення).

Адекватність побудованого рівняння даними генеральної сукупності перевіряється статистичною значимістю коефіцієнта детермінації на основі F-критерію Фішера. Загальний вигляд масиву даних для регресійного аналізу (критерій-предиктор) представлено в таблиці 4.2.

Рівняння, що дозволяє в подальшому прогнозувати окисленість кінцевого шлаку (FeO) (y), має наступний вид:

$$Y = 348,612 - 20,937X_1 - 8,678X_2 + \\ + 1,668X_3 - 1,599X_4 - 1,902X_5 - 1,726X_6 \quad (4.1)$$

де: Y – вміст (FeO), %;

X_1 – температура чавуну $t_{ч.}$, °С;

X_2 – вміст кремнію в чавуні [Si], %;

X_3 – витрата кисню на продування V_{O_2} , тис. м³/пл;

X_4 – час продування $\tau_{пр.}$, хв;

X_5 – магістральний тиск кисню P_{O_2} , аті;

X_6 – середнє положення верхньої фурми $L_{ф.}$, м;

Таблиця 4.2.

**Основні технологічні незалежні фактори (предиктори) ведення
конвертерної плавки**

Критерій		Предиктори					
№, пл.	Вміст (FeO) у кінцевому шлаці	Температура чавуну $t_{ч.}$, $^{\circ}\text{C}$	Вміст кремнію в чавуні [Si], %	Витрата кисню на продування V_{O_2} , тис. $\text{м}^3/\text{пл.}$	Час продування $\tau_{\text{пр.}}$, хв	Магістральний тиск кисню P_{O_2} , аті	Середнє положення верхньої фурми $L_{\text{ф.}}$, м
1	14,70	13,29	1,01	21,755	18,50	21	2,40
2	14,93	13,20	0,97	22,263	18,10	21	2,40
3	15,05	13,20	0,98	22,077	18,10	21	2,40
4	13,64	13,24	1,00	21,673	18,10	20	2,40
5	13,78	13,30	0,95	21,906	18,20	20	2,40
...
23 40	15,62	12,94	0,90	21,755	19,30	21	2,30
23 41	15,00	13,01	0,91	22,263	19,20	21	2,30
23 42	17,96	12,91	0,86	22,077	18,90	21	2,30
23 43	17,21	12,90	0,91	21,673	19,30	20	2,30
23 44	19,65	12,90	0,85	21,906	19,00	21	2,30
23 45	18,64	12,97	0,85	21,888	19,00	20	2,30
...
50 56	21,90	13,00	0,78	22,355	21,10	19	2,30
50 57	22,45	12,87	0,78	22,290	21,10	19	2,30
50 58	22,10	12,89	0,73	22,547	21,30	19	2,30
50 59	24,60	12,82	0,75	22,273	21,20	18	2,30
50 60	22,32	12,93	0,75	22,306	21,10	19	2,30
50 61	20,40	13,03	0,77	22,339	21,20	19	2,35

Значення множинного коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,923$ показує, що 92,3% загальної варіації результативної ознаки пояснюється варіацією факторних ознак. Отже, обрані технологічні чинники розливання серії плавок істотно впливають на зміст (FeO) в кінцевому шлаку, що підтверджує правильність їх включення в побудовану модель. Розрахований рівень значущості $F = 3,22 * 10^{-5} < 0,05$ підтверджує значущість R^2 .

Аналізуючи отриманий вираз (4.1), слід зазначити, що максимальний вплив на окислення кінцевого шлаку, вміст у ньому (FeO) і його рідкорухомість надають вміст [Si] в чавуні і його температура ($t_{\text{ч}}$). Прогнозоване значення Y (вміст (FeO) у шлаці) мало високий рівень збіжності зі «запізнілими» результатами експрес аналізу експрес лабораторії КЦ ПАТ «МК «Азовсталь» у ході експериментальної кампанії конвертера. При цьому відхилення не перевищувало 7-9% (абс.).

Обрано два пріоритетних параметра поряд з відносно постійною витратою шлакоутворюючих, що подаються в процесі ведення плавки (витрата вапна, вапняку, вугілля і магнезіальних шлакоутворюючих), у кінцевому рахунку, визначали фізико-хімічні властивості кінцевого шлаку, а також його кількість. Зокрема, вибір визначальних критеріїв дозволив сформулювати концептуально новий підхід до управління процесом модифікування (підготування) кінцевого шлаку під роздування азотом і підготувати фундамент до розробки «міні-регламенту» режиму і витрати модифікатора, в залежності від технологічних параметрів і постійно контрольованої «якості» гарнісажного шару.

Виробнича ситуація в конвертерному цеху ПАТ «МК «Азовсталь» в період проведення досліджень характеризувалась дефіцитом чавуну, що в свою чергу, визначало шихтування плавки. Крім того, чавун надходив у цех фізично і хімічно «холодним»: температурою 1250-1280 °С, вмістом [Si] 0,5-0,8%. При таких параметрах з його середньою витратою 750-760 кг/т сталі складались досить специфічні умови шлакоутворення конвертерної плавки.

Кампанію конвертера умовно розділили на дві частини: т. з. «холодне шихтування» і «нормальне шихтування».

У період з 1 по 2428 пл. по стійкості середнє шихтування – лом/чавун становила 26%/74% (витрата чавуну – 750 кг/т сталі). Середній хімічний аналіз кінцевого шлаку за даний період представлено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3.

Середній хімічний аналіз кінцевого шлаку перед роздуванням

Вміст компонентів шлаку, %							
CaO	MgO	Fe _{заг.}	FeO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Основність (В)
31,6	6,7	29,9	24,5	14,3	0,9	1,8	2,65

У цей період розроблялись технологічні «міні-регламенти» по модифікації шлаку матеріалами марок «PN-FL-65» (на основі китайського магнезиту) для умов «холодного шихтування», «міні-регламент» по витраті та режиму присадки флюсу марки «PN- FL-65» представлено у вигляді таблиць 4.4 і 4.5 з поясненнями.

Таблиця 4.4.

Кількість присадки (на роздування) флюсу (PN-FL-65) в залежності від параметрів чавуну *, т

		Т чавуну, °С										
		1300	1295	1290	1285	1280	1275	1270	1265	1260	1255	1250
Вміст Si у чавуні, %	0,8	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9
	0,78	1,4	1,4	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0
	0,76	1,4	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0
	0,74	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1
	0,72	1,5	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1
	0,7	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2
	0,68	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2
	0,66	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3
	0,64	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3
	0,62	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4
	0,6	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5
	0,58	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5
0,56	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	

Таблиця 4.5

Кількість присадки (на роздування) флюсу (PN-FL-65) в залежності від параметрів чавуну *, т («коротке» шихтування, «проміжне скачування» і «повалочне» скачування шлаку)

		Т чавуну, °С										
		1300	1295	1290	1285	1280	1275	1270	1265	1260	1255	1250
Вміст Si у чавуні, %	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3
	0,78	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4
	0,76	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4
	0,74	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5
	0,72	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5
	0,7	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5
	0,68	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5
	0,66	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6
	0,64	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6
	0,62	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7
	0,6	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8
	0,58	1,4	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8
0,56	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	

* - присадка матеріалів на роздування здійснюється 2-ма порціями: 1 порція, до початку продування азотом, 70% флюсу і 70% вугілля (рекомендується 2-3 похитування конвертера); 2 порція - залишок вугілля та флюсу на 1-ій хв. роздування («під струмінь»).

У разі «короткого» шихтування (чавун/лом – 80% / 20%), а також «проміжного скачування» і «повалочного» скачування шлаку кількість присаджуваного флюсу (PN-FL-65) слід зменшувати на 30% (таблиця 6.4), тобто. пропорційно зниженню кількості кінцевого шлаку. З метою зниження вмісту (FeO) у кінцевому шлаці для підвищення його в'язкості і ефективності операції «роздування» азотом присаджують вугілля марки «АКО» у такій кількості:

- «стандартне» шихтування плавки – 450 кг/операція;
- «коротке» шихтування плавки – 400 кг/операція;
- плавки з «проміжним скачуванням» і «повалочним» скачуванням шлаку – 350 кг/операція.

З використанням модифікатора марки «PN-FL-65» відстежено 80 плавок із середньою витратою матеріалу – 1,2 т/пл. При цьому стійкість

гарнісажного покриття за відстежений період становила не більше 1 плавки. У ряді випадків гарнісаж частково «змивався» до кінця наступної плавки, а іноді в першій її половині. Така стійкість захисного шару вказує на незадовільну якість модифікатора «PN-FL-65» китайського виробництва. Це пояснюється високою міцністю брикета (до 28 МПа) за рахунок зв'язуючої речовини, яка забезпечує тривале транспортування. У свою чергу висока міцність матеріалу збільшує час асиміляції, а відповідно неповне розчинення порції флюсу за «відведений» на роздування час (середнє $\tau_{\text{розд.}} = 3,15$ хв). Це підтверджується хімічним і мінералогічним аналізом відібраних у ході випробувань проб гарнісажного шару, що мали нерівномірність властивостей по всьому обсягу.

В аналогічний період з 1 по 2428 пл. по стійкості розроблялись технологічні «міні-регламенти» по модифікації шлаку матеріалами марок «PN-FL-60» (на основі словацького магнезиту). «Міні-регламент» по витраті та режиму присаджування флюсу марки «PN-FL-60» (виробництво – Словаччина) представлено в таблицях 4.6 і 4.7, з поясненнями.

Таблиця 4.6

Кількість присадки (на роздування) флюсу (PN-FL-60) у залежності від параметрів чавуну *, т.

		Т чавуну, °С										
		1300	1295	1290	1285	1280	1275	1270	1265	1260	1255	1250
Вміст Si у чавуні, %	0,8	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8
	0,78	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9
	0,76	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9
	0,74	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0
	0,72	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0
	0,7	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1
	0,68	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1
	0,66	1,7	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2
	0,64	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2
	0,62	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3
	0,6	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4
	0,58	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4
	0,56	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3	2,4	2,4

У разі «короткого» шихтування, а також «проміжного» і «повалочного» скачування шлаку – кількість присаджуваного флюсу «PN-FL-60» зменшувалась на 30% (таблиця 4.7), пропорційно зниженню кількості кінцевого шлаку.

З метою зниження вмісту (FeO) у кінцевому шлаці для підвищення його в'язкості і ефективності операції «роздування» азотом присаджували вугілля марки «АКО» у такій кількості:

- «стандартне» шихтування плавки – 350 кг/операція;
- «коротке» шихтування плавки – 250 кг/операція;
- плавки з «пром. скачуванням» і «повалочним» скачуванням шлаку – 100 - 150 кг/операція.

Таблиця 4.7

Кількість присадки (на роздування) флюсу (PN-FL-60) у залежності від параметрів чавуну * («коротке» шихтування, «пром. скачування» і «повалочне» скачування шлаку), т.

		Т чавуну, °С										
		1300	1295	1290	1285	1280	1275	1270	1265	1260	1255	1250
Вміст Si у чавуні, %	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
	0,78	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3
	0,76	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3
	0,74	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4
	0,72	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4
	0,7	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4
	0,68	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4
	0,66	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5
	0,64	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5
	0,62	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6
	0,6	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7
	0,58	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7
	0,56	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7

* - присаджування матеріалів на роздування здійснюється 2-ма порціями: 1 порція, до початку продування азотом, 70% флюсу і 100% вугілля (рекомендується 2-3 похитування конвертера); 2 порція - залишок вугілля та флюсу на 1-ій хв. роздування («під струмінь»).

При модифікуванні шлаку флюсом марки «PN-FL-60» (на основі словацького магнезиту), в аналогічний період «холодного шихтування» відстежено 732 пл., середньою витратою 1,2 т/пл. Стійкість гарнісажного покриття за відстежуваний період становила 1-2 плавки. У ряді випадків спостерігалась позитивна тенденція до «наростання» гарнісажного шару. Така стійкість свідчать про більш високу якість і ефективність використання флюса марки «PN-FL-60» (на основі словацького магнезиту). При цьому відбір контрольних проб шлаку (фрагментів гарнісажного шару) після модифікування показав рівномірну структуру зразка, що свідчило про повну асиміляцію порції модифікатора за відведений на роздування час (середнє $\tau_{\text{розд.}} = 3,25$ хв).

У період з 18.09.2012 р. по 22.10.2014 р. (2429 – 2936 пл. за стійкістю) середнє шихтування – лом/чавун становило 20% / 80% (витрата чавуну – 800 кг/т сталі) – «нормальне шихтування». Середній хімічний аналіз кінцевого шлаку в даний період представлено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8.

Середній хімічний аналіз кінцевого шлаку перед роздуванням

Вміст компонентів шлаку, %							
CaO	MgO	Fe _{заг.}	FeO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Основність (В)
36,7	7,9	26,8	22,1	14,9	1,1	1,9	2,85

У даних умовах розроблялись технологічні «міні-регламенти» по модифікації шлаку матеріалом марки «PN-FL-65» (на основі словацького магнезиту) для «нормального шихтування». «Міні-регламент» по витраті та режиму добавки флюсу марки «PN-FL-65» представлено в таблицях 4.9 і 4.10, з поясненнями.

Таблиця 4.9

**Кількість присадки (на роздування) флюсу (PN-FL-65) у
залежності від параметрів чавуну *, т.**

		Т чавуну, °С										
		1300	1295	1290	1285	1280	1275	1270	1265	1260	1255	1250
Вміст Si у чавуні, %	0,8	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4
	0,78	1,0	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4
	0,76	1,0	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4
	0,74	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5
	0,72	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5
	0,7	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6
	0,68	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6
	0,66	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7
	0,64	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7
	0,62	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8
	0,6	1,4	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8
	0,58	1,4	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8
0,56	1,4	1,5	1,5	1,6	1,6	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	

Таблиця 4.10

**Кількість присадки (на роздування) флюсу (PN-FL-65) у залежності від
параметрів чавуну *, т. («коротке шихтування», «проміжне скачування»
і «повалочне» скачування шлаку).**

		Т чавуну, °С										
		1300	1295	1290	1285	1280	1275	1270	1265	1260	1255	1250
Вміст Si у чавуні, %	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
	0,78	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
	0,76	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0
	0,74	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
	0,72	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1
	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1
	0,68	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
	0,66	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2
	0,64	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2
	0,62	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2
	0,6	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3
	0,58	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3
0,56	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	

* - присаджування матеріалів на роздування здійснюється 2-ма порціями: 1 порція, до початку продування азотом, 70% флюсу і 100% вугілля (рекомендується 2-3 похитування конвертера); 2 порція - залишок вугілля і флюсу на 1-ій хв. роздування («під струмінь»).

У разі «проміжного» і «повалочного» скачування шлаку – кількість присаджуваного флюсу (PN-FL-65) слід зменшити на 30% (таблиця 4.10), пропорційно зниженню кількості кінцевого шлаку.

З метою зниження вмісту (FeO) у кінцевому шлаці для підвищення його в'язкості і ефективності операції «роздування» азотом додавали вугілля в такій кількості:

- «стандартне» шихтування плавки – 350 кг/операція;
- «коротке» шихтування плавки – 250 кг/операція;
- плавки з «проміжним» і «повалочним» скачуванням шлаку – 100 - 150 кг/операція.

Зі зміною шихтування в бік збільшення частки чавуну в завалці («нормальне шихтування») і оптимізацією витрат флюсу марки «PN-FL-65» вдалось досягти стійкості гарнісажного покриття 2-3 пл. з позитивною динамікою його наростання від плавки до плавки (зони цапф, завалювання, зливання та верхнього конуса). Відстежено 507 пл. із середньою витратою флюсу 1,0 т / пл.

Відбір контрольних проб шлаку (фрагментів гарнісажного шару) після модифікування показав рівномірну структуру зразка, що свідчило про повну асиміляцію порції модифікатора за відведений на роздування час (середнє $\tau_{\text{розд.}} = 3,42$ хв). Максимальна стійкість гарнісажного шару – 3 пл. була досягнута з використанням в якості модифікатора «PN-FL-65» словацького виробництва витратою 1,1 т/операція.

В цілому представлені в таблицях 4.4 - 4.7 і таблицях 4.9 - 4.10 «міні-регламенти», вперше розроблені для умов КЦ ПАТ «МК «Азовсталь», дозволили не тільки оптимізувати витрати модифікаторів шлаку, а також підвищити стійкість гарнісажного покриття і уніфікували технологію роздування. В результаті промислових випробувань флюсів марок PN-FL-65 / PN-FL-60 – словацького та китайського виробництва, оптимізації витрат їх

присадок і реалізації розроблених «міні-регламентів» в умовах КЦ ПАТ «МК «Азовсталь» була зменшена загальна витрата магнієвмісних матеріалів. Зокрема, до кінця кампанії 2000 - 2936 пл. сумарна витрата флюсів, у т. ч. марки «ОДФ» і «Dalslag P-71», які використовувались на постійній основі, скоротилась на 20%.

Дані щодо питомих витрат матеріалів протягом кампанії представлено в таблиці 4.11 і на рисунку 4.2.

Таблиця 4.11

Добірка по стійкості середніх витрат низки магнієвмісних присадок і сумарні значення.

	Доломіт «ОДФ»		Dalslag P-71		«PN-FL-65»		«PN-FL-60»		Сумарне значення, кг/т
	кг/т	т/пл.	кг/т	т/пл.	кг/т	т/пл.	кг/т	т/пл.	
1-500	4,92	1,63	10,97	3,63	-	-	-	-	15,89
501-1000	6,50	2,15	9,31	3,08	-	-	0,51	0,17	16,32
1001-1500	3,26	1,08	8,85	2,93	-	-	1,93	0,64	14,04
1501-2000	2,93	0,97*	12,08	4,00	0,69	0,23	-	-	15,70
2001-2500	3,84	1,27*	8,43	2,79	1,81	0,60	-	-	14,08
2501-2936	-	-	5,53	1,83	6,74	2,23**	-	-	12,27
У середньому	3,66	1,21	9,27	3,07	1,42	0,47	0,39	0,13	-
* - 225 пл. (1913-2138 пл. за стійкістю) на «ОДФ» без «P-71» (збій у постачанні).									
** - недостовірна інформація (збій в електронній системі обліку)									

Конвертер №2 (18-я кампанія) було виведено з експлуатації при стійкості футерівки 2936 пл. Передчасна зупинка була організована за рішенням керівництва комбінату в зв'язку з виробничим графіком капітальних ремонтів цехового обладнання (заміна ОКГ КК№1).

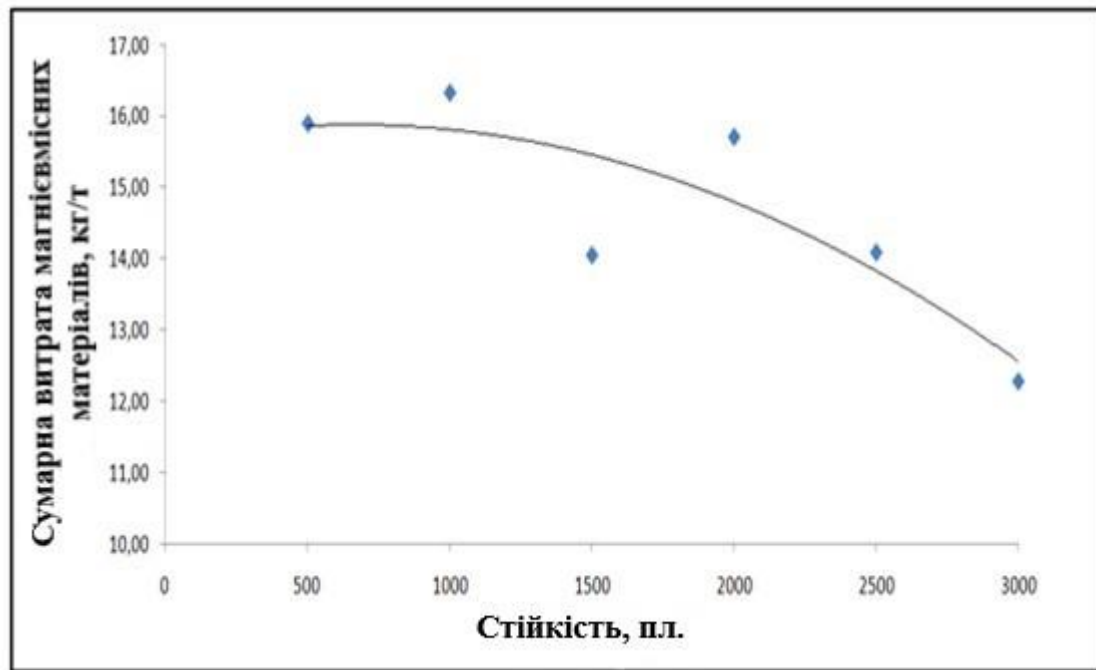


Рисунок 4.2. – Динаміка зниження витрати магнієвмісних матеріалів протягом кампанії, за рахунок оптимізації режиму їх присадок.

Після зупинки конвертера проводився аналіз топографії залишкових товщин вогнетривкої кладки. В ході демонтажу відзначено скол робочого шару в секторі «східна цапфа» - «завалка», викликаний впливом негабаритного великовагового брукху і випереджуючого зносу «зони зливу». На рисунку 4.3 представлена графічна топографія зносу робочого шару вогнетривкої кладки конвертера перед виведенням кампанії з експлуатації, стійкість 2914 пл. Залишкові товщини по горловині (на рівні арматурного шару) обумовлені її періодичним заростанням і необхідністю постійної чистки киснем і скрапозавалювальним совком.

Тим часом зона горловини не є проблемною з точки зору можливості ремонту ділянкою футерівки. Вона відновлюється «природним» способом (контрольоване заростання) і методом напівсухого торкретування. У таблиці 4.12. представлено «оцифровані» середні залишкові товщини робочого шару футерівки конвертера №2.

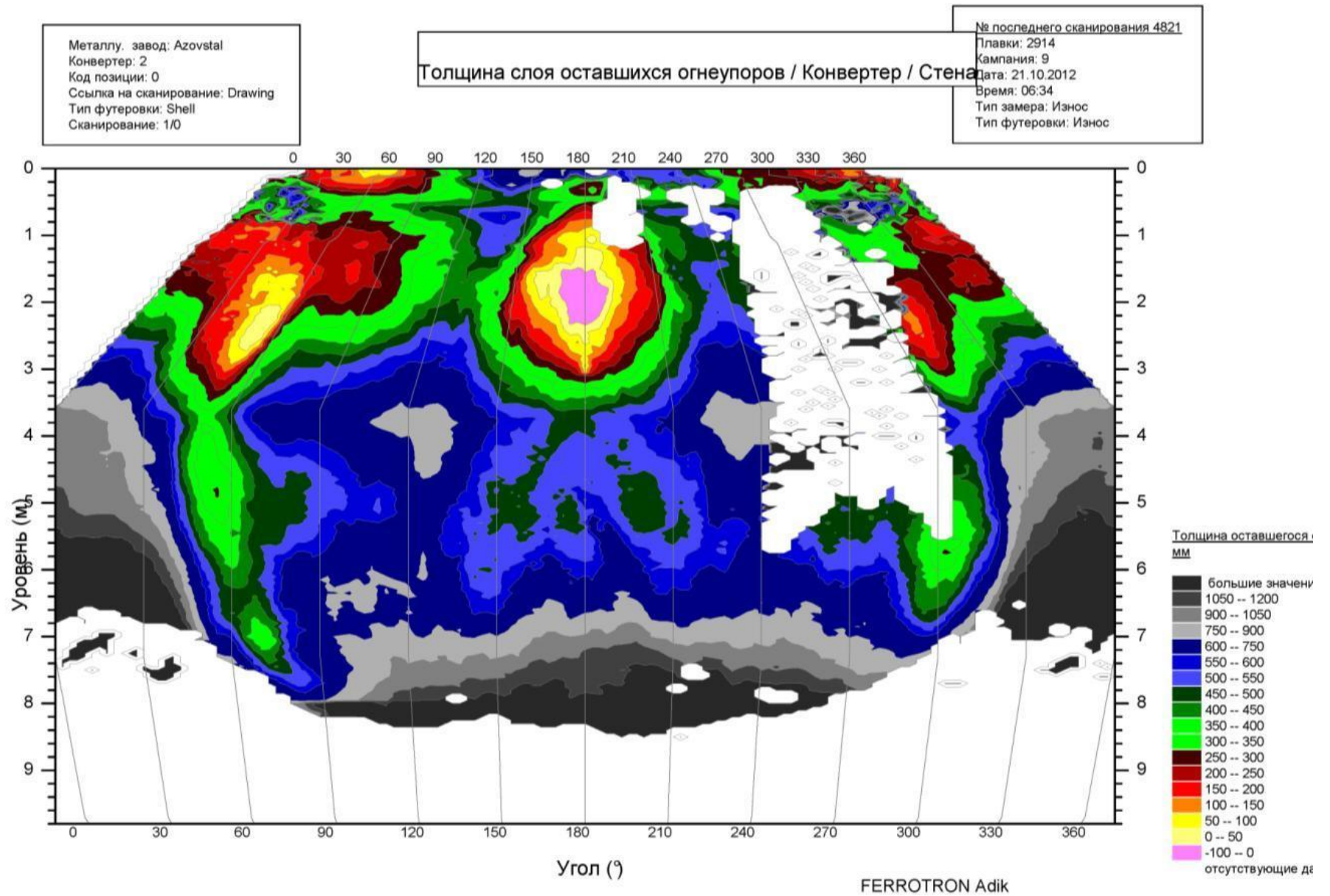


Рисунок 4.3. – Сканограмма стану футерівки конвертера після 2914 плавки (робочий шар).

Таблиця 4.12

Залишкові товщини робочого шару футерівки.

Зона	Залишкова товщина робочого шару, мм			
	Завалка	Злив	Західна цапфа	Східна цапфа
Горловина	арматура	арматура	арматура	50-100
Верхній конус	100	50-100	150-200	100-150
Рівень цапф	400-450	250-300	450	300-350
Нижній конус	400-450	400	100-150	300-350

Характер нерівномірності зносу верхнього конуса і циліндричної частини футерівки обумовлений так само випередженням «зони зливу» і «завалювання». У цих місцях - залишкові товщини кладки мінімальні (50-100 мм). Обидві зони ефективно піддаються своєчасному ремонту за допомогою подварювання і торкретування.

При цьому в найбільш проблемній зоні стику нижнього конуса і циліндричної частини, схильної до випереджаючого «грибоподібного» зносу за рахунок тороїдоподібного руху потоків залишкові товщини досягають 400-450 мм. Так, на рисунках 4.4 і 4.5. представлено фрагменти таких зон при демонтажі футерівки.

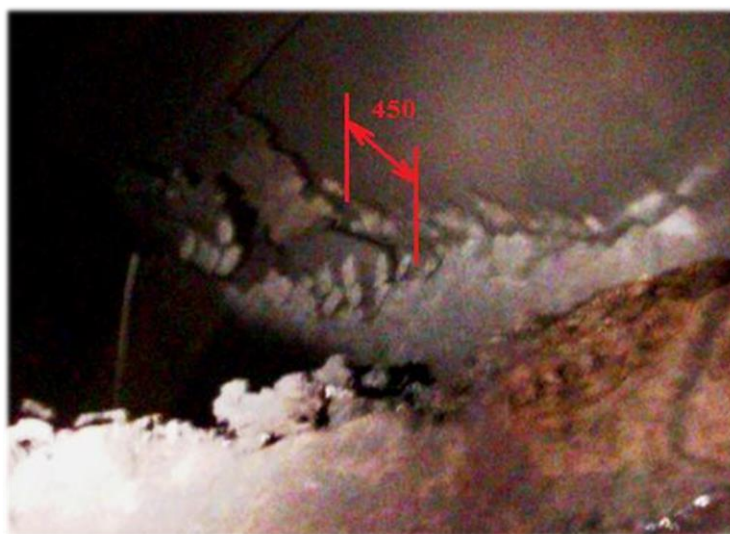


Рисунок 4.4. – Залишкові товщини футерівки конвертера №2 (при демонтажі) - стик права цапфа - нижній конус (250-450 мм).



Рисунок 4.5. – Залишкові товщини футерівки конвертера №2 (при демонтажі) - стик «завалка» - нижній конус (350-450 мм).

В процесі демонтажу футерівки були відібрані зразки цегли, що відповідають певним зонам кладки (рисунок 4.6). Як видно з рисунка 4.6, незважаючи на вироблену операцію «миття» киснем (необхідна процедура перед виведенням конвертера), мають місце помітні залишкові товщини гарнісажного покриття по більшості поверхні вогнетривів товщиною до 12 мм.



Рисунок 4.6. – Залишковий гарнісажний шар на поверхні вогнетривів після «миття» киснем перед виведенням конвертера, де а) – нижній конус (цапфи) 10-12 мм, б) – завалка 5-10 мм, в) – верхній конус 5-10 мм

Цей факт вказує на високу термо- і ерозійну стійкість гарнісажного шару, досягнуту за рахунок оптимізації витрат і режиму присадки протягом кампанії магнезійних модифікаторів відповідно до розроблених «міні-регламентів».

Отримані дані в ході оцифрування сканограмм залишкових товщин і вимірів демонтованих фрагментів футерівки конвертера дозволили оцінити швидкість зносу вогнетривів по зонам і розрахувати їх можливий «потенціал» по стійкості. Так, у таблиці 4.13 приведена середня швидкість зносу основного вогнетривкої футерівки 18-й кампанії по зонам кладки.

Таблиця 4.13.

Швидкість зносу вогнетривів по зонам кладки, мм/пл.

Зона	Швидкість зносу вогнетривів, мм/пл.			
	Завалка	Злив	Західна цапфа	Східна цапфа
Горловина	0,17	0,17	0,17	0,16
Верхній конус	0,20	0,22	0,17	0,19
Рівень цапф	0,18	0,23	0,17	0,21
Нижній конус	0,19	0,20	0,28	0,22

В цілому основна футерівка виявилось зношеним на 65-70%, що відповідає $\approx 0,18-0,2$ мм/пл. У разі подальшого обслуговування відповідно до розроблених регламентів і магнезійних модифікатор стійкість футерівки конвертера могла скласти – 4000-4100 пл., що відповідає зниженню питомих витрат на 0,9 \$/т.

На рисунку 4.7 наведено графік питомих витрат у залежності від стійкості футерівки конвертера.

З представленої залежності випливає, що «потенціал» кампанії конвертера становив не менше 1000 пл. зі стабільним зниженням питомих витратах до рівня 6,0 \$/т сталі, як «екстремального» значення для відповідних умов.

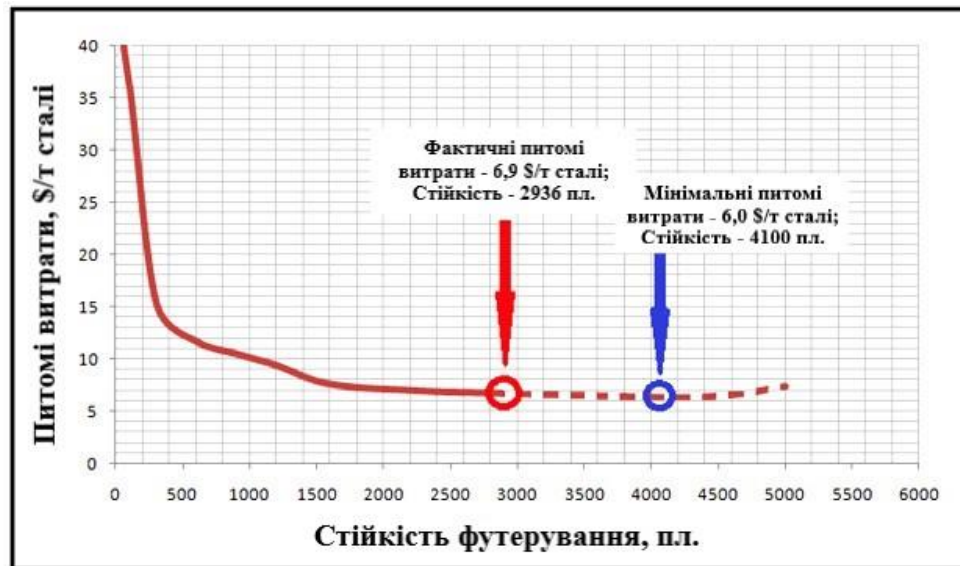


Рисунок 4.7. – Сумарні питомі витрати (футерівка + догляд).

У результаті промислових випробувань модифікаторів, оптимізації витрат їх присадок в ході реалізації розроблених «міні-регламентів» в умовах КЦ ПАТ «МК «Азовсталь» загальна, сумарна витрата магнієвмісних матеріалів на плавку (до кінця кампанії 2000 - 2936 пл.) була знижена на 20 % у порівнянні з її початком, що відповідає зниженню питомих витрат на виробництво сталі на 7,02 грн/т (0,87 USD/т в цінах 2012 року).

Найбільша ефективність процесу роздування шлаку, при інших рівних умовах, була досягнута при використанні флюсу марки «PN-FL-65» на основі словацьких магнезитів. Це, в першу чергу, пов'язано з більш якісним підбором сировинних компонентів, їх гранулометричного складу відповідно запатентованому способу. Так, при однаковому вмісті оксиду MgO якість модифікатора словацького виробництва перевершувало аналог КНР за швидкістю асиміляції, забезпеченої введенням у шихтування легкокорозійного «сирого» компонента – доломіту і легкоплавкого зв'язуючого.

При мінімальній середній витраті «PN-FL-65» на основі словацького магнезиту в 1 т/пл. проти аналогічного «PN-FL-65» виробництва КНР із середньою витратою 1,2 т/пл. досягнута максимальна стійкість гарнісажного покриття – 3 пл.

4.2. Основні стадії технології виробництва магнезійних флюсів на базі української сировини і виробничих потужностях

Для виробництва на активах ТОВ «ГІР-ІНТЕРНЕСНЛ» і подальшого дослідно-промислового використання на металургійних підприємствах України та ближнього зарубіжжя були взяті три марки флюсів «БК-4», «БДМ» і «Р70», розроблені в лабораторних умовах.

Спільно з компаніями ТОВ «ГІР-ІНТЕРНЕСНЛ», ПрАТ «Брикет» і ДВНЗ «ДонНТУ» були розроблені та затверджені зміни №10 ТУ У 37.1-001 76526-001: 2006 (додаток №1) уніфікуючі маркування і стандартизуючі основні фізико-хімічні параметри флюсів марок «БК-4», «БДМ» і «Р70», під альтернативним маркуванням: «БК-4», «БК-8» і «БК-9», відповідно (таблиця 4.14).

Таблиця 4.14

Основні фізико-хімічні властивості модифікаторів кінцевого шлаку

Найменування показника	Норма для марки			Методи контролю
	БК-4	БК-8	БК-9	
1. Масова частка загальної вологи W, % не менше	5	5	5	ГОСТ 22939.2
2. Механічна міцність на скидання, % не менше	90	90	90	ДСТУ 3199 ГОСТ 21289
3. Масова частка шматків розміром менше 10 мм на партію, % не більше	10	10	10	ДСТУ 3210
4. Масова частка оксиду магнію MgO, % не менше	60	-	65	ДСТУ 3305.8 (ГОСТ 2642.8)
5. Масова частка суми оксидів (MgO + CaO), % не менше	-	72	-	ГОСТ 23581.16 ДСТУ 3305.8
6. Масова частка вуглецю C, % не менше	-	8	-	ГОСТ 23581.9

При опрацюванні ринку вітчизняної магнезійної сировини основна увага приділялася виробничим і техногенним відходам наявним на території Східної України в надлишку. Так, в якості основних джерел сировини для виробництва магнезійних брикетів були обрані:

1. Лом вогнетривкий магнезійний, періклазовий, періклазовуглецевий кусковий, що утворюється при демонтажі футерівок плавильних і розливних агрегатів сталеплавильних цехів.

Це основний магнезійний компонент у шихтуванні модифікатора з вмістом $MgO \geq 65\%$. Даний компонент є джерелом «корисної» важко розчинної, «зернової» фракції 2-6 мм, яка формує вогнетривкий скелет в обсязі гарнісажного шару. Крім «корисної» тугоплавкої фракції мелений білий періклазовуглецевої цегли так само є джерелом високоякісного, крупнолускатого графіту внесеного до складу брикету.

Орієнтовний обсяг щорічного накопичення магнезійного, періклазового і періклазовуглецевого бою на металургійних підприємствах України становить – 2500-3000 т.

2. Магnezит сирий, кусковий 2-3 сорт турецького або словацького родовищ. Порошок магнезитовий спечений словацьких родовищ.

Дані компоненти імпортуються і тому мають високу вартість. Вони застосовуються у виключно збагачувальних цілях в разі необхідності підвищення вмісту MgO у складі брикету. Так само є джерелами важкорозчинної, «зернової» фракції 2-6 мм.

3. Відходи виробництва доломіту.

Основне джерело легкорозчинного, дрібнодисперсного компонента в шихтуванні. Матеріал вносить корисні оксиди MgO і CaO у вигляді гідроксидів і карбонатів. Вміст $(MgCO_3 + CaCO_3) \geq 80\%$, $(Ca(OH)_2 + Mg(OH)_2) \geq 10\%$. При цьому в перерахунку на чисті оксиди на прокалену речовину $MgO = 30-35\%$, $CaO = 50-55\%$. Такий хімічний склад забезпечує високу швидкість «руйнування» брикету при контакті зі шлаком і, відповідно, швидку асиміляцію компонентів.

Орієнтовні поклади, у вигляді техногенних відходів, що покривають десятки гектар землі смт. Гольмівський в Донецькій області, наприклад, становлять 100 - 150 тис. т.

4. Відходи виробництва доломіту ПАТ «ДФКД» докучаєвського родовища, мелені марки «ПМ-1» підприємства ТОВ «М-ЦЕМ» (м. Макіївка).

Даний сировинний компонент є аналогом відходів виробництва доломіту колишнього «Микитівського вогнетривкого комбінату». Однак він має більш низький вміст MgO (20-25%) на прокалену речовину. Позитивна відмінність від відходів «НОК» – більш низький вміст вологи – 5-8% проти 15-20%, відповідно.

5. Вугілля мелене шламове зі збагачувальних фабрик.

Вугілля виступає як антиоксидант кінцевого конвертерного шлаку, що знижує вміст у ньому FeO. Він вводиться в шихтування брикету при необхідності виключно в продукцію, орієнтовану на підприємства з технологією високожелезистих (переокислення) шлаків. Компонент може бути так само введений для підвищення якості брикетування, з метою підвищення міцності готового брикету.

6. Зв'язка брикетна виробництва ПрАТ «Донецька брикетна фабрика». Зв'язуючий компонент, що виробляється на основі меляси – органічного матеріалу, який утворюється у вигляді відходів при виробництві цукру.

Поряд із забезпеченням високих характеристик міцності, органічне зв'язуюче вигорає вже в перші секунди контакту магnezіальних брикетів з конвертерним шлаком, що забезпечує швидку асиміляцію.

На початковому етапі відпрацювання технології виробництва магnezіальних флюсів у технологічній схемі використовувались виробничі агрегати двох підприємств: ПАТ «Красногорівського вогнетривкого заводу» і ПрАТ «Донецької брикетної фабрики».

Магnezіальні флюси для металургійної промисловості є брикетами квадратної форми 60×60×40 мм або 40×40×20 мм. Форма та розміри визначаються розміром осередку валкового брикетувального пресу і можуть

бути змінені в залежності від вимог і умов застосування підприємства-замовника. Останні, як правило, залежать від стану і характеристик транспортного і бункерного господарства сталеплавильних цехів.

Зовнішній вид брикету магнезійних модифікаторів марок «БК-4», «БК-8» і «БК-9» представлено на рисунку 4.8.

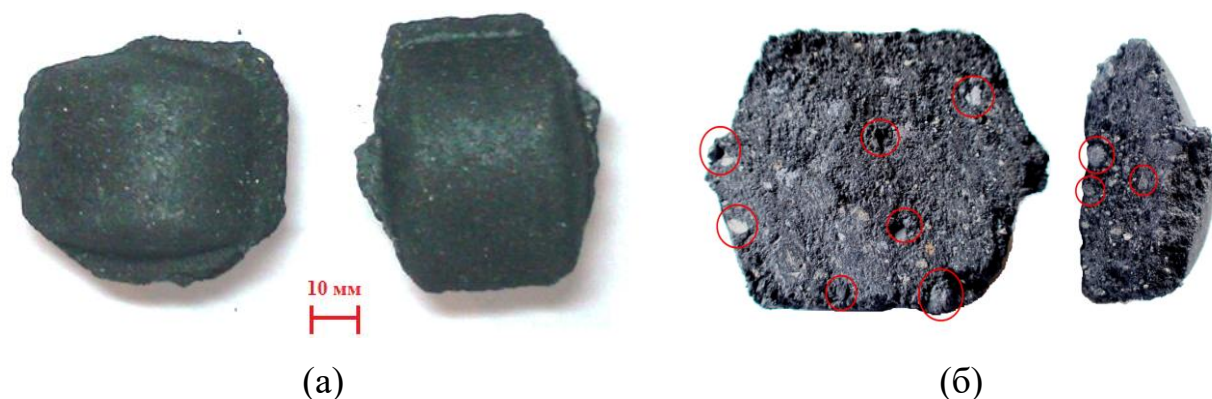


Рисунок 4.8 – Брикетований флюс-модифікатор марки «БДМ»/«БК 4» (розмір – 60×40×40 мм) – а); важкорозчинні фракції 2-6 мм у складі модифікатора – б).

Технологічна схема виробництва магнезійних флюсів являє собою процес дроблення основного магнезит- і периклазовмісного компонента до фракції 2-6 мм з відсівом дріб'язку, його змішування з тонкоподрібненим доломітовмісним наповнювачем (співвідношення $\approx 3:1$), добавлення меленого вугілля, при необхідності в кількості 5-6%, зволоження суміші спеціальною зв'язкою і брикетування на валковому брикетувальному пресі.

Для виробництва в умовах ПАТ «КрОЗ» у цеху мелених матеріалів було задіяно дробильно-розмелювальне обладнання, лінії транспортування порошків, склади приймання та відвантаження сухої суміші. Всі сировинні компоненти, крім вугілля та зв'язуючого, надходили на завод з оптимальною вологістю для виключення підвищених транспортних витрат на перевезення.

Принципова схема надходження і транспортування основних матеріалів для виробництва готової продукції представлена на рисунку 4.9.

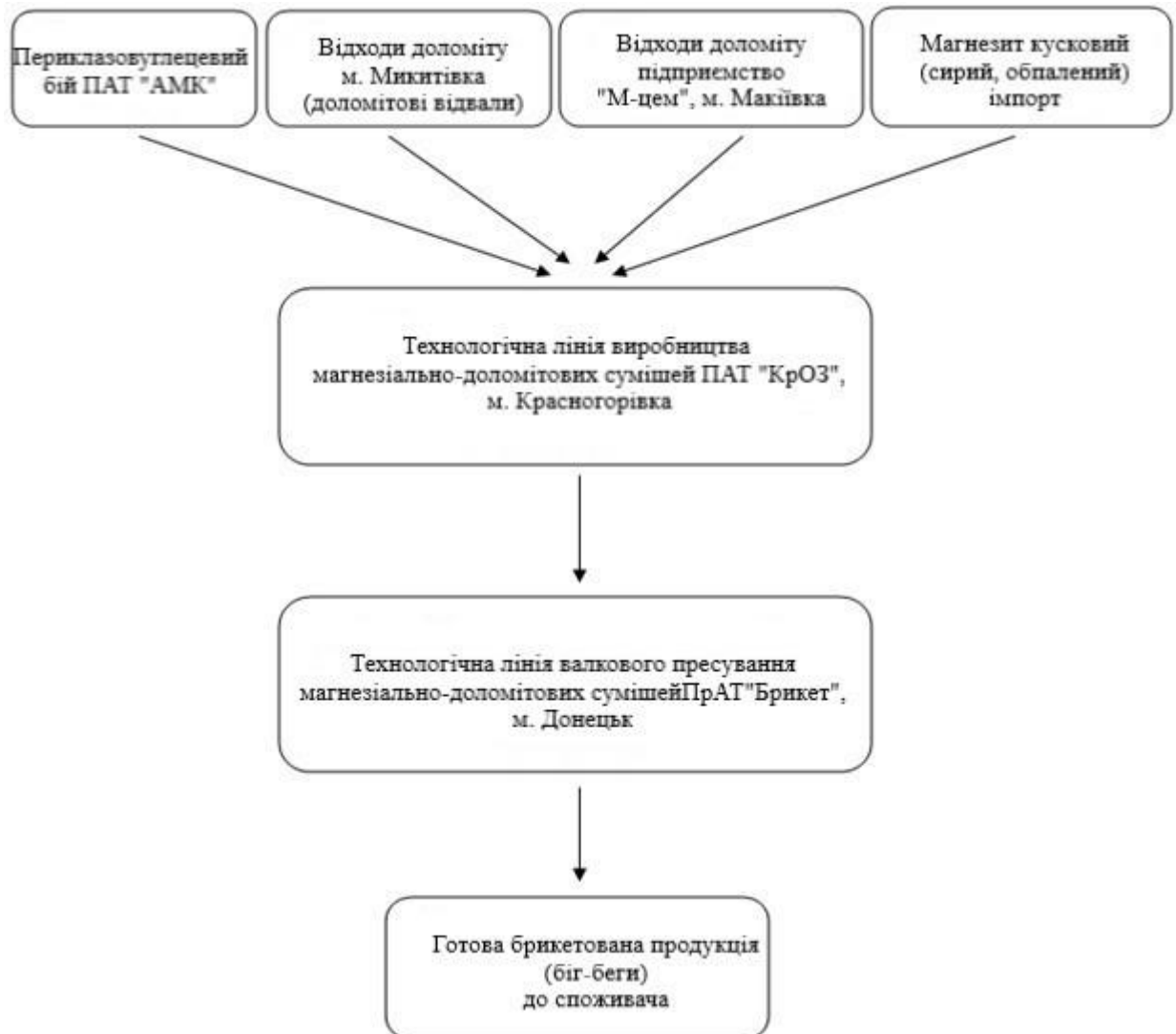


Рисунок 4.9. – Схематичне подання «руху» основних матеріалів при виробництві розроблених магнезійних модифікаторів

Загальний вид сировинних компонентів, основних агрегатів і механізмів технологічної схеми виробництва магнезійних модифікаторів марки «БК 4», «БК-8» і «БК-9» представлено на рисунку 4.10.

Технологічний комплекс і схема ланцюга апаратів лінії валкового пресування згідно ТУ У 37.1-001176526-001: 2006 представлені на рисунку 4.11.



Периклазовуглецевий біт



Відходи доломітового виробництва



Доломітова мука



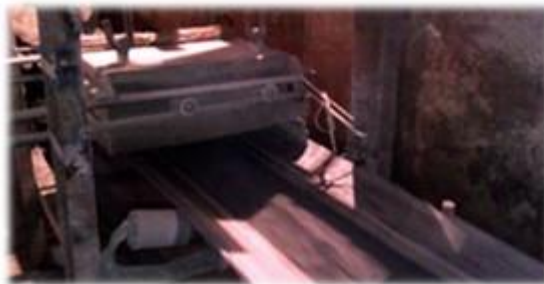
Щікова дробарка



Бункер шарового млина №2



Шаровий млин №2



Транспортер готової суміші



Валковий брикетувальний прес

Рисунок 4.10. – Основні етапи технологічного процесу виробництва магнезійної суміші.

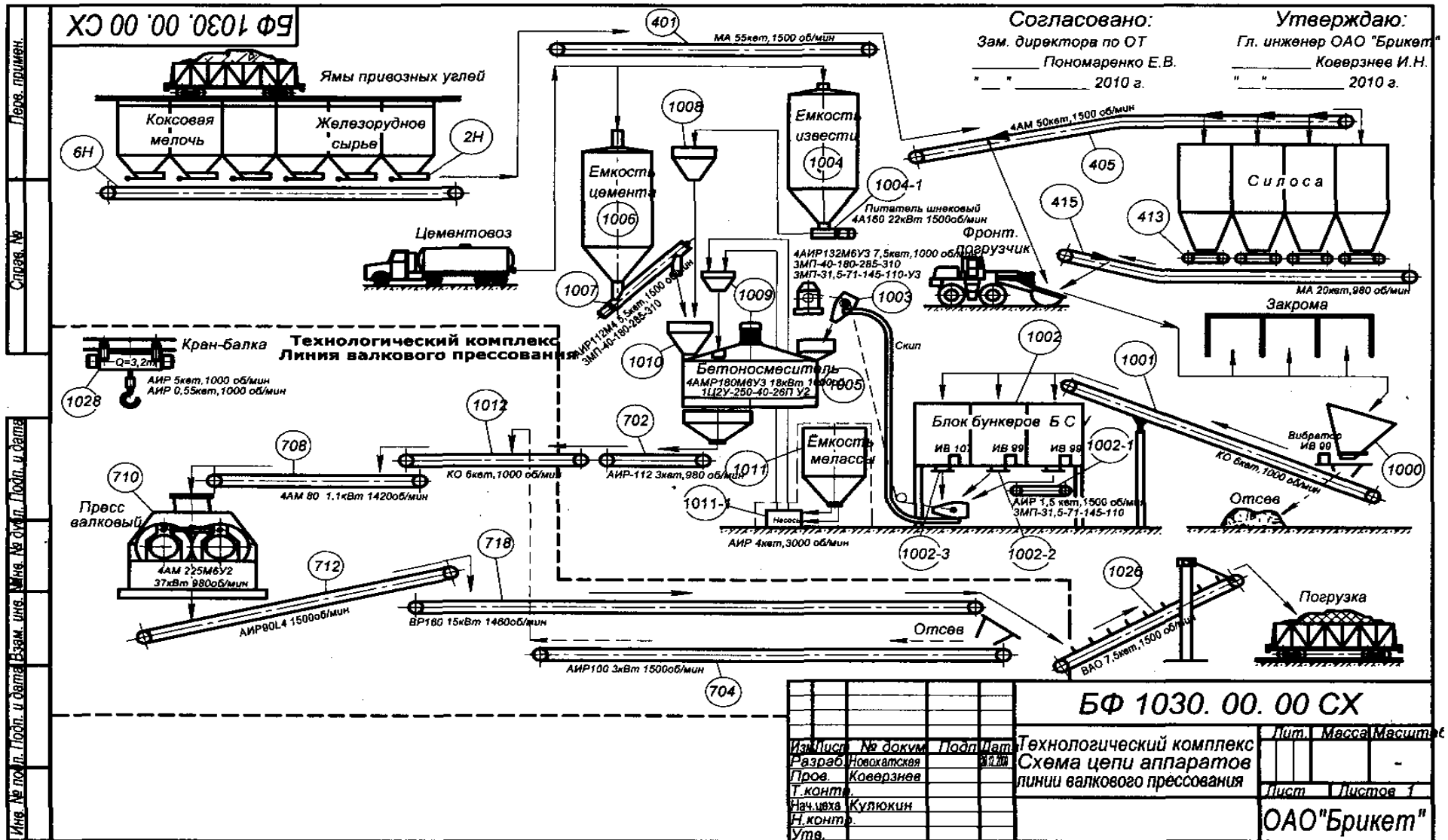


Рисунок 4.11. – Технологічний комплекс і схема ланцюга апаратів лінії валкового пресування в умовах ПрАТ «Брикет».

Сировину, що прибувала складували на бетонованому складі сировини, окремо за видами і марками. Дозування та змішування компонентів шихти в необхідних пропорціях, здійснювали грейферним способом, у бункер над щіковою дробаркою. Далі через лотковий живильник всі компоненти надходили на щікову дробарку. Дроблення робили в металевий кубель, в якому дроблену суміш піддавали додатковому перемішуванню грейферним краном. Після перемішування суміш грейфером подавали в бункер № 17, з якого стрічковим конвеєром вона надходила в бункер над кульовим млином № 2, далі по стрічковому живильнику транспортувалась у кульовий млин № 2, де піддавалась помолу. Після цього елеватором № 4 суміш подавали на віброгуркіт, зі встановленою на ньому сіткою № 5.

Далі, відсіяна суміш, послідовно стрічковим транспортером і елеватором № 2 подавалась у відвантажувальний бункер, через який суміш вантажилась в біг-беги (переважно по 1 т) для відправки на стадію брикетування в умовах ПрАТ «Брикет».

В умовах ПрАТ «Брикет» була задіяна лінія валкового пресування для виробництва брикетів марок «БК-4», «БК-8», «БК-9» по ТУ У 37.1-001 76526-001: 2006 відповідно до зміни №10. Мелене вугілля надходило на склад ПрАТ «Брикет», а зв'язуюча добавка готувалась безпосередньо перед початком процесу брикетування сухої упакованої суміші, що надходить з ПАТ «КрОЗ» автотранспортом.

Приєм вихідної сировини для «чистоти» дозування здійснювався в біг-бегах і вивантажувався мостовим краном поз. 1028 у цех. Далі ковшовим автотранспортом завантажувався в блок бункерів БЗУ. Живильник поз. 1002 передавав сировину в скіп і далі в бетонозмішувач поз. 1005. У змішувач подавались компоненти зв'язуючого, після перемішування готова до брикетування шихта системою стрічкових конвеєрів поз. 702, поз.1012, поз.708 передавалась на валковий прес поз. 710. Після преса на стрічкових конвеєрах поз. 712, поз. 718 готові брикети завантажувались у біг-беги для відправки споживачам. Умови транспортування, зберігання і дозування

флюсів передбачають вимоги по механічній міцності брикетів, на рівні 8-10 МПа (і 90% на скидання) відповідно до ГОСТ 21289-75 щоб уникнути руйнування при падінні та в умовах можливого контакту з вологою або снігом. Таким чином, на практиці реалізовано виробництво магнезійних модифікаторів переважно на основі вторинної вітчизняної сировини відповідно до розробленого і запатентованого способу на виробничих майданчиках компанії ТОВ «ГІР-Інтернешнл». Розташування виробничих площ володіє невеликим «транспортним плечем» до більшості металургійних підприємств України.

В період з 04.02. по 28.02.2013 р. за розробленою схемою, відповідно до змін №10 до ТУ У 37.1-001 76526-001: 2006 виготовлена дослідна партія магнезійного модифікатора марки «БК-4» в обсязі 60 т (1 ж/д вагон) для ПАТ «АМК».

У подальшому передбачається будівництво власної брикетувальної лінії на базі наявних потужностей ПАТ «КрОЗ» з метою замкненого циклу з виробництва та брикетування магнезійно-доломітових сумішей на одному підприємстві. В таких умовах техніко-економічне обґрунтування організації виробництва магнезійних флюсів передбачає випуск понад 5 тис. т на рік. При цьому на першому етапі до 1 тис. т на рік за тимчасовою схемою давальницької сировини з подальшим розширенням виробничої потужності технологічного обладнання та складських територій.

4.3. Випробування дослідної партії магнезійних брикетованих флюсів марки «БК-4» українського виробництва в умовах ККЦ ПАТ «АМК»

Випробування дослідно-промислової партії магнезійних брикетованих флюсів марки «БК-4» в обсязі 60 т вітчизняного виробництва поставки компанії ТОВ «ГІР-Інтернешнл» проводились в умовах ПАТ «Алчевський металургійний комбінат» у 2013 р.

Однією з основних відмінних особливостей конструкції робочого простору конвертера (місткість 300 т) з комбінованим продуванням у порівнянні з 350 т конвертером верхнього дуття ПАТ «МК «Азовсталь» є більше співвідношення $H/D=1,32$ проти $H/D=1,20$, відповідно. Таке співвідношення визначає більш вузький профіль робочої футерівки, велику глибину рідкої ванни до 1,8-1,9 м і більш «високу» зону шлаку, а отже, дещо інший характер випереджаючого зносу кладки. Так, аналогічний за своїм характером (тороїдообразний) рух потоків у ванні розмиває зону т. зв. «підцапфених кишень» розташованих вище стику нижнього конуса і циліндричної частини. Як найбільш проблемна зона футерівки всіх конвертерів ця область відновлюється виключно методом нанесення гарнісажу за допомогою роздування азотом. Тому особлива увага в ході експериментального періоду приділялася саме цій зоні.

Ще однією відмінною особливістю конвертерного виробництва, з комбінованим продуванням на ПАТ «АМК» є малошлакова технологія процесу (20-25 т шлаку/пл.) з вмістом у ньому (FeO) на рівні 15-18%. При цьому в умовах стабільного шихтування плавки з витратою чавуну 820 - 850 кг/т забезпечується оперативний контроль хімічного аналізу повалочного шлаку, що не перевищує 5-8 хв.

У період промислових досліджень використовувався стандартний 6-ти сопловий (центральне сопло – «завихрювач») наконечник верхньої фурми, що забезпечує об'єднання зовнішніх границь кратерів рідкого шлаку. З використанням математичних залежностей отриманих у ході фізичного і математичного моделювання процесу роздування шлаку було обрано такі параметри азотного дуття: висота положення верхньої фурми – 900-1100 мм над рівнем шлакової ванни, тиск азоту становив $18-19 \text{ кгс/см}^2$ при витраті у 1200 - 1300 $\text{м}^3/\text{хв}$. Дані параметри забезпечували максимальний «бризговідніс» шлаку в області «цапфових кишень» і цапф безпосередньо. Такий режим ведення та моніторингу основних параметрів проведення плавки також забезпечує можливість своєчасного контролю фізико-хімічних

властивостей кінцевого шлаку і дозволяє одноразово провести розрахунок кількості модифікатора на роздування.

Випробування проводились в умовах стабільної технології виплавки сталі за чинною нормативно-технічною документацією Алчевського металургійного комбінату на конвертері №1. При проведенні випробувань магнезійні матеріали (флюси типу «Dalslag P71» і «Dalslag P66») фірми «Dalmond», використовувані на постійній основі, були повністю виключені з технології для забезпечення «чистоти» експерименту. Хімічний склад магнезійних брикетованих флюсів «БК-4» наведено в таблиці 4.15.

Таблиця 4.15

Хімічний склад магнезійного флюсу марки «БК-4»

Показники	Масова частка, %				
	MgO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	в. п. п.
Фактичні	60,5	8,94	17,4	2,36	16,3

Відпрацювання модифікування кінцевого шлаку під роздування, за рішенням цехового персоналу виробляли в два етапи. На першому етапі присадка модифікатора проводилась в одну порцію в кінці продування киснем. Середня фактична витрата флюсу «БК-4» склала – 730 кг/операція або 2,7 кг/т сталі (дані по 23 пл.). При цьому в залежності від консистенції шлаку, і даних експрес аналізу перед роздуванням допускалась присадка вугілля в кількості 150-200 кг/операція, для зниження вмісту (FeO). Подача доломітизованого вапна і вапняку, які використовуються на постійній основі у кінцевий шлак повністю виключалась в зв'язку з відсутністю необхідності.

Усереднений хімічний склад проб кінцевого повалочного шлаку без присадки модифікатора та з присадкою в кінці продування киснем наведено в таблиці 4.16.

Таблиця 4.16.

Хімічний аналіз конвертерного шлаку

Проба	Масова частка, %					
	CaO	SiO ₂	MgO	FeO	Fe _{заг.}	B
«Повалка»	39,4	14,3	4,5	18,3	21,1	3,01
«Модифікування»	41,1	13,4	5,3	18,7	19,9	3,43

За даними хімічного аналізу шлаку, що представлеі в таблиці 4.16, видно незначне підвищення вмісту MgO у модифікованому шлаці (на $\approx 0,8\%$). До того ж детальний мінералогічний аналіз гарнісажу показав відсутність армуючого скелета з тугоплавких «зерен» внаслідок їх повного розчинення. При цьому вміст Fe_{заг.} знаходився приблизно на одному і тому ж рівні, що обумовлювало високу рідкорухомість розплаву з поганою його адгезією до поверхні вогнетривів. Така консистенція шлаку викликала необхідність присадки значної кількості вугілля (АКО) на розкислення – до 200 кг/операція, що в ряді випадків супроводжувалось неконтрольованим спінюванням шлаку і викидами. Стійкість гарнісажного покриття при модифікуванні шлаку таким методом не перевищувала 1 пл.

На другому етапі присадку флюсу здійснювали двома порціями, безпосередньо на залишок кінцевого шлаку. Перша порція в кількості (75% від наважки) подавалась до подачі азоту, а потім робили 1 - 2 нахилу конвертера на 45° для гомогенізації шлаку. Друга порція (25% від наважки) віддавалась «під струмінь» азоту на перших секундах роздування. При цьому, в залежності від консистенції шлаку і вмісту (FeO) в ньому на «повалення» застосовувалось вугілля (АКО) з витратою – 50-100 кг/операція, для зниження окислення та рідкорухомості розплаву. Середня фактична витрата матеріалу марки «БК-4» присаджуваного на даному етапі склала – 638 кг/операцію або 2,1 кг/т сталі (дані за 60 пл.).

Усереднений хімічний склад проб кінцевого шлаку до модифікування та після представлено в таблиці 4.17.

Таблиця 4.17

Хімічний аналіз конвертерного шлаку

Проба	Масова частка, %					
	CaO	SiO ₂	MgO	FeO	Fe _{заг.}	B
«Повалка»	41,1	15,2	5,0	16,5	19,6	3,03
«Модифікування»	43,2	13,8	7,4	14,9	17,1	3,59

Присадка «БК-4» в якості модифікатора на залишок шлаку забезпечувала підвищення вмісту MgO на 2,4% і зниження вмісту Fe_{заг.} на 2,5% за рахунок вуглецевої складової флюсу. Докладний мінералогічний аналіз гарнісажу показав наявність нерозчинених тугоплавких «зерен» фракцією 1-4 мм у кількості 3-5 об. %.

На підставі отриманих результатів розроблено технологічний «міні-регламент» на модифікування шлаку матеріалом марки «БК-4» і вугілля-розкислювач АКО у залежності від фізико-хімічних параметрів кінцевого шлаку. Залежність добавки флюсу марки «БК-4» від вмісту Fe_{заг.} у шлаці в умовах «стабільного шихтування» представлено в таблиці 4.18.

Таблиця 4.18.

Залежність кількості добавки модифікатора «БК-4» від вмісту (Fe_{заг.}) у шлаці на повалці

Вміст (Fe _{заг.}) на повалці, %	Витрата «БК-4»*, т/операція
16-18	250-350
18-20	350-450
20-24	500-700
≥25	800-1000

* У разі «проміжного» і «повалочного» скачування шлаку – кількість додавання флюсу марки «БК-4» слід зменшити на 25-30%.

Загальна витрата магнезійних брикетів марки «БК-4» вітчизняного виробництва за період з 26.03.2013г по 31.03.2013г становить 57,294 т.

Всього відстежено 83 плавки при середній витраті ≈ 700 кг/операція, що відповідає 2,33 кг/т сталі.

Встановлено, що при модифікуванні шлаку безпосередньо перед роздуванням азотом на поверхні футерівки формувався рівномірний зносостійкий захисний шлаковий гарнісаж з позитивною динамікою його наростання. Максимальна стійкість гарнісажного шару досягнута при такій технології модифікування складала 3 пл.

У період дослідно-промислових випробувань здійснювався постійний моніторинг стану футерівки та динаміки утворення гарнісажного покриття за допомогою фото-фіксації та лазерного сканування залишкових товщин. Загальна графічна картина (сканограма) стану футерівки конвертера після використання дослідної партії магнезійного флюсу марки «БК-4» представлена на рисунку 4.12.

Динаміка зміни залишкових товщин футерівки конвертера в найбільш проблемних зонах «цапфових кишнях» за період випробування модифікатора марки «БК 4» наведена в таблиці 4.19.

Таблиця 4.19.

**Динаміка зміни залишкових товщини футерівки
конвертера №1 «цапфові кишні»**

Дата сканування	Привідна цапфа, мм	Холоста цапфа, мм
26.03.2013г	684	656
27.03.2013г	651	658
28.03.2013г	662	670
29.03.2013г*	688*	609*
01.04.2013г	710	687
Знос (+/-)	+26	+31

* – сканування відбувалось після проведення балансової плавки (2 пл. не здійснювалось роздування азотом) весь гарнісажний шар «розмитий». Виключається з аналізу.

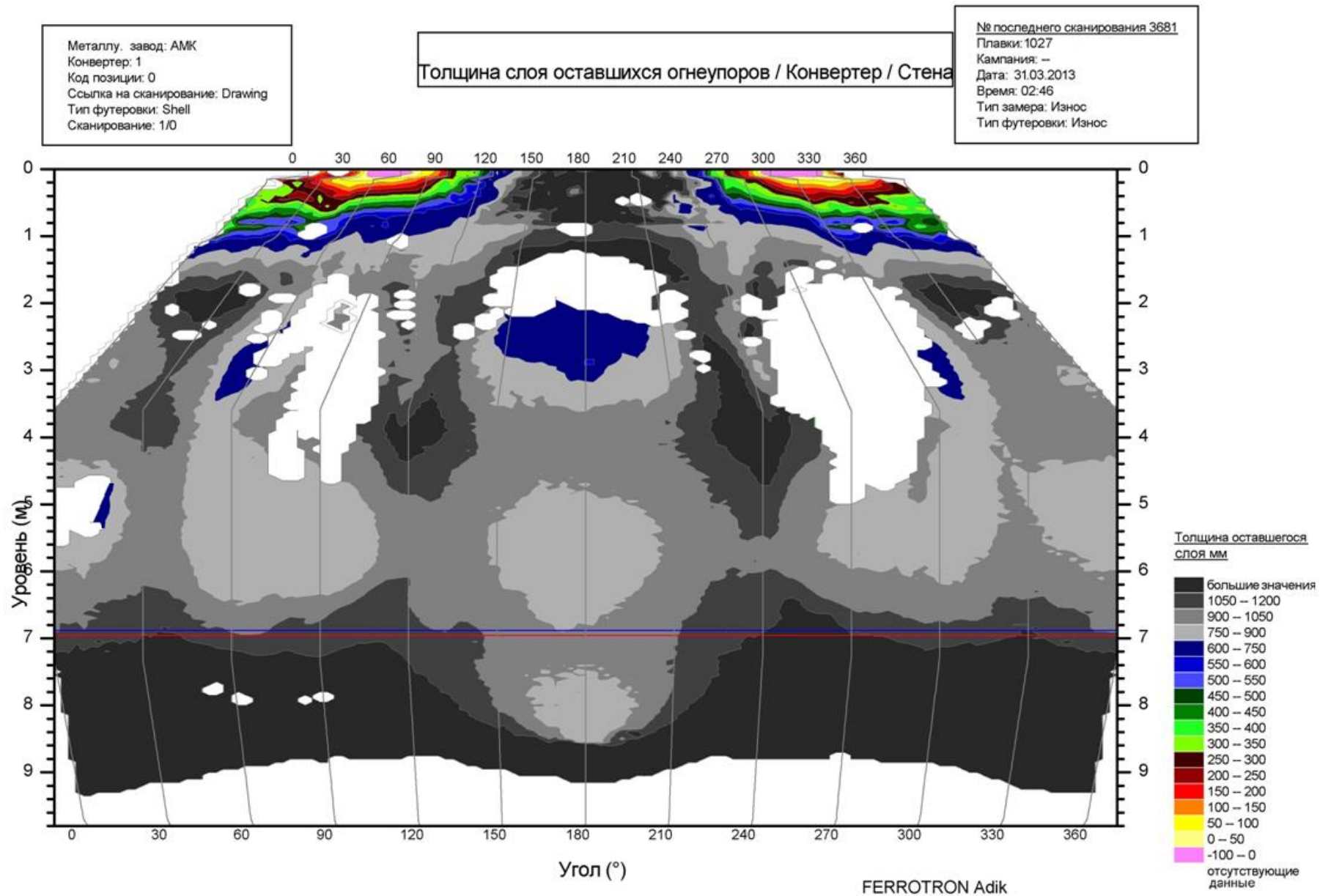


Рисунок 4.12. – Сканограмма стану футерівки робочого шару конвертера №1 на 1027 плавці за стійкістю.

У наведених в таблиці 4.19 даних простежується позитивна динаміка наростання гарнісажного шару, починаючи з другого етапу модифікування (безпосередньо у роздування) з 27.03.2013 р середнє збільшення товщини гарнісажного покриття по всій внутрішній поверхні футерівки конвертера склало 10 мм. Збільшення товщини гарнісажу в найбільш проблемних зонах «цапфових кишень» становить у середньому 27 мм. Так, на рисунку 4.12 видно, що дані зони мають максимальні залишкові товщини на рівні ≈ 1000 мм. Максимально зношені ділянки зон завалення і зливу металу на рівні 550-700 мм не є критичними, так як ефективно ремонтуються методом підварювання.

Таким чином, розроблений магnezійний модифікатор марки «БК-4» повністю відповідає виробничим умовам КЦ ПАТ «АМК». Добавка порції «БК-4» на кінцевий шлак, відповідно до запропонованого «міні-регламента» супроводжується швидкою його асиміляцією до 1-1,5 хв. Середня витрата флюсу в 700 кг/операція забезпечує рівномірний, зносостійкий захисний гарнісажний шар стійкістю до 3 плавок. Реалізація технології по модифікації кінцевого шлаку модифікатором марки «БК-4» для роздування азотом відповідно до розробленого «міні-регламенту» забезпечує зниження питомої витрати магnezіальних матеріалів на 1,17 кг/т сталі, що відповідає зниженню питомих витрат на 0,24 USD/т сталі (у цінах 2013).

Зниження питомої витрати та відповідно питомих затрат обумовлено, в першу чергу, більш низькою вартістю флюсу «БК-4» українського виробництва в порівнянні з альтернативними постачальниками і винятком магnezіальних матеріалів використовуваних в якості модифікаторів на постійній основі.

4.4. Дослідно-промислові випробування розробленої саморозтічної маси та основні стадії технології її виробництва в умовах ПрАТ «КрОЗ» у групі «GIR»

Найбільш перспективною технологією локального гарячого ремонту футерівки конвертера є підварювання саморозтічними, магнезіальними масами.

На вогнетривкому ринку України основними постачальниками подібних матеріалів є компанії «Dalmond» і «Puuyang». Обидві компанії це імпортери, що обумовлює високу вартість продукту, а також низьку «гнучкість» поставок за рахунок зарубіжної логістики, що, в кінцевому рахунку, веде до підвищення питомих витрат на 1 т сталі.

Виробництво магнезіальної підварювальної маси на базі недефіцитних, вторинних ресурсів України та ближнього зарубіжжя є досить рентабельним.

Щодо попиту на підварювальні маси, сировинні матеріали представлені на ринку в достатній кількості, зокрема, деякі є техногенними відходами металургійних підприємств, які потребують утилізації.

На підставі отриманих експериментальних даних і доступної вітчизняної сировинної бази, в промислову розробку прийняті дві рецептури саморозтічної, підварювальної, магнезіальної маси марок «GIR-RB-X-DMK», «GIR-RB-X».

Основними якісними показниками шихти промислових мас «GIR-RB-X», «GIR-RB-X-DMK» є:

– гранулометричний склад: фракції 0-8 мм, підібраний таким чином, щоб забезпечити максимально щільне укладання зернової складової після спікання;

– хімічний склад: вміст MgO 75-80 мас. % (на прокалену речовину) для забезпечення максимальної ерозійної стійкості після спікання; вміст вільного С 10-12% для забезпечення корозійної стійкості;

– сполучні компоненти S 10-11%: суміш органічних і неорганічних смол, кислот і солей; для забезпечення «рідкорухомості» маси в заданому інтервалі температур, регулювання часу спікання, надання заданої механічної міцності конгломерату.

На підставі експериментальних результатів і підібраного промислового шихтування в період з 01.05 по 10.05.2018 р. на виробничому майданчику компанії ТОВ «ГІР-Інжиніринг» в умовах ПрАТ «КрОЗ» виготовлені дослідні партії магнезійної підварювальної маси марок «GIR-RB-X» та «GIR-RB-X-DMK» у загальній кількості 10 т.

Основними компонентами при виробництві маси була вторинна сировина, тобто відходи металургійного (бій периклазової, периклазовуглецевої та периклазохромітової цегли) і вогнетривкого виробництва.

Одним з основних технологічних параметрів при виробництві саморозтічних ремонтних мас є інтенсивність змішування компонентів у т. з. «підвішеному шарі». Така необхідність зумовлена особливостями шихтування і необхідністю рівномірного «вмішування» тонкодисперсних добавок-зв'язуючих.

Компанія ТОВ «ГІР-Інжиніринг» має в своєму розпорядженні спеціально обладнану лінію для виробництва сухих сумішей, яка включає в себе бункерну естакаду (16 бункерів), шнекову систему подачі і автоматичного дозування, а також змішувачі примусової дії типу «Eirich». Основні кластери виробничої лінії представлені на рисунку 4.13.

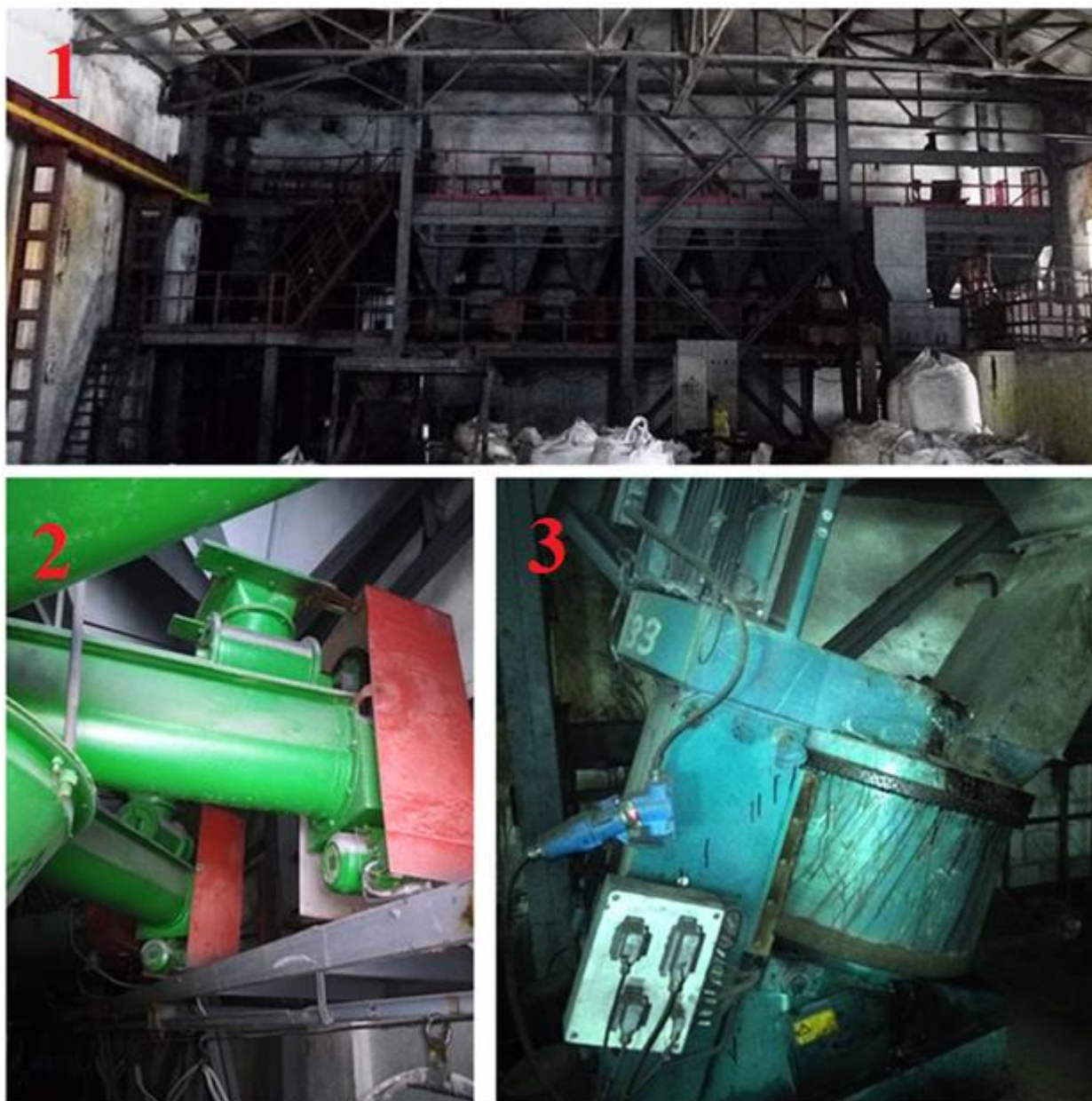


Рисунок 4.13. – Технологічна лінія компанії ТОВ «ГІР-Інжиніринг» з виробництва сухих вогнетривких сумішей, де 1 – бункерна естакада (16 бункерів), 2 – транспортувально-дозувальне господарство, 3 – змішувач примусової дії типу «Eirich».

Основні фізико-хімічні показники розроблених промислових складів магнезійної підварювальної маси дослідної партії в кількості 10 т представлені в таблиці 4.20.

Таблиця 4.20.

**Основні фізико-хімічні властивості маси марки «GIR-RB-X»
згідно НТД ТОВ «ГІР-Інжиніринг»**

Найменування показника	Норма для марки		Методи контролю
	GIR-RB-X-DMK	GIR-RB-X	
1. Масова частка загальної вологи W, % не більше	5	5	ГОСТ 22939.2
2. Гранулометричний склад, мм у межах	0-8	0-8	ДСТУ 3210
3. Масова частка оксиду магнію MgO, % не менше	75	80	ДСТУ 3305.8 (ГОСТ 2642.8)
4. Масова частка вуглецю С, % не менше	10	12	ГОСТ 23581.9
5. Межа міцності при стисненні (після спікання 1600 ° С), МПа не менше	30	35	ГОСТ 4071.1-94

Для зручності використання методом накидання на ремонтвану ділянку футерівки магнезіальна підварювальна маса марки «GIR-RB-X» / «GIR-RB-X-DMK» фасується в поліетиленові мішечки масою 3-5 кг і укладається в поліпропіленові МКР по 0,5-1,0 т у залежності від вимог замовника.

На рисунку 4.14. представлена напівавтоматична фасувальна установка (1), запайщик поліетиленових пакетів (2).

Приклад фасування та упаковки підварювальної маси «GIR-RB-X» / «GIR-RB-X-DMK» представлено на рисунку 4.15.



Рисунок 4.14. – Напівавтоматична фасувальна установка (1), запайник поліетиленових пакетів (2).



Рисунок 4.15. – Приклад фасування і упаковки підварювальної маси «GIR-RB-X»/«GIR-RB-X-DMK»

Станом на кінець 2018 р проведені промислові випробування маси в умовах двох металургійних комбінатів у кількості 3 т на кожному.

Так, протягом червня місяця 2018 року в умовах ПАТ «ДМК» проведені випробування підварювального маси марки «GIR-RB-X-DMK» у кількості 3 т на конвертері №1 і №2 ємністю 250 т.

На підставі випробувань отримані наступні результати:

- підварювальна маса марки «GIR-RB-X-DMK» при попаданні на футерівку конвертера займалась (загорялась), після витримування спікалась;
- стійкість підварювальної маси «GIR-RB-X-DMK» становила до 20 плавок, що відповідає стійкості базових постачальників;
- питома витрата підварювальної маси становила 0,089 кг/т, при нормативному – 0,092 кг/т, що відповідає зниженню питомих витрат на 0,01 USD/т.
- маса марки «GIR-RB-X-DMK» рекомендована до використання в умовах ПАТ «ДМК».

Всі представлені результати відображені у відповідному акті випробувань підприємства.

Протягом грудня місяця 2018 року в умовах конвертерного цеху ПрАТ «МК «Азовсталь» проведено випробування підварювальної маси марки «GIR-RB-X» у кількості 3 т на конвертері №1 і №2 ємністю 350 т.

На підставі випробувань отримані наступні результати:

- відзначена задовільна адгезія матеріалу до робочої футерівки і рівномірність утворення підварювального конгломерату;
- стійкість підварювального шару, виконаного з використанням маси марки «GIR-RB-X» становила до 30 плавок, що відповідає стійкості базових постачальників;
- маса марки «GIR-RB-X» рекомендована до використання в умовах ПрАТ «МК «Азовсталь».

Всі представлені результати відображені у відповідних актах випробувань підприємств (Додаток №2).

Станом на 2-ий квартал 2019 р розроблена магнезіальна підварювальна маса марок «GIR-RB-X»/«GIR-RB-X-DMK» пройшла всі необхідні апробації в умовах двох металургійних комбінатів, а компанія ТОВ «ГІР-Інжиніринг» є базовим постачальником даного виду продукції на ПАТ «ДМК» і ПрАТ «МК «Азовсталь». Виробничий потенціал технологічної лінії ТОВ «ГІР-

Інжиніринг» знаходиться на рівні 40-60 т підварювальної маси марок «GIR-RB-X»/«GIR-RB-X-DMK» у місяць. Такий обсяг покриває 80% потреб конвертерних цехів України.

Основними споживачами магнезіальної підварювальної маси марки «GIR-RB-X» передбачаються металургійні підприємства, що знаходяться в донецькому і дніпропетровському регіонах з конвертерним виробництвом сталі. Розвинена транспортна мережа дозволяє забезпечити доставку продукції на такі підприємства як ПАТ «МК «Азовсталь», ПрАТ «ММК ім. Ілліча», ПАТ «ДМК», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» як автомобільним, так і ж/д транспортом, відповідно до переваг замовника.

4.5. Висновки до розділу 4.

1. В умовах КЦ ПАТ «МК «Азовсталь» відпрацьована технологія роздування шлаку азотом з використанням спеціальних модифікаторів кінцевого конвертерного шлаку розроблених авторами, виготовлених у КНР і Словаччині на активах компанії «Puyang Refractories Group Co., Ltd» у кількості 1500 т.

2. Показана можливість чіткого регламентування обсягу та режиму присадок модифікатора під час продування і на кінцевий шлак з метою стабілізації процесу формування гарнісажу і зниження питомої витрати матеріалів.

3. В результаті промислових випробувань модифікаторів, оптимізації витрат їх присадок у ході реалізації розроблених «міні-регламентів» в умовах КЦ ПАТ «МК «Азовсталь», загальна, сумарна витрата магнезійних матеріалів на плавку була зменшена на 20% за кампанію, що відповідає зниженню питомих витрат на виробництво сталі на 0,87 USD/т (у цінах 2012 року).

4. Виробництво дослідно-промислової партії магнезіального модифікатора БК-4 на базі вітчизняної сировини здійснено на виробничих

потужностях компаній «GIR» (ПрАТ «КрОЗ») і ПрАТ «Брикет». Випробування дослідно-промислової партії в обсязі 60 т проводилися в умовах ПАТ «Алчевський металургійний комбінат». Максимальна стійкість гарнісажного покриття склала 3 плавки.

5. В результаті аналізу сканограм залишкових товщин при використанні дослідної партії модифікатора марки БК-4, зафіксовано збільшення шару гарнісажного покриття по всій внутрішній поверхні футерівки конвертера в середньому на 10 мм. Збільшення товщини гарнісажу в найбільш проблемних зонах «цапфових кишень» склало в середньому 27 мм. При цьому в гарнісажному покритті зафіксовано наявність нерозчинених тугоплавких зерен фракцією 1-3 мм у кількості 3-5%.

6. Впровадження у виробничий процес ПАТ «Алчевський металургійний комбінат» розроблених міні-регламентів по присадці магnezіального модифікатора марки БК-4 з витратою до 700 кг/операція дозволило знизити питомі витрати додаткових матеріалів на 1,17 кг/т сталі, що відповідає зниженню питомих витрат на 0,24 USD/т сталі (в цінах 2013).

7. На виробничому майданчику компанії ТОВ «ГІР-Інжиніринг» в умовах ПрАТ «КрОЗ» виготовлені дослідні партії магnezіальної підварювальної маси марки «GIR-RB-X» та «GIR-RB-X-DMK» у загальній кількості 10 т. Основними компонентами при виробництві маси була вторинна сировина, тобто відходи металургійного (бій периклазової, периклазовуглецевої і периклазохромітової цегли) і вогнетривкого виробництва.

8. Станом на 2-ий квартал 2019 р. розроблена магnezіальна підварювальна маса марок «GIR-RB-X» / «GIR-RB-X-DMK» пройшла всі необхідні апробації в умовах двох металургійних комбінатів, а компанія ТОВ «ГІР-Інжиніринг» є базовим постачальником даного виду продукції на ПАТ «ДМК» (стійкість до 20 пл.) і ПрАТ «МК «Азовсталь» (стійкість до 30 пл.). Такі показники стійкості відповідають найкращим закордонним аналогам.

ВИСНОВКИ

1. Показано, що найбільш ефективними і відносно маловитратними способами обслуговування футерівки конвертера є роздування кінцевого шлаку азотом модифікованого спеціальними флюсами та підварювання саморозтічними, магнезійними ремонтними масами.

2. Для отримання додаткових відомостей щодо гідродинаміки рідкої ванни конвертера і характерних зон випереджаючого ерозійного зносу футерівки протягом кампанії розроблена фізична модель кисневого конвертера в масштабі 1:6. Відпрацьована в ході фізичного моделювання методика дозволила уточнити режими продування конвертерної ванни з метою визначення зон нерівномірного зносу робочого шару футерівки конвертера.

3. Розроблено математичну модель перемішування рідкої ванни конвертера з використанням прикладного пакету Ansys Int., що дозволяє оцінювати гідродинамічний стан розплаву в процесі продування і визначити зони футерівки, схильні до підвищеного ерозійному зносу.

4. Співвідносячи отримані дані в ході моделювання з виробничою практикою зношення вогнетривкої футерівки більшості конвертерів, як з верхнім, так і з комбінованим продуванням, визначено теоретичні передумови випереджуючого зношування футерівки нижнього конуса конвертера, т. зв. «грибоподібний знос». Такий знос, в першу чергу, пояснюється тороїдоподібним напрямком руху потоків у рідкій ванні, і тим сильніше, чим менше «організований», з точки зору симетрії, такий рух.

5. Розроблено фізичну модель 160 т конвертера в масштабі 1:20 і методика для якісної оцінки механізму нанесення гарнісажного покриття на футерівку агрегату. Розроблена фізична модель та методика набризкування гарнісажного шару дозволяє оптимізувати технологічні параметри роздування, такі як витрата дуття, положення верхньої фурми і т. ін.

6. Показана можливість рівномірного відновлення випереджаючого «грибовидного зносу» футерівки, викликаного особливостями гідродинаміки

рідкої ванни, за допомогою оптимізації дуттєвих параметрів і фізичних властивостей роздуваного шлаку. Встановлено, що при постійній витраті азоту і його тиску в магістралі ($Q_{г.} = 480 \text{ м}^3/\text{хв}$, а $P_{г.} = 16 \text{ аті}$) маса гарнісажного покриття екстремально залежить від висоти положення фурми.

7. Розроблена комплексна методика оцінки впливу фізичних властивостей кінцевого шлаку після його модифікації на ефективність адгезії до робочої поверхні періклазовуглецевої цегли (у т. ч. змочування) і температурний інтервал плавлення (тугоплавкість) гарнісажу.

8. Встановлено, що наявність у магнезійному брикеті важкорозчинних компонентів, в кількості щонайменше 0,60-0,65% (мас.), 80% яких мають фракцію 2-6 мм, забезпечує необхідний обсяг «зернового» наповнювача і формування арматурного «скелета» в охолодженому гарнісажі. При цьому легкорозчинний, дрібнодисперсний, магнезійний компонент, узятий в кількості 0,4- 0,45% (мас.) насичує шлак оксидом магнію до рівня 7- 8%, вже в перші секунди роздування.

9. Показано, що з підвищенням кількості диспергованої твердої (нерозчиненої) фази в шлаці його в'язкість зростає, а при досягненні концентрації 7-9% «зернової» фази шлак має «задовільну» для виконання операції напризкування в'язкість. Тоді як, зі збільшенням кількості «зерен» до 10% і більше спостерігається різке підвищення в'язкості пов'язане з інтенсивною гетерогенізацією розплаву.

10. Розроблена комплексна методика оцінки фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей магнезійної, саморозтічної, підварювальної маси для гарячого ремонту футерівки конвертера. Методика дозволяє розробляти й оцінювати якість ремонтного матеріалу для будь-яких конвертерних агрегатів і умов експлуатації. Це досягається за рахунок її універсальності:

- футерівка печі виконується з конвертерної цегли;
- шлакометалева емульсія відбирається у цеху в необхідній кількості.

11. Для визначення експлуатаційних властивостей підварювальної маси введено параметр (Q), як відношення мас «відпрацьованої» підварки до сирової наважки, що подається в піч, з поправкою на в. п. п. (втрати маси при прожарюванні) досліджуваного складу.

12. В результаті досліджень залежності співвідношення (Q) від вмісту основного оксиду MgO (%), вміст вільного С (%) і вміст комплексної добавки-зв'язуючого S (%) встановлено, що залежності мають екстремальний характер, тобто на графіках присутні області «перегинів» характерні для максимальних значень параметра (Q).

13. Встановлено, що найбільш високий показник співвідношення (Q), а відповідно найбільша стійкість підварювальної маси відповідає наступному складу: вміст основного оксиду MgO (%) – 76-80%; вміст вільного С (%) – 10-12%; вміст комплексної добавки - зв'язуючого S (%) – 10-11%.

14. В умовах КЦ ПАТ «МК «Азовсталь» відпрацьована технологія роздування шлаку азотом з використанням спеціальних модифікаторів кінцевого конвертерного шлаку розроблених авторами, виготовлених у КНР і Словаччині на активах компанії «Puyang Refractories Group Co., Ltd» у кількості 1500 т.

15. Показана можливість чіткого регламентування обсягу та режиму присадок модифікатора під час продування і на кінцевий шлак з метою стабілізації процесу формування гарнісажу і зниження питомої витрати матеріалів.

16. В результаті промислових випробувань модифікаторів, оптимізації витрат їх присадок у ході реалізації розроблених «міні-регламентів» в умовах КЦ ПАТ «МК «Азовсталь», загальна, сумарна витрата магнієвмісних матеріалів на плавку була зменшена на 20% за кампанію, що відповідає зниженню питомих витрат на виробництво сталі на 0,87 USD/т (у цінах 2012 року).

17. Вироблено дослідно-промислову партію магnezіального модифікатора БК-4 на базі вітчизняної сировини (в т.ч. вторинних

матеріалів). Виробництво здійснено на потужностях компаній «GIR» (ПрАТ «КрОЗ») і ПрАТ «Брикет». Випробування дослідно-промислової партії в обсязі 60 т проводилися в умовах ПАТ «Алчевський металургійний комбінат». Максимальна стійкість гарнісажного покриття склала 3 плавки.

18. В результаті аналізу сканограмм залишкових товщин при використанні дослідної партії модифікатора марки БК-4, зафіксовано збільшення шару гарнісажного покриття по всій внутрішній поверхні футерівки конвертера в середньому на 10 мм. Збільшення товщини гарнісажу в найбільш проблемних зонах «цапфових кишень» склало в середньому 27 мм. При цьому в гарнісажному покритті зафіксовано наявність нерозчинених тугоплавких зерен фракцією 1-3 мм у кількості 3-5%.

19. Впровадження у виробничий процес ПАТ «Алчевський металургійний комбінат» розроблених міні-регламентів по присадці магnezіального модифікатора марки БК-4 з витратою до 700 кг/операція дозволило знизити питомі витрати додаткових матеріалів на 1,17 кг/т сталі, що відповідає зниженню питомих витрат на 0,24 USD/т сталі (в цінах 2013).

20. На виробничому майданчику компанії ТОВ «ГІР-Інжиніринг» в умовах ПрАТ «КрОЗ» виготовлені дослідні партії магnezіальної підварювальної маси марки «GIR-RB-X» та «GIR-RB-X-DMK» у загальній кількості 10 тн. Основними компонентами при виробництві маси була вторинна сировина, тобто відходи металургійного (бій периклазової, периклазовуглецевої і периклазохромітової цегли) і вогнетривкого виробництва.

21. Станом на 2-ий квартал 2019 р. розроблена магnezіальна підварювальна маса марок «GIR-RB-X» / «GIR-RB-X-DMK» пройшла всі необхідні апробації в умовах двох металургійних комбінатів, а компанія ТОВ «ГІР-Інжиніринг» є базовим постачальником даного виду продукції на ПАТ «ДМК» (стійкість до 20 пл.) і ПрАТ «МК «Азовсталь» (стійкість до 30 пл.). Такі показники стійкості відповідають найкращим закордонним аналогам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Смирнов А. Н. Развитие конвертерного производства стали в мире / А. Н. Смирнов // *Металл.* №11. 2006. – С. 18-27.
2. Смирнов А. Н. Тенденции развития производства стали в конвертерных цехах / А. Н. Смирнов // *Черная металлургия.* №1. 2010.– С. 37-43.
3. Конвертерное производство стали / Бойченко Б. М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. – Днепропетровск, 2006. – 454с.
4. Сердюков А. А. Современная футеровка для крупных кислородных конвертеров / А. А. Сердюков, А. Ф. Тонкушин, А. Н. Смирнов // *Металлы и литье Украины.* №9-10, 2010. – С.4-7.
5. Смирнов А. Н. Перспективы развития рынка огнеупоров для сталеплавильного комплекса Украины / А. Н. Смирнов // *Металлургический компас. Украина – Мир.* №4. 2010. – С. 16-23.
6. Смирнов А. Н. Повышение стойкости футеровки и совершенствование методов обслуживания современных большегрузных конвертеров / А. Н. Смирнов, А. А. Сердюков, А. Ф. Тонкушин, К. Н. Шарандин // *Бюллетень научно-технической и экономической информации. Черная металлургия,* №6, 2012.– С. 26-30.
7. Смирнов А. Н. Оптимизация показателей стойкости и снижение затрат на футеровку конвертера / А. Н. Смирнов, К. Е. Писмарев, А. А. Сердюков, К. Н. Шарандин, А. Ф. Тонкушин // *Металл и литье Украины.* №11. 2011. – С. 24-28.
8. Н. Junger. Relationships Between Basic Oxygen Furnace Maintenance Strategies and Steelmaking Productivity / Н. Junger, С. Jandl, J. Cappel // *Iron & Steel Technology,* November 2008.– pp. 30 – 35.
9. Хорошавин Л. В. Магнезиальные огнеупоры. / Л.В. Хорошавин, В.А. Перепелицын, В.А. Кононов. // *Справочник.* – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 576 с.

10. Aksel'rod L.M. Fabrication of periclase-carbon refractories with an antioxidant and their testing in a lining of 370-ton converter / L.M. Aksel'rod, O.V. Kvyatkovskii // *Refractories and Industrial Ceramics*, Vol. 40, No. 5 – 6, 1999.– pp. 221 – 223.
11. Bradt R.C. CVD Carbon infiltration of a magnesite refractory / R.C. Bradt, A. Navarrette-Guijosa, P.L. Walker // *Ceramic bulletin*, Vol. 55, No. 7, July 1976. – pp. 640 – 642.
12. Сунаяма Х. Скорость коррозии периклазоуглеродистых изделий шлаком, содержащим FeO / Х. Сунаяма, М. Кавабара, Т. Кономото // *Новости чёрной металлургии за рубежом*. № 3. 1998. –С. 120-121.
13. О стойкости периклазоуглеродистой футеровки 60-тонных конвертеров ПАО «ЕВРАЗ – ДМЗ им. Петровского» / К. Ф. Чмырков С. М. Онацкий, Д. П. Васильев, В. И. Шпак // *Новости науки Приднепровья*. – 2012. – № 3-4. – С. 62-64.
14. G. Wohmeyer, The Impact of Synthetic Slags on Steel Ladle Refractory Life Time/ G. Wohmeyer, T. Elorrza-Ricard, R. Joilly // *51st International Colloquium on Refractories*, 2008, Aachen, Germany, 15-16 October 2008.– p.80-83.
15. Barthel H. The Magnesia-Based Lining of Oxygen Steel Converters to Conform with Changed Requirements. / H. Barthel, G. Buchebner, E. Kaltner. // *Interceram*, 34 Spec. Refr. Issue, 1985.–pp. 1-4.
16. Mörtl G. Entwicklung und derzeitiger Stand der feuerfesten Zustellung von Sauerstoffblaskonvertern./ G. Mörtl; W. Kraft, H. Barthel // *Bergu Hüttenm Mh.*,137, Heft 5, 1992.– pp. 196-203.
17. Barthel, H.; Libal, W. and Hausner, R.: Die Ausbildung des Kohlenstoffs in teergetränkten Magnesitsteinen nach ihrem Einsatz in Sauerstoffblasgefäßen. *Ber. Dtsch. Keram. Ges.*, 47 (1970), Heft 9, pp. 532-537.
18. Pötschke, J.; Routschka, G.: The Oxidation of Carbon-Containing Refractories; 7th UNITECR 2001, November 2001, Cancun/ Mexico.

19. S. Jansson, V. Brabie, L. Bohlin Corrosion mechanism and kinetic behaviour of refractory materials in contact with CaO-Al₂O₃-MgO-SiO₂ slags // International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004. pp. 341 – 348.
20. J. Porier, M. Bouchetou Influence of iron oxides on corrosion of refractories used in steel making // Refractories applications transactions, Vol. 2, No. 3, November / December 2006. pp. 1 – 8.
21. W.E. Lee, S. Zhang Direct and indirect slag corrosion of oxide and oxide-c refractories // International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004. pp. 309 – 320.
22. R. J. Fruehan, L. J. Martonik The Rate of Reduction of MgO by Carbon // Metallurgical transactions, Vol. 7B, December 1976, pp. 537 – 542.
23. Zushu LI, Kusuhiko MUKAI and Zainan TAO. Reactions Between MgO-C Refractory, Molten Slag and Metal // ISIJ International, Vol. 40 (2000), Supplement, pp. 101-105.
24. W.E. Lee, S. Zhang Melt corrosion of oxide and oxide-carbon refractories // International Materials Reviews, 1999.- Vol. 44. №4. p. 77-114
25. S. Jansson A Study on the Influence of Steel, Slag or Gas on Refractory Reactions // Doctoral Thesis. Stockholm 2008.
26. Damhof F. Numerical-experimental analysis of thermal shock damage in refractory materials / F. Damhof // Corus Technology B.V., 2010. – P. 153.
27. Barthel, H. and Kaltner, E.: The Effect of Carbon in Carbon-Containing Magnesia Bricks on the Wear in Basic Oxygen Furnaces. Reprint 1th Int. Conf. Refract., Tokyo (1983), pp. 91-104.
28. Martino M. Refractory Lining for Oxygen Converters: Recent Experiences in this Field / M. Martino, M. Fenu, A. Anfosso // Proceedings of 5-th European Steelmaking Conference, 26-28 June, 2006, Aachen, Germany. – Dusseldorf: Steel Institute VDEH, 2006. – P. 229-233.

29. Fruehan R. J. The Rate of Reduction of MgO by Carbon / R.J. Fruehan, L.J. Martonik // Metallurgical transactions, Vol. 7B, December 1976. – pp. 537 – 542.

30. Wettability between molten slag and MgO–C refractories for slag splashing process / Yuan Z., Wu Y., Zhao H., Matsuura H., Tsukihashi F. // ISIJ International, Vol. 53 (2013), № 4, pp. 598-602

31. Ламм Р. Использование технологии 3-размерного лазерного сканирования в качестве технологического инструмента в конвертерном цехе / Р. Ламм, П. Винтьенс // Труды 6 конгресса сталеплавыльщиков. – 2002. – с. 97-102.

32. Гуденау Х.В. Методы исследования характера износа огнеупорных футеровок конвертеров / Х.В. Гуденау, Х. Нефе, Р. Хёффкен, А. Бааске, Р. Бертинг // Черные металлы. № 5. 1997. – С. 23-29.

33. Аксельрод Л. М., Лаптев А. П., Устинов В. А., Геращук Ю. Д. Повышение стойкости футеровки конвертеров: огнеупоры, технологические приемы // Металлы и литье Украины, 2009, №1-2, С.9-15.

34. Sheremet V.A. Experience in the use and comprehensive maintenance of converter refractory linings / V.A. Sheremet, A.V. Kekukh // Refractories and Industrial Ceramics, Vol. 47, No. 2, 2006.– pp. 75 – 77.

35. Очагова И.Г. Торкретирование в черной металлургии. / И.Г. Очагова // Новости черной металлургии за рубежом. Приложение №4. 2001. –С. 1-16.

36. Высококачественный быстротвердеющий материал для наварки футеровки кислородных конвертеров // Новости черной металлургии за рубежом. №1, 2001. – С.107-110.

37. Zhao Fengjun, Slag splashing for protection the converter lining // Shanghai jinshu - Shanghai Metals. 1999. V. 21. № 5. P. 40–44.

38. Повышение стойкости футеровки конвертеров путем ее ошлакования / Р. В. Старов, Г. Ф. Боровиков, Г. А. Шаповал и др. // Труды

Первого конгресса сталеплавателей. М.: ин-т “Черметинформация”. 1992. С. 99, 100.

39. Гудман Н. Вспенивание шлака в кислородных конвертерах // *Steel Times International*. 1996. № 4. Р. 3, 4.

40. Macauley D. Engineering developments lead to greater economy // *Ibid.* 1996. № 5. Р. 12–14.

41. Смирнов А.Н. Оценка условий образования гарнисажного слоя на рабочей поверхности футеровки конвертера / Смирнов А. Н., Шарандин К. Н., Сердюков А.А., Тонкушин А. Ф. // *Сталь*. – 2014. - №8. – С.52-56.

42. Schriefer J. Making a more reliable heat in the BOF // *New Steel*. 1996. № 5. Р. 48–52.

43. Messina C. J. Slag splashing in the BOF; World wide status, practices and results // *Iron and Steel Engineer*. 1996. № 5. Р. 17–19.

44. Greco L., McGowan A. Installation and Start-up of Slag Splashing at Algoma Steel Inc. // *Steelmaking Conference Proceedings*. 1997. Р. 97–100.

45. О возможности повышения стойкости футеровки сталеплавильных агрегатов / А.Н. Стоянов, Б.М. Бойченко, К.Г. Низяев, Е.В. Синегин // *Матеріали конференції «Металургія. 2019»*. – С. 322-323.

46. A. V. Mokrinskii, A. N. Lavrik, V. V. Sokolov, E. V. Protopopov & A. G. Chernyatevich Ways to increase endurance of the refractory lining in converters, *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 45, 2004. - pp. 408–411.

47. Разработка и внедрение комплекса мероприятий по повышению производства и качества выплавляемой стали в кислородно-конвертерных цехах / В.Ф. Рашников, А.А. Мордашов, С.М. Чумаков и др. // *Металлург*. 2000. № 7. С. 43, 44.

48. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкция агрегатов, рециркуляция материалов, экология: [учеб.] / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.

49. Demidov, K.N., Ovsyannikov, V.G., Shatilov, O.F. et al. Using Self-Degradable Magnesia Pellets in Slag Splashing Technology for Protection of the Converter Lining. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2005. vol. 46, - pp 157–158.

50. Выплавка стали в 370-тонных кислородных конвертерах с использованием шлакообразующих материалов, содержащих оксид магния / Р.С. Тахаутдинов, А.А. Степанова, А. В. Сарычев и др. // *Черные металлы («Stahl und Eisen»)*. 2002. Январь. С. 12–14.

51. Технология ошлакования футеровки кислородных конвертеров / В.А. Нечепоренко, Н. М. Омесь, Г. Ф. Боровиков и др. // *Теория и практика металлургии*. 1999. № 3. С. 22, 23.

52. Sian C., Wenyuan Y., Conglie Z. Slag Splashing for Bao Steel's 300 Metric Ton BOF and Crystallographic Structure of its Slag // *Iron and Steelmaker*. 2000. № 7. P. 39–41.

53. Liu, L., Kuangdi, X. (2023). Slag Splashing Technology. In: Xu, K. (eds) *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_993-1

54. Сущенко А.В. Спосіб нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера / А.В. Сущенко // Пат. 101564 UA, МПК C21C5/44. Заявник і патентовласник ПАТ «МК «Азовсталь» - № а201115029; заяв. 19.12.2011; опубл. 10.04.2013, бюл. № 7/2013.

55. Кравченко В.М. Спосіб нанесення шлакового гарнісажу на вогнетривку футерівку конвертера / С.В. Куберський, С.Б. Ессельбах, Д.Ю. Кузнецов, Д.Б. Васильєв, Д.Л. Літвінов // Пат. 25617 UA, МПК C21C 5/44. Заявник і патентовласник Донбаський держ. техн. ун-т. – № u200704553; заяв. 24.04.2007; опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.

56. Протопопов Е. В. Исследование особенностей формирования шлакового гарнисажа на футеровку кислородных конвертеров / Е.В. Протопопов, Р.С. Айзатулов, А.Н. Лаврик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. № 7. 2002.– С. 279-282.

57. A. V. Amelin, E. V. Protopopov, A. N. Kalinogorskii, and S. V. Feiler/ Formation of magnesia-slag coating on the lining of large converters, *Steel in Translation*, 44, No. 7, 2014. - pp. 513–516.
58. Суворов С.А. Модификатор магнезиального состава для конвертерного шлака и способ модифицирования конвертерного шлака / С.А. Суворов, В.В. Козлов // № 2404262 С1. От 02.03.2009.
59. Chen W. Relationship between Slag Splashing in Converter and Solid Property / W. Chen, K.J. Peaslee // *Iron Steel Int.* №. 1, 2001.– pp. 1-6.
60. Kenneth C. The Influence of Structure on the Physico-chemical Properties of Slags // *ISIJ International*, Vol. 33, №1, 1993. pp. 148-155.
61. Babenko, A.A., Krivykh, L.Yu., Murkhanov, N.V., et al. Phase composition of magnesia converter slags and improved wear resistance of the lining's slag coating. *Steel in Translation*, vol. 42, No. 2, 2012. - pp. 114–117
62. Chigwedu, C., and Kempken, J., Using Slag Splashing Technology for Low Gunning Rates and Even Lower Refractory Costs, *Stahl und Eisen*, 2006, 126, No. 2, pp. 19–26.
63. Dutlov S.A. Improving the lifetime of the converter lining by saturation of the initial slag with magnesium oxide of ferrite-calcium complex flux (FCM) / S.A. Dutlov, E.D. Babaev. // *METAL 2001*, Ostrava, Czech Republic, 2001.-pp.5-10.
64. Obst K.; On the Dissolution of Magnesium Oxide in the Slag During the LD Process/ K. Obst, E. Schürmann, G. Mahn, W. Münchberg, D. Nolle. // *Stahl und Eisen*, 100, No. 20, 1980.–pp. 1194-1200.
65. Eisenhüttenleute V.D. Slag Atlas (2nd ed.) / V.D. Eisenhüttenleute // Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 1995.
66. Смирнов А.Н. Спосіб підготовки шлаку для нанесення гарнісажного покриття на футерівку конвертера / А.Н. Смирнов, А.Ф. Тонкушин, А.А. Сердюков, К.Н. Шарандин // Патент України № а 201206727 от 10.09.2012 Бюл.№17. 5 с.

67. Смирнов А.Н. Шлакоутворяющий брикет для металлургического производства / А.Н. Смирнов, А.Ф. Тонкушин, А.А. Сердюков, К.Н. Шарандин // Патент Украины № а 201204761 от 25.07.2012 Бюл.№17. 6 с.
68. Кизилова Н.М. Реология сред / Н.М. Кизилова // - М.: Наука, 1965. - 224 с.
69. Урьев Н.Б. Текучесть суспензий и порошков / Н.Б. Урьев, А.А. Потанин. // - М.: Химия, 1992. - 247 с.
70. Smirnov O. Evolution conditions of final BOF slag on the efficiency of slag splashing technology / O. Smirnov, A. Tonkushin, K. Sharandin // 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking. Dresden, Germany, 1-3 october. 2012. – pp. 1216-1225.
71. Шарандин К.Н. Исследование влияния конечного конвертерного шлака на эффективность технологии нанесения гарнисажа / К.Н. Шарандин, А.Ф. Тонкушин, А.А. Сердюков // Металл и литье Украины, №10. 2012.-С.15-18.
72. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели. – Новосибирск: Наука, 1986.
73. Внепечная обработка стали / В.А. Кудрин. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1983. -. Т.14: Итоги науки и техники.- 1983.- С.150–204.
74. Теория подобия – моделирования / [В.А. Венников] . – М.: Высшая школа, 1966. - 487с.
75. Smirnov A. Optimization Argon-injection Process Parameters for Ladle Treatment Steel / A.Smirnov, S.Eronko, I.Kovalenko, R.Giessen // Proceedings 5-th European Steelmaking Conference, 26-28 June, 2006, Aachen, Germany. – Steel Institute VDEh: 2006. - P.280-286
76. Shiv Kumar CHOUDHARY and Satish Kumar AJMANI «Evaluation of Bottom Stirring System in BOF Steelmaking Vessel Using Cold Model Study and Thermodynamic Analysis» // ISIJ International, Vol. 46 (2006), No. 8, pp. 1171–1176.

77. Zhang-Lei, Shen Ming-Gang, Zhang Zhen-Shan, Kang Shu-Mei “Hydraulic model experiment of converter coherent jet oxygen lance” // Asia Steel 2009// May 24 – 27,2009, Busan, Korea.

78. Singh V. Modeling of bottom stirring to improve mixing in BOF / V. Singh, S.N Lenka, S.K. Ajmani // Asia Steel 2009. May 24 – 27. 2009. Busan, Korea.

79. Choudhary S. K. Evaluation of Bottom Stirring System in BOF Steelmaking Vessel Using Cold Model Study and Thermodynamic Analysis / S.K. Choudhary, S.K. Ajmani. // ISIJ International, Vol. 46, No. 8, 2006. - pp.1171-1176.

80. Mazumdar D. The Physical and Mathematical Modelling of Gas Stirred Ladle System/ D. Mazumdar, R.I.L. Guthrie // ISIJ International, 1995. Vol.35. No1. – P.1-20.

81. Смирнов А.Н. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 1/ А.Н.Смирнов, Е.В.Ошовская, И.Н.Салмаш и др. // Процессы литья. 2008. №4. – С.41-48.

82. Wichterle K. Modeling of gas bubble breakup in liquid steel / K. Wichterle // 16th International Congress of Chemical and process Engineering. 22-26 August 2004, Prague. – Prague, 2004. – P.963

83. Физическое моделирование процессов внепечной обработки и разлива стали / С.П. Еронько, С.В. Быковских. – Київ: Техніка, 1998. - 135с.

84. Mazumdar D. Modelling criteria for flow simulation in gas stirred ladles: experimental study / D. Mazumdar, H.B. Kim, R.I.L. Guthrie // Ironmaking and Steelmaking. 2000. Vol.27. No.4. - P.302-309.

85. M. Luomala, E. Vitonen, P. Mure, T. Sivola, T. Fabrikas and J. Härkki: Steel Res., 2000, vol. 73, pp. 9-14.

86. A. Garg and K. Peaselee: Proc. 80th Steelmaking Conf., ISS/AIME, Warrendale, PA, 1997, pp. 87-96.

87. Mazumdar D., Evans J.: Modeling of steelmaking processes, 1 ed., p. 493, CRC Press, 2009.
88. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер – М.: Мир, 1990. – Т.1. – 384 с. – Т.2. – С. 385-728.
89. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей / К. Флетчер. – М.: Мир, 1990. – Т.1. – 504 с. – Т.2. – 552 с.
90. Белоцерковский О.М. Вычислительный эксперимент: прямое численное моделирование сложных течений газовой динамики на основе уравнений Эйлера, Навье-Стокса и Больцмана / О.М. Белоцерковский – М.: Мир, 1981. – С. 348-398.
91. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк – М.: Машиностроение. – 2004. – 514 с.
92. Ferziger J. H. Computational methods for fluid dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric // Springer Verlag. – 1999. – P. 21-23.
93. Anderson J. D. Computational fluid dynamics: the basics with applications / J. D. Anderson // McGraw Hill. – 1995. – 398 P.
- Date A. W. Introduction to computational fluid dynamics / A. W. Date // Cambridge University Press. – 2005 – P. 1-13.
94. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. // – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
95. Suvorov S.A. Projecting of skull formation on the surface of converter lining and optimization of modifier cost. / S.A. Suvorov, V.V. Kozlov. // New refractories. №1, 2011. –pp. 35-37.
96. Шарандин К.Н. Исследование влияния конечного конвертерного шлака на эффективность технологии нанесения гарнисажа / К.Н. Шарандин, А.Ф. Тонкушин, А.А. Сердюков // Металл и литье Украины, №10. 2012. –С.15-18.
97. Смирнов А.Н. Моделирование процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / Смирнов А.Н., Шарандин К.Н., Лизун

А.Ю. // Донбас 2020: «Перспективи розвитку очима молодих вчених». Донецк. – 2012. С. – 184 – 189.

98. Smirnov O. Evolution conditions of final BOF slag on the efficiency of slag splashing technology / O. Smirnov, A. Tonkushin, K. Sharandin // 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking. Dresden, Germany, 1-3 october. 2012. – pp. 1216-1225.

99. Крутоголов В.Д. Ротационные вискозиметры / В.Д. Крутоголов, М.В. Кулаков.- М.: Машиностроение, 1984.- 112 с.

100. Гладкий В.Н. Вискозиметрия металлургических расплавов. М.: Металлургия, - 1989. – 164 с.

101. Дерягин Б. В., Кротова Н. А., Смилга В. П. Адгезия твердых тел. — М.: Наука, 1973.

102. Фрейдин А. С. Свойства и расчет адгезионных соединений. — М.: Химия, 1990.

103. Немсадзе Г. Г. Совершенствование технологии горячего ремонта футеровки конвертера с использованием разработанной магнезиальной массы марки «GIR-RB-X» / Немсадзе Г. Г., Смирнов А.Н., Джоджуа Р.А., Шарандин К.Н., Рябый Д.В. // Металл и литье Украины - 2019. - № 5-6 – С. 56-63.

104. Шарандин К.Н. Совершенствование технологии горячего ремонта футеровки конвертера с использованием разработанной магнезиальной массы марки «GIR-RB-X» компании ООО «ГИР-Инжиниринг» / Шарандин К.Н., Немсадзе Г. Г., Смирнов А.Н., Джоджуа Р.А., Рябый Д.В. // Новые огнеупоры – 2019. №4 – С.13-20

105. Смирнов А.Н. Роторная печь для сравнительной оценки эрозионной стойкости огнеупорных изделий тепловых агрегатов / Смирнов А. Н., Немсадзе Г. Г., Шарандин К. Н., Тонкушин А. Ф., Рябый Д. В., Лизун А. Ю. // Новые огнеупоры – 2018. - №4 – С. 145-148.

106. Смирнов А.Н. Физическое моделирование струй газа кислородной фурмы / Смирнов А.Н., Лебедев Е.Н., Шарандин К.Н., Лизун

А.Ю., Ухин В.Е. // Научные труды Донецкого Национального Технического Университета, 2011, серия металлургия, выпуск 13 (194).

107. Смирнов А.Н. Физическое моделирование взаимодействия встречных газовых струй при комбинированной продувке в конвертере / Смирнов А.Н., Лебедев Е.Н., Шарандин К.Н., Лизун А.Ю., Ухин В.Е. // Сборник Инновационные способы внепечной обработки стали и чугуна. Донецк, 2011- С. 176-181.

108. Смирнов А.Н. Физическое моделирование металла в конвертере с комбинированной продувкой / Смирнов А.Н., Лебедев Е.Н., Шарандин К.Н. // Металлургия и горнорудная промышленность,– 2010.– С. 44-46.

109. Смирнов А.Н. Физическое моделирование металла в конвертере с комбинированной продувкой. / Смирнов А.Н., Лебедев Е.Н., Шарандин К.Н. // Известие вузов. Чёрная металлургия,– 2010.– С. 23-27.

110. Шарандин К.Н. Гидродинамика ванны холодной модели конвертера при комбинированной продувке / Шарандин К.Н. Баранник А.В.// Металлургия и обработка металлов. № 12. Донецк.– 2009. – С. 17–19.

111. Messina C. J. Slag splashing in the BOF world wide status, practices and results / C. J. Messina // Iron and Steel Engineer. № 5. 1996. – pp. 17-19.

112. Смирнов А.Н. Моделирование процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / Смирнов А.Н., Шарандин К.Н., Лизун А.Ю. // Донбас 2020: «Перспективи розвитку очима молодих вчених». Донецк. – 2012. С. – 184 – 189.

113. Smirnov O. Evolution conditions of final BOF slag on the efficiency of slag splashing technology / O. Smirnov, A. Tonkushin, K. Sharandin // 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking. Dresden, Germany, 1-3 october. 2012. – pp. 1216-1225.

114. Суворов С.А. Модификатор магниезиального состава для конвертерного шлака и способ модифицирования конвертерного шлака / С.А. Суворов, В.В. Козлов // № 2404262 С1. От 02.03.2009.

115. Динамика теплового состояния футеровки и шлакового гарнисажа при раздувке конечного шлака в кислородном конвертере / Р.В. Лисняк, И.С. Долгополов, Е.Н. Сигарев [и др.] // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. – Випуск 4. – Дніпропетровськ: Нова ідеалогія, 2012. - С. 15-19.

116. Смирнов А.Н. Моделирование элементов процесса нанесения гарнисажного покрытия на рабочий слой футеровки конвертера / А.Н. Смирнов, К.Н. Шарандин, А.Ю. Лизун / Известие вузов. Чёрная металлургия, – 2011. №11. – С. 43-48.

117. Wohrmeyer C., Elorza-Ricart E., Jolly R., Guichard S., Bruggmann C., Sax A. The impact of synthetic slag on steel ladle refractory life time // 51st International Colloquium on Refractories – Refractories for Metallurgy. Aachen - 15-16 october 2008. P. 80-83.

118. Физико-химические методы исследования металлургических процессов / Филиппов С.И., Арсентьев П.П., Яковлев В.В. и др. М.: Металлургия, - 1968.- 552 с.

119. Падерин С.Н. Теория и расчеты металлургических систем и процессов / С.Н. Падерин, В.В. Филиппов // - М.: МИССИС, 2002. – 334 с.

120. Kenneth C. The Influence of Structure on the Physico-chemical Properties of Slags // ISIJ International, Vol. 33, №1, 1993. pp. 148-155.

121. Романенко А.Г. Металлургические шлаки / А.Г. Романенко // - М.: Металлургия, 1977. - 190 с.

122. Кизилова Н.М. Реология сред / Н.М. Кизилова // - М.: Наука, 1965. - 224 с.

123. Урьев Н.Б. Текучесть суспензий и порошков / Н.Б. Урьев, А.А. Потанин. // - М.: Химия, 1992. - 247 с.

124. Касьян Г.И. Возможность повышения стойкости футеровки сталеразливочных ковшей при использовании магнезиальных шлакообразующих добавок / Г.И. Касьян, А.Я. Минц // Металл и литье Украины. – 2009. - №1-2. – С. 23-29.

125. Dutlov S.A. Improving the lifetime of the converter lining by saturation of the initial slag with magnesium oxide of ferrite-calcium complex flux (FCM) / S.A. Dutlov, E.D. Babaev. // METAL 2001, Ostrava, Czech Republic, 2001.-pp.5-10.

126. Obst K.; On the Dissolution of Magnesium Oxide in the Slag During the LD Process/ K. Obst, E. Schürmann, G. Mahn, W. Münchberg, D. Nolle. // Stahl und Eisen, 100, No. 20, 1980.–pp. 1194-1200.

127. Eisenhuttenleute V.D. Slag Atlas (2nd ed.) / V.D. Eisenhuttenleute // Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 1995.

128. Смирнов А.Н. Шлакообразующий брикет для металлургического производства / А.Н. Смирнов, А.Ф. Тонкушин, А.А. Сердюков, К.Н. Шарандин // Патент Украины №99698. МПК Оpubл. 10.09.2012. Бюл.№17.

129. Шарандин К.Н. Технология раздувки конечного шлака азотом в большегрузных конвертерах с использованием магниального модификатора // Металл и литье Украины. - 2018. - № 5–6. С. 19–26.

130. Nemsadze G. Evolution conditions of end BOF slag on the effectively slag splash-ing technology / Nemsadze G., Smirnov A., Sharandin K. // Proceedings of International Colloquium on Refractories. Eurogress, Aachen, Germany. September 26-27, 2018.

131. Nemsadze G. Converter layer hot repair process using the «GIR-RB-X» magnesium mass developed by the «GIR-ENGINEERING» LLC / Nemsadze G., Smirnov A., Dzodzhua R, Sharandin K. // Proceedings of International Colloquium on Refractories. Eurogress, Aachen, Germany. September 25-26, 2019.

132. Nemsadze G. Development of integrated methods for hot repair of converter lining based on Magnesian materials of “GIR-Refractories” / Nemsadze G., Sharandin K., Smirnov O., Dzhodzhua R., Ryaby D., Goryuk M. // UNITECR 2023, Frankfurt, Germany, September 26-29, 2023.

ДОВІДКА

Про використання результатів дисертаційної роботи Шарандіна Кирила Миколайовича

Дійсним підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Шарандіна К.М., (Патент України на винахід №99248) а саме наявність у магнезіальному брикеті важкорозчинних компонентів у кількості 60 - 65% (мас.), з яких щонайменше 80%, мають фракцію 2-6 мм, при цьому легкорозчинний, дрібнодисперсний, магнезійний компонент, взятий у кількості 40 - 45% (мас.) були взяті для серійного виробництва матеріалів.

Так, спільно ТОВ «ГІР-ІНТЕРНЕСІНЛ», з компанією ПрАТ «Брикет» і ДВНЗ «ДонНТУ» були розроблені та затверджені зміни №10 ТУ У 37.1-001 76526-001: 2006 (додаток №1) уніфікуючі маркування і стандартизуючі основні фізико-хімічні параметри флюсу марки «БК-4». Вироблено 57,294 тн магнезіальних брикетів марки «БК-4» на основі вітчизняної сировини для ПАТ «АМК».

Реалізація технології по модифікації кінцевого шлаку модифікатором марки «БК-4» в умовах КЦ ПАТ «АМК» для роздування азотом відповідно до розроблених «міні-регламентів» забезпечило зниження питомої витрати магнезіальних матеріалів на 1,17 кг/т сталі, що відповідає зниженню питомих витрат на 0,24 USD/т сталі (у цінах 2013). Оціночний економічний ефект від впровадження технології для підприємства склав 6 722 300 грн./рік.

Генеральний директор
ТОВ «ГІР-ІНТЕРНЕСІНЛ»



О.В. Поляков

ДОВІДКА

Про використання результатів дисертаційної роботи Шарандіна Кирила Миколайовича

Дійсним підтверджуємо, що на підставі отриманих Шарандіним К.М. в ході дисертаційної роботи даних і доступної вітчизняної сировинної бази, в промислову розробку прийняті дві рецептури саморозтічної, підварювальної, магнезіальної маси марок «GIR-RB-X-DMK», «GIR-RB-X».

Так, на підставі експериментальних результатів і підбраного промислового шихтування в період з 01.05 по 10.05.2018 р. на виробничому майданчику компанії ТОВ «ГІР-Інжиніринг» в умовах ПрАТ «КрОЗ» виготовлені дослідні партії магнезіальної підварювальної маси марок «GIR-RB-X» та «GIR-RB-X-DMK» у загальній кількості 10 тн. Протягом червня місяця 2018 року в умовах ПАТ «ДМК» проведені випробування підварювального маси марки «GIR-RB-X-DMK» у кількості 10 тн на конвертері №1 і №2 ємністю 250 тн.

На підставі випробувань отримані наступні результати:

- підварювальна маса марки «GIR-RB-X-DMK» при попаданні на футерівку конвертера займалась (загорялась), після витримування спікалась;
- стійкість підварювальної маси «GIR-RB-X-DMK» становила до 20 плавок, що відповідає стійкості базових постачальників;
- питома витрата підварювальної маси становила 0,089 кг/т, при нормативі підприємства – 0,092 кг/т, що відповідає зниженню питомих витрат на 0,01 USD/тн (у цінах 2018 р.).
- маса марки «GIR-RB-X-DMK» рекомендована до використання в умовах ПАТ «ДМК» на постійній основі.

Оціночний економічний ефект від впровадження технології для підприємства складав 1 022 300 грн./рік.

Генеральний директор
ТОВ «ГІР-ІНТЕРНЕСНЛ»



О.В. Поляков