

Н.М. Арипова<sup>1</sup>, Е.В. Приходько<sup>1</sup>, А.Е. Карманов<sup>1</sup>, Б. Онгар<sup>2,3</sup>, А.Т. Егзекова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Toraigyrov University, Павлодар, Казахстан

<sup>2</sup>Satbayev University, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup> Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан

E-mail: ongar\_bulbul@mail.ru

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА СТОЙКОСТЬ ФУТЕРОВОК РАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

**Аннотация.** В статье производится анализ эксплуатационных факторов, оказывающих влияние на продолжительность рабочей кампании футеровок разливочных ковшей ферросплавного производства. Показано, что важнейшим фактором, определяющим стойкость футеровки, являются термические напряжения, возникающие в футеровке при переменных тепловых режимах. Кроме этого, в значительной степени на стойкость оказывает влияние воздействие агрессивных шлаков. При этом разрушающее воздействие шлаков ограничивается верхними рядами футеровки. Образование настыли на внутренней поверхности футеровки оказывает двойное воздействие на стойкость. С одной стороны, настыль является защитным слоем, предотвращающим разрушение. С другой стороны, настыль не только снижает технико-экономические показатели работы ковша, но и её удаление при промежуточных ремонтах приводит к частичному разрушению футеровки.

**Ключевые слова.** Стойкость футеровки, разливочные ковши, эксплуатационные факторы, термические напряжения, шамотный кирпич.

### Введение.

Огнеупоры – вид промышленной функциональной продукции, способной противостоять воздействию высоких температур и выдерживать механические, термические, химические, статистические, динамические и другие нагрузки. Огнеупоры обладают физическим ресурсом, который определяется физико-химическим решением – правильным выбором химического и фазового состава, пространственным распределением их в объеме материала, что реализуется через научно-обоснованные параметры технологических операций. Физический ресурс футеровки зависит от физико-технических свойств огнеупоров, дифференцированного подбора огнеупоров по элементам кладки футеровки с учетом физико-химических, температурных, термомеханических и др. воздействия. Технический результат стойкости огнеупорной конструкции основывается на опыте промышленной безаварийной эксплуатации футеровки, соблюдение металлургических, регламентное выполнение организационно-технических мероприятий, позволяют добиться более высокого результата, за счет эксплуатации огнеупорных изделий в кладке до остаточного размера 40-50 % или менее от начального, при нормативном соблюдении механической устойчивости [1].

Металлургия занимает особую роль в промышленности Казахстана. В частности, её представляют ферросплавные заводы в Аксу и Актюбинске. Они работают на хромитах Хромтау, выпуская феррохром и привозных с Урала кварцитах, выпуская ферросилиций. Заводы построены в городах с наличием крупных тепловых электростанций ведь для производства ферросплавов необходимо много энергии.

Согласно статистическим данным за последние три года вышеуказанными предприятиями черной металлургии страны выплавлено 9320000 млн. тонн ферросплавов рисунок 1 [2].

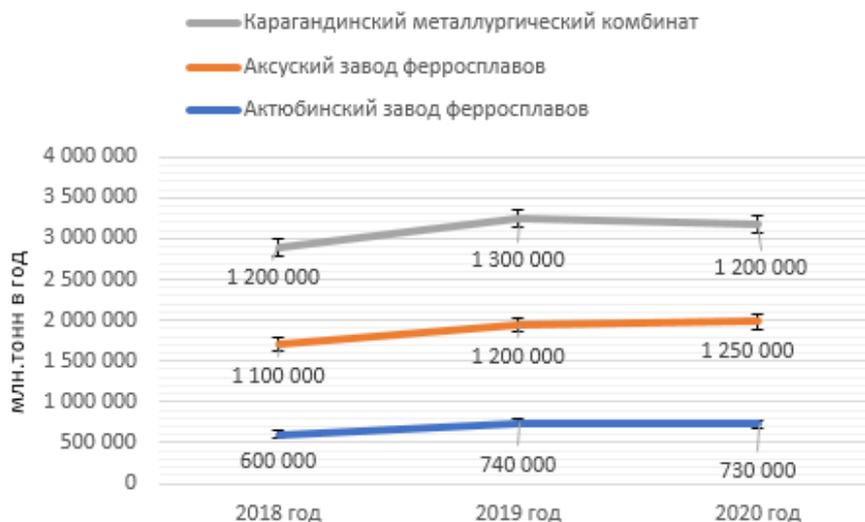


Рисунок 1 – Статистика по выплавке ферросплавов за 2018-2020 гг.

Стремление к увеличению сроков эксплуатации футеровок, особенно до рекордных, за счет увеличения объемов ремонтно-восстановительных работ не всегда оправдано и должно подвергаться критическому анализу, т.к. влечет излишние затраты на ремонтные материалы, увеличивает технологические простои, идет в ущерб качеству целевой продукции и объемов ее выпуска.

В связи с усилением роли экономических факторов в промышленном производстве особое внимание должно уделяться решению научно-технических проблем, обеспечивающих радикальное снижение энергетических, тепловых потерь и эффективное использование материальных, сырьевых и др. ресурсов.

Первоначальным этапом рационализации тепловой работы футеровки высокотемпературных агрегатов является анализ причин её разрушения. Несмотря на большое количество видов агрегатов, и применяемых технологий, выделяют основные причины разрушения футеровки.

#### Материалы и методы.

Шамотный кирпич является более дешевым материалом и физико-химическим свойствам вполне может устоять более дорогим огнеупорам. Сегодня изготавливать шамотный кирпич предлагают из подручных материалов для предприятий. Так специалисты [3] предлагают изготовление шамотных огнеупорных кирпичей низкой и высокой прочности из бурой летучей золы, а специалисты Актюбинском завода ферросплавов запустили пилотную программу по утилизации отходов. Пыль, попавшая в газоплавильные установки, вовремя плавки ферросплавов, использовать в качестве добавки для изготовления шамотных кирпичей.

Проводя анализ стойкости футеровки разливочных ковшей ферросплавного производства на основании заводских данных, можно сказать, что стойкость футеровки ковшей, изготовленных из обычных шамотных кирпичей, 10-12 плавов (наливов). Футеровка изнашивается неравномерно, наибольший износ наблюдается в том месте, куда падает струя металла и в районе шлакового пояса. В тех случаях, когда металл в

ковше подвергается различным методам обработки, включая методы, связанные с энергичным перемешиванием металла, стойкость шамотовой футеровки резко снижается; в этих случаях футеровка ковша делается из высокоогнеупорных материалов.

Для футеровки разливочных ковшей используются шамотные уплотненные (открытая пористость 18 и 19 %) и плотные (открытая пористость до 16 %) изделия марки КШУ-32, КШУ-37, КШУ-39, КШП-37 и КШП-39. Цифра в обозначении марки соответствует минимальному процентному содержанию в огнеупоре окиси алюминия. На футеровку 40 тонн разливочного ковша уходит примерно 1,2 тонн шамотного кирпича.

Основные показатели шамотных изделий, регламентируемые ГОСТ 5341-2016, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные показатели шамотных изделий

Характеристика	Ед. измерения	Значение
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	1700...1900
Прочность	Марка	75...250
Показатель огнестойкости	Температурный предел	1100...1800
Теплоёмкость	кДж/кг·С	1,04
Теплопроводность	Вт/м·С	0,6
Морозостойкость	Циклов, марка	15...50
Коэффициент линейного расширения	10 <sup>-6</sup> 1/°С	5,3

Литературный обзор показывает, что снижение срока службы футеровок высокотемпературных агрегатов происходит в результате воздействия следующих факторов.

Во-первых, высоких температур и значительных перепадов температур при эксплуатации футеровки. Высокие температуры приводят к возможности расплавления огнеупорного материала и растворения его в расплаве. Значительные перепады температур возникают в основном при несоблюдении разработанных температурных режимов нагрева и охлаждения агрегата. Резкий перепад температур приводит к возникновению значительных температурных напряжений, способствующих разрушению футеровки, что вполне естественно приводит к снижению срока службы и большим затратам [4-6].

Во время выпуска плавки, температура иногда может достигать высоких значений (более 1750 °С). Температура рабочего слоя футеровки ковша перед выпуском металла, как правило, находится в диапазоне от 800 до 1200 °С. Разница температур наливаемого металла и подогретой до 800 °С футеровки разливочного ковша может составлять 700...900 °С. Нередко охлаждение ковша ускоряют обдувкой воздухом и даже поливом водой, что создает весьма жесткие условия службы огнеупоров. Всё это вызывает напряжение в рабочем слое футеровки, которое может привести к образованию трещин.

При этом литературные источники отмечают, что эксплуатировать агрегаты, футерованные шамотными огнеупорами, можно только при постоянно поддерживаемых высоких температурах [7]. Таким образом переменные температурные режимы при использовании шамотных огнеупоров ШКУ отрицательно влияют на продолжительность рабочей кампании агрегатов и термоподготовке футеровки перед сливом расплава и в межплавочный период необходимо уделить особое внимание.

Во-вторых, химического взаимодействия с агрессивными средами технологического материала, который разъедает огнеупорный материал [8, 9].

Изменение в сортаменте выплавляемого металла, технологии плавки, внепечной обработки и разливки металла зачастую определяют необходимость повышения температуры металла на сливе. С ростом температуры повышается жидкоподвижность шлака, ускоряются процессы окисления углерода огнеупора, взаимодействия компонентов шлака с оксидной составляющей огнеупора, и стойкость футеровки уменьшается.

Таким образом, воздействие агрессивного шлака оказывает влияние лишь локально (как правило, на 4-5 рядов огнеупорных материалов).

Сильные напряжения возникают во время удаления изношенного рабочего слоя футеровки механическим оборудованием (рисунок 2). В ходе этой операции, осуществляемой в горячих условиях, имеет место первый тепловой удар, а затем механическое воздействие на арматурный слой футеровки.

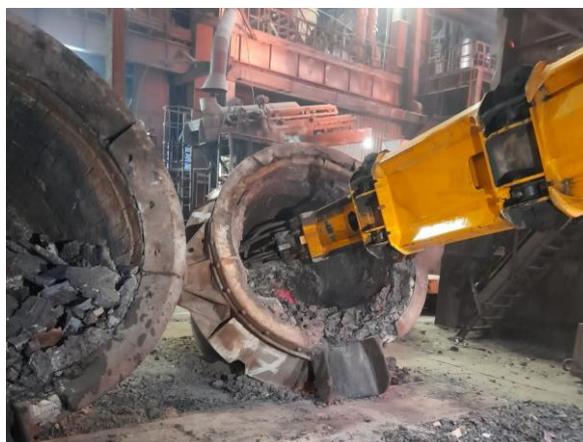


Рисунок 2 – Процесс удаления настывли

### Результаты.

Для оценки температурных полей футеровки разливочного ковша было проведено тепловизионное обследование. На рисунке 3 показана термограмма поверхности ковша после слива расплава. Высокие температуры наружной поверхности соответствуют зоне выпуска металла и зоне падения струи при сливе расплава в ковш (рисунок 3). Температурное поле нижней части ковша равномерное и имеет наименьшую температуру по внешней поверхности. Температурные поля на уровне середины высоты ковша равномерны и имеют максимальные значения температуры.



Рисунок 3 – Общий вид температурных полей поверхности разливочного ковша

На рисунке 4 можно видеть «пятно» высоких температур в области падения струи при сливе расплава в ковш.



Рисунок 4 – Температурное поле поверхности ковша с зоной высоких температур падения струи при сливе расплава в ковш

Термограмма, приведённая на рисунке 5 показывает неравномерность температурного поля внутренней поверхности футеровки в процессе остывания ковша. Неравномерность температурного поля объясняется различной толщиной футеровки по её высоте. В местах разрушения кладки и меньшей толщины футеровки температура ниже – футеровка остывает быстрее, чем в местах с большей толщиной футеровки.

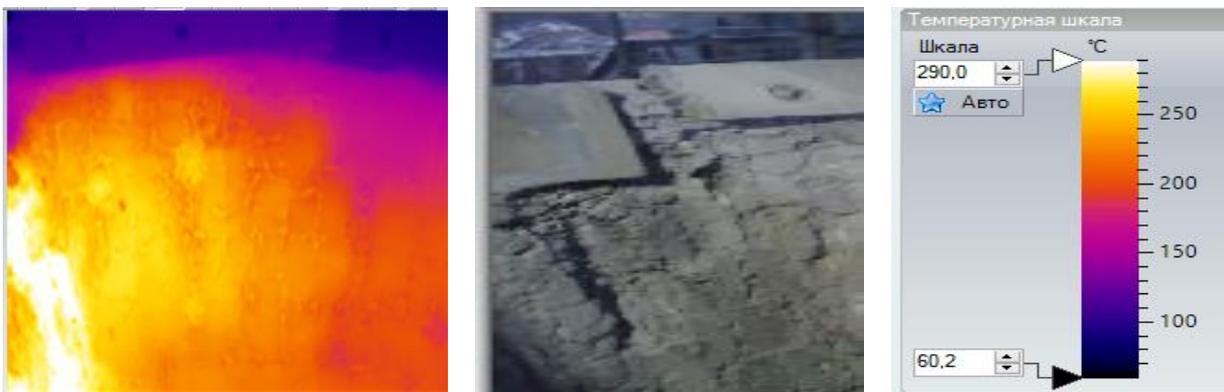


Рисунок 5 – Температурное поле внутренней поверхности футеровки в процессе остывания ковша

Напряжения, соответствующие данным неравномерным температурным полям, часто превышают допусаемые, что говорит о возможности возникновения и развития трещин и сколов в футеровке. Это является в большинстве случаев фактором, определяющим ресурс футеровки и разливочного ковша в целом.

Высокие температурные режимы имеют еще один аспект на разрушение футеровки: высокая температура приводит к возможности расплавления огнеупорного материала и растворения его в расплаве.

Результатом воздействия шлаков на футеровку является как снижение толщины футеровки (за счёт растворения огнеупоров в расплаве), так и изменение свойств огнеупорного материала в зоне контакта с расплавом. Свойства огнеупоров изменяются вследствие его пропитки расплавом, а также из-за химических изменений при воздействии высоких температур.

Снижение толщины футеровки вследствие только растворения огнеупора оценить достаточно сложно, так как этот процесс всегда сопровождается снижением толщины огнеупора вследствие его разрушения при воздействии температурных напряжений. В рассматриваемом нами случае, толщина рабочего слоя футеровки составляет 80 мм, критической толщиной считается 50 мм, что составляет 62,5 % первоначальной. Проведённые измерения показывают, что в разливочном ковше, стойкость которого составила 8 плавов при первоначальной толщине рабочего слоя в 80 мм, он был выведен в ремонт при минимальной толщине рабочего слоя 53 мм.

При анализе состояния огнеупоров из рабочего слой средней по высоте части ковша, можно сделать следующие выводы. Изменённая зона огнеупора определяется визуально за счёт изменения цвета, при этом средняя толщина пропитки огнеупоров составляет 20-30 мм (рисунок 6). Пропитки огнеупора расплавом по глубине не наблюдается, лишь на поверхности имеются частицы сплава. Структура пропитанной части плотная и прочная.



а)

б)

Рисунок 6 – Изменённая зона огнеупоров рабочего слоя

На стойкость футеровки в значительной мере влияет пребывание расплава в ковше при высоких температурах и в условиях интенсивного его перемешивания в ковше. Межплавочные простои приводят к глубокому выгоранию углерода из огнеупора при высокой температуре футеровки. При этом остывание футеровки может привести образованию трещин и сколов на её рабочей поверхности. Время воздействия рассматриваемых выше факторов определяется, в основном, продолжительностью пребывания металла в ковше, которое составляет от 150 до 300 минут.

Объяснением отсутствия пропитки огнеупоров расплавом по его глубине является образование на внутренней поверхности футеровки настыли. Образовавшаяся настыль предотвращает дальнейший контакт расплава с огнеупорами футеровки. Толщина образующейся настыли может достигать до 90 мм (рисунок 7).



Рисунок 7 – Настыль на внутренней поверхности футеровки

Образование настывли на поверхности футеровки в ряде моментов положительно сказывается на стойкости футеровки. Так, слой настывли снижает как температурное, так и химическое воздействие на футеровку расплава. Кроме того, охлаждение футеровки во время межплавочного простоя идёт медленнее. Но, образование настывли – негативное явление, вызванное нарушением технологического режима, и удаление настывли с поверхности огнеупоров при промежуточных ремонтах в значительной степени отрицательно влияет на стойкость кладки в целом.

Кроме этого, образование настывли снижает объём ковша и, следовательно, его производительность. Специалистами Аксуского завода ферросплавов было проведено исследование по определению зависимости количества кристаллизующегося на стенке ковша козлового металла от длительности нахождения расплава в ковше (рисунок 8).

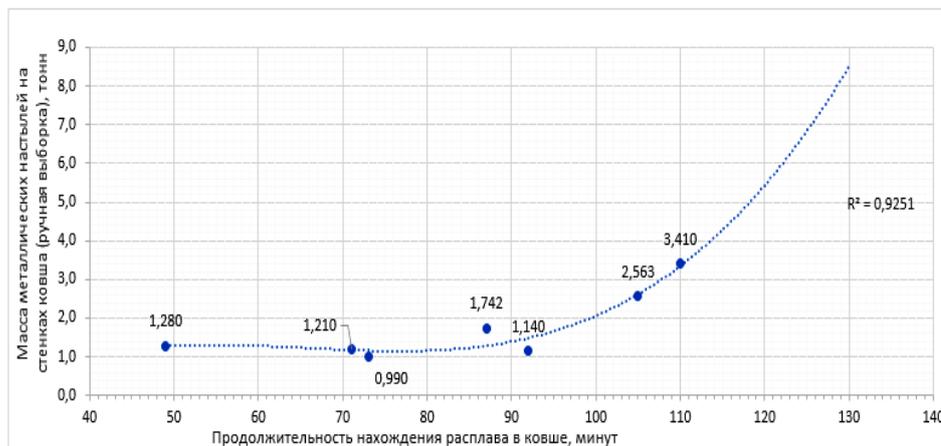


Рисунок 8 – Зависимость образования металлических настывли в ковше от продолжительности нахождения расплава в ковше

Как видно на графике зависимость кристаллизации козлового металла на стенке ковша имеет нелинейный характер, и начинает проявляться при выдержке расплава в ковше более 80 минут. Также, видно, что процесс кристаллизации заметно ускоряется при выдержке расплава в ковше более 100 минут, однако какова скорость кристаллизации настывли в ковше при выдержке расплава в ковше свыше 120 минут без проведения экспериментов достоверно сказать нельзя.

### Обсуждение.

Эксперимент показал, что скорость образования настывли на стенках ковша зависит от многих факторов: характера выпуска, количества шлака, продолжительности простоя ковша и других параметров, не фиксировавшихся во время эксперимента. Также, в ходе эксперимента выявлена большая вариативность образования настывли: так, экспериментальный выпуск №1, исключенный из графика, показал максимальную скорость образования 40 кг/мин при выдержке расплава в ковше равной 68 минутам. Скорее всего, это обусловлено затяжным выпуском (36 минут). Минимальная же скорость образования настывлей была показана на выпуске №5, и составила 12 кг/мин.

### Заключение.

Снижение удельных затрат на огнеупоры на тонну стали и сегодня, и в перспективе останется важнейшей задачей, стоящей перед металлургическим производством. Анализ влияния факторов эксплуатации разливочных ковшей ферросплавного производства на стойкость футеровки показал, что в большей степени стойкость определяется температурными режимами футеровки. Отсутствие системы

подогрева ковшей перед сливом расплава, интенсивное охлаждение футеровки (в ряде случаев с применением воды) определяют стойкость футеровки на уровне 10 наливов.

Проблема шлакового разъедания футеровки в меньшей степени актуальна. Это обосновывается, во-первых, значительными температурными напряжениями, в большей степени определяющими стойкость футеровки. Во-вторых, образование настывки способствует снижению площади контакта шлака с футеровкой.

Оптимизация шлакового режима металлургических агрегатов комплексная задача. Однако ожидать стабильного эффекта от оптимизации состава шлака можно, только если за счет дизайна конструкции снизить остроту проблемы «горячих зон» по периметру футеровки. Иначе шлак повлияет на стойкость наименее напряженных зон, в которых износ контролируется только химическим взаимодействием шлака и огнеупора. В зонах, где износ интенсифицируется механически или термически, влияние шлака будет меньше. Стойкость конструкции в целом определяется именно «горячими зонами».

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Суворов С.А. Огнеупоры для металлургической промышленности // Известия СПбГТИ (ТУ). 2007. №2. С. 3-8.

[2] Отчет KASE для АО ТНК «Казхром» за 2018-2020 г

[3] N.K. Debnath, S.Boga, A.Singh, M.R.Majhi, V.K.Singh <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.076>

[4] Andreev K.; Luchini B.; Rodrigues M.J.; Alves J. L. Role of fatigue in damage development of refractories under thermal shock loads of different intensity. *Ceram. INT.* 2020, 46, 20707–20716, DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2020.04.235

[5] E. V. Prikhod'ko, Analysis of methods for heating the lining of high-temperature units. refractories and industrial ceramics. vol. 62, no. 4, November, 2021. P. 463-466 DOI 10.1007/S11148-021-00625-1

[6] S.M. Fomenko, A. Akishev, S. Tolendiuly. Thermal flows influence on the change of temperature stresses in surface and inner layers of refractories. *Materials Today: Proceedings*, Volume 33, Part 4, 2020, Pages 1853-1858, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.198>.

[7] В.Г.Герасименко. Особенности введения в эксплуатацию футеровки сталеразливочных ковшей. *Металл и литье Украины*. 2018. № 5-6. С.46-47

[8] L. Scheunis, A. Fallah-Mehrjardi, M. Campforts, P.T. Jones, B. Blanpain, A. Malfliet, E. Jak. The effect of a temperature gradient on the phase formation inside a magnesia–chromite refractory in contact with a non-ferrous pbo–sio2–mgo slag. *journal of the european ceramic society*, Volume 35, Issue 10, 2015, PAGES 2933-2942,

[9] Yuxiang Dai, Jing Li, Wei Yan, Chengbin Shi. Corrosion mechanism and protection of BOF refractory for high silicon hot metal steelmaking process. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 9, Issue 3, 2020, Pages 4292-4308, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.055>.

**Назгуль Арипова**, докторант, Toraigyrov University, Павлодар, Қазақстан, nazgul\_2010@mail.ru

**Евгений Приходько**, т.ф.к., профессор, Toraigyrov University, Павлодар, Қазақстан, John1380@mail.ru

**Амангелді Карманов**, PhD, Toraigyrov University, Павлодар, Қазақстан, Aman270685@mail.ru

**Бұлбұл Онғар**, PhD, қауымдастырылған профессор, Satbayev University, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, ongar\_bulbul@mail.ru

**Анар Егзекова**, т.ғ.к., профессор ассистенті, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, granata81@mail.ru

## ШӨМІШ ТӨСЕМДЕРІНІҢ ҚЫЗМЕТ ЕТУ МЕРЗІМІНЕ ОПЕРАЦИЯЛЫҚ ФАКТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІН ТАЛДАУ

**Аңдатпа.** Мақалада феррокорытпа өндірісінің құю шөміштерінің қаптауының жұмыс науқанының ұзақтығына әсер ететін пайдалану факторлары талданады. Қаптаманың беріктігін анықтайтын ең маңызды фактор ретінде ауыспалы жылу жағдайында төсемде пайда болатын термиялық кернеулер екендігі көрсетілген. Сонымен қатар, агрессивті шлактардың әсері төзімділікке айтарлықтай әсер етеді. Бұл жағдайда шлактардың деструктивті әсері қаптаманың жоғарғы қатарларымен шектеледі. Қаптаманың ішкі бетінде жиналудың қалыптасуы төзімділікке екі есе әсер етеді. Бір жағынан, жинақтау жойылуға жол бермейтін қорғаныс қабаты болып табылады. Екінші жағынан, жиналу шөміштің техникалық-экономикалық көрсеткіштерін төмендетіп қана қоймайды, бірақ аралық жөндеу кезінде оны алып тастау футеровканың ішінара бұзылуына әкеледі.

**Түйінді сөздер.** Қаптау беріктігі, құю шөміштері, пайдалану факторлары, термиялық кернеулер, шамот кірпіштері.

**Nazgul Aripova**, doctoral student, Toraigrov University, Pavlodar, Kazakhstan, nazgul\_2010@mail.ru

**Evgeny Prikhodko**, candidate of technical sciences, professor, Toraigrov University, Pavlodar, Kazakhstan, John1380@mail.ru

**Amangeldy Karmanov**, PhD, Toraigrov University, Pavlodar, Kazakhstan, Aman270685@mail.ru

**Bulbul Ongar**, Satbayev University, PhD, associate professor, Academy of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan, ongar\_bulbul@mail.ru

**Anar Yegzekova**, candidate of technical sciences, assistant professor, Academy of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan, granata81@mail.ru

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF OPERATIONAL FACTORS ON THE LIFE OF LADLE LININGS

**Annotation.** The article analyzes the operational factors that affect the duration of the working campaign of the lining of casting ladles of the ferroalloy production. It is shown that the most important factor determining the durability of the lining is the thermal stresses that occur in the lining under variable thermal conditions. In addition, the impact of aggressive slags significantly affects the durability. In this case, the destructive effect of slags is limited to the upper rows of the lining. The formation of build-up on the inner surface of the lining has a twofold effect on durability. On the one hand, the buildup is a protective layer that prevents destruction. On the other hand, buildup not only reduces the technical and economic performance of the ladle, but its removal during intermediate repairs leads to partial destruction of the lining.

**Keywords.** Lining durability, pouring ladles, operational factors, thermal stresses, fireclay bricks.

\*\*\*\*\*