

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07104 – «Теплоэнергетика»

Арипова Назгуль Михайловна

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ РАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ ЗА СЧЁТ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ФУТЕРОВКИ

Актуальность работы. Согласно докладу министра энергетики Республики Казахстан А.Саткалиева в ходе заседания Правительства, было отмечено, что в 2023 году потребление электрической энергии в Республике Казахстан составило 115 млрд кВт·ч, при том, что объёмы производства составили 112,8 млрд кВт·ч. При этом, согласно прогнозному балансу электрической энергии в единой энергетической системе РК в период с 2024 по 2030 годы наблюдается увеличение объёмов потребления энергии с 120,6 до 155,9 млрд. кВт·ч.

Несмотря на реализацию политики энергосбережения, промышленный сектор по-прежнему остается одним из основных потребителей энергоресурсов. В структуре энергетического комплекса Республики Казахстан общее конечное потребление энергии на промышленный сектор приходится 30,3 % энергоресурсов (по доле потребления на втором месте после жилищного сектора).

Наиболее энергоемкой отраслью является обрабатывающая и добывающая промышленность, на которую приходится более 90% потребления энергии промышленного сектора. При этом, самая большая доля потребления энергии в промышленности приходится на сектор чёрной металлургии 30,1 % [1].

Одними из причин значительного потенциала энергосбережения промышленных предприятий Республики Казахстан являются устаревание технологического процесса и физический износ оборудования, который достигает 45–60 %, что приводит к неполному использованию производственной мощности и высокому удельному потреблению энергии производственными линиями [2].

В целях поднятия уровня энергосбережения и повышения энергоэффективности в промышленности необходимо создать условия для проведения модернизации теплотехнологических процессов и высокотемпературного оборудования, а также внедрения энергосберегающих мероприятий в отраслях промышленности [2].

Энергетическая эффективность большинства металлургических агрегатов во многом определяется работой футеровок. Продолжительность рабочей кампании агрегата, затраты энергии при нестационарных тепловых режимах и другие показатели зависят от состояния футеровки.

Проблема повышения энергетической эффективности работы

высокотемпературных агрегатов должна решаться посредством рационализации режимов их тепловой работы, конструкции отдельных элементов и агрегатов в целом.

Такие высокотемпературные агрегаты, как разливочные ковши ферросплавного производства работают с высокотемпературными рабочими средами – температура расплава металла, сливаемого с печи, составляет 1600-1650 °С.

Повышение энергетической эффективности работы разливочных ковшей ферросплавного производства при их охлаждении определяется следующим:

- использование вторичных энергетических ресурсов для плавного снижения температуры футеровки разливочного ковша в процессе её охлаждения;
- снижение времени охлаждения футеровки разливочного ковша перед проведением ремонтных работ, увеличение их оборачиваемости (количество сливов расплава металла в разливочный ковш в сутки);
- ведение режимов охлаждения с повышенными скоростями, при которых возникающие термические напряжения не превышают предела прочности используемых футеровочных материалов. Это позволяет снизить время простоя разливочных ковшей в ремонте, увеличить время их работы за счёт продления срока службы огнеупорных материалов и снизить удельный их расход на тонну технологического продукта.

В связи с этим актуальными представляются задачи и предложения по повышению энергетической эффективности работы разливочных ковшей за счёт рационализации режимов охлаждения футеровки.

Объект исследования: футеровка разливочных ковшей ферросплавного производства.

Предметами исследования являются закономерности возникновения термических напряжений в футеровках разливочных ковшей ферросплавного производства в процессе их охлаждения.

Связь темы диссертации с общенаучными (государственными) программами: диссертация выполнена в рамках научно-исследовательской работы, финансируемой Государственным учреждением «Комитет науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан» по теме: ИРН АР19675777 «Разработка системы оценки остаточного ресурса теплотехнологического оборудования для повышения надёжности его работы» (2023-2025 гг.).

Цель исследования: повышение энергетической эффективности работы разливочных ковшей за счёт рационализации режимов охлаждения футеровки.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Выполнить анализ современного состояния производства и эксплуатации огнеупорных материалов, используемых в высокотемпературных агрегатах.
2. Выполнить анализ тепловой работы футеровок разливочных ковшей при нестационарных режимах работы.

3. Разработать математическую модель термонапряженного состояния футеровки в процессе охлаждения разливочных ковшей.

4. Выполнить экспериментальные исследования с целью определения зависимости теплофизических параметров и термомеханических свойств используемых огнеупорных материалов от температуры;

5. Разработать рациональные графики охлаждения футеровки разливочных ковшей с учетом зависимости теплофизических параметров и термомеханических свойств используемых огнеупорных материалов от температуры.

6. Разработать методику оценки остаточного ресурса футеровок разливочных ковшей.

7. Разработать способ охлаждения футеровки разливочного ковша и устройство для его осуществления.

8. Выполнить расчет экономической эффективности предлагаемых технических мероприятий.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертации были проведены:

- измерение температурных полей футеровок разливочных ковшей в процессе их охлаждения;

- анализ тепловой работы футеровок разливочных ковшей при нестационарных режимах работы;

- математическое моделирование термонапряженного состояния футеровки в процессе охлаждения разливочных ковшей;

- экспериментальное исследование теплофизических параметров и термомеханических свойств используемых огнеупорных материалов в лабораторных условиях.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель термонапряжённого состояния футеровки в процессе охлаждения разливочных ковшей.

2. Разработан способ определения предела прочности на растяжение при изгибе огнеупорных материалов при повышенных температурах, который защищен патентом РК.

3. Получены зависимости предела прочности на растяжение шамотного огнеупора марки ШКУ-32 от температуры.

4. Разработан способ определения теплофизических свойств огнеупорных материалов, который защищен патентом РК.

5. Разработаны рациональные графики охлаждения футеровок разливочных ковшей ферросплавного производства с учетом зависимости теплофизических параметров и термомеханических свойств от температуры.

6. Разработана методика определения остаточного ресурса футеровок разливочных ковшей, которая защищена патентом РК.

7. Разработан способ охлаждения футеровки разливочного ковша и устройство для его осуществления, которые защищены патентами РК.

Практическая значимость работы:

1. Полученные зависимости предела прочности шамотных огнеупоров

ШКУ-32 на сжатие и растяжение от температуры могут быть использованы проектными организациями и конструкторскими отделами предприятий, при расчётах связанных с термомеханическими свойствами огнеупоров.

2. Разработанная математическая модель термонапряжённого состояния футеровки в процессе охлаждения разливочных ковшей может быть использована производственно-технологическими отделами предприятий, а также проектными организациями для расчётов термонапряжённого состояния футеровок.

3. Разработанное устройство для охлаждения футеровки разливочного ковша позволит увеличить точность соблюдения графика охлаждения футеровки высокотемпературных агрегатов промышленных предприятий.

4. Разработанная методика определения остаточного ресурса футеровки разливочных ковшей может быть использована при выполнении многовариантных прогнозных расчётов при проектировании и эксплуатации высокотемпературных агрегатов, а также в обучающих целях.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы апробированы на международных научно-практических и научно-технических конференциях:

- Международной научно-практической конференции «XV Торайгыровские чтения», посвящённой 130-летию С. Торайгырова (г. Павлодар, 2023 г.);

- XXXVII Международной научно-практической конференции: «Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (2024 г., г. Пенза, РФ);

Публикации. По результатам диссертаций опубликовано 14 печатных работ, в том числе в журналах, рекомендованных КОКСНВО – четыре, патентов РК – пять (Приложение А); три статьи опубликованы в журналах, входящих в базы SCOPUS и Web of Science: *Energies* (2023 г.), *Energies* (2024 г.), *Refractories and Industrial Ceramics* (2023 г.); две статьи в сборниках международных конференций.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных методов и методик исследования, достаточной сходимостью проведенных экспериментов с расчетными данными (расхождение менее 3 %); адекватностью математической модели.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты теплотехнических исследований процесса охлаждения футеровок разливочных ковшей;

- методика расчёта определения термических напряжений в футеровке разливочного ковша при его охлаждении;

- математическая модель термонапряжённого состояния футеровки в процессе охлаждения разливочных ковшей;

- зависимости предела прочности шамотных огнеупоров на сжатие и растяжение от температуры;

- рациональные графики охлаждения футеровок разливочных ковшей ферросплавного производства с учетом зависимости теплофизических параметров и термомеханических свойств от температуры;

- способ определения остаточного ресурса футеровок высокотемпературных агрегатов.

Внедрение результатов. Полученные результаты расчетно-экспериментальных исследований с использованием модели термонапряженного состояния футеровки разливочных ковшей внедрены в учебный процесс НАО «Торайгыров университет» (раздел лекции по дисциплине «Надежность работы высокотемпературных агрегатов» для магистрантов образовательной программы 7M07106-Теплоэнергетика) (Приложение Б), а также на предприятиях: Аксуский завод ферросплавов филиала АО «ТНК «Казхром» внедрена методика определения остаточного ресурса разливочных ковшей; на ПФ ТОО «KSPSteel» внедрена методика расчёта режимов охлаждения футеровок разливочных ковшей для оценки допустимого остаточного ресурса (Приложение В).

Личный вклад автора состоит: в постановке задач исследования, анализе и обобщении литературных данных; проведение замеров температурных полей футеровки разливочных ковшей в процессе охлаждения на действующем промышленном оборудовании; разработка новых технических решений и проведение экспериментальных исследований по определению термомеханических и теплофизических свойств огнеупорных материалов футеровки разливочных ковшей; разработка математической модели определения термических напряжений в футеровке разливочного ковша при ее охлаждении; расчете термических напряжений при использовании существующих режимов охлаждения футеровки и разработке рациональных графиков режимов охлаждения разливочных ковшей.

Объем и структура диссертации: Диссертационная работа состоит из раздела «Определения, обозначения и сокращения», введения, пяти разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Диссертация изложена на 144 страницах компьютерного набора, включая 42 рисунка и 8 таблиц, 33 формулы, и 167 наименований библиографических источников.

Во введении представлены актуальность, цели и задачи исследования, научная новизна, положения, выносимые на защиту, достоверность работы, представлен личный вклад автора, а также апробация результатов и публикации.

В первом разделе проведен анализ современного состояния производства и эксплуатации огнеупорных материалов. Рассмотрено использование огнеупорных материалов в разливочных ковшах, а также конструкция и эксплуатация современных футеровок разливочных ковшей. Оценено влияние эксплуатационных факторов на срок службы футеровок разливочных ковшей. Из условий эксплуатации разливочных ковшей можно выделить влияние значительных перепадов температур на срок службы футеровки. Разность температур по толщине футеровки вызывает ее

разрушение вследствие возникновения термических напряжений, значение которых превышают предел прочности используемых материалов, установленных технологическим регламентом.

Анализ тепловой работы разливочных ковшей показал, что условия их эксплуатации в значительной степени определяются продолжительностью рабочей кампании футеровок.

На основе анализа выявлены основные способы повышения энергетической эффективности и срока службы футеровок разливочных ковшей.

Во втором разделе исследована тепловая работа футеровок разливочных ковшей, приведена характеристика объекта исследования. При помощи современных измерительных приборов проведены тепловизионные и визуальные обследования футеровок разливочных ковшей. Осуществлен анализ ремонтов футеровок разливочных ковшей, который показал, что износ шлакового пояса происходит, в основном, в результате химического воздействия агрессивного шлака. Воздействие расплава металла при сливе его в ковш и разливе из ковша оказывает ограниченное локальное воздействие. Основной причиной износа футеровки являются термические напряжения, возникающие из-за значительного градиента температур по толщине футеровки при нестационарных тепловых процессах, в том числе при охлаждении футеровки разливочного ковша с высокими скоростями.

Исследованы режимы охлаждения футеровки разливочных ковшей. Результаты исследования показали, что режимы охлаждения футеровки разливочных ковшей на рассмотренном предприятии не разработаны, и её охлаждение осуществляется без контроля скорости снижения температуры при естественной конвекции в условиях атмосферы цеха.

В третьем разделе проведен анализ термонапряженного состояния футеровки в процессе охлаждения разливочных ковшей и разработана математическая модель термонапряженного состояния футеровки в процессе охлаждения разливочных ковшей.

Анализ процесса охлаждения футеровки разливочного ковша ферросплавного производства показывает, что процесс охлаждения футеровки идёт очень неравномерно в условиях естественной конвекции, без контроля за снижением температуры. Температура внутренней поверхности футеровки с момента охлаждения снижается на 300 °С за 30 минут, что превышает значения скорости охлаждения, приведенные в технической литературе. На завершающем этапе охлаждения снижение температуры на 300 °С происходит уже в течение 10 часов 10 минут. Таким образом, скорости охлаждения внутренней поверхности футеровки на различных этапах отличаются более чем в 20 раз.

Была разработана математическая модель термонапряженного состояния футеровки в процессе ее охлаждения, которая включает в себя две составляющих: математическую модель температурных полей и математическую модель для расчёта термических напряжений в футеровке разливочных ковшей.

Найденные значения термических напряжений необходимы для анализа существующих скоростей охлаждения и разработки рациональных режимов охлаждения футеровки разливочных ковшей путем сравнения возникающих термических напряжений с пределом прочности применяемых огнеупоров.

В четвертом разделе экспериментальным путем исследованы термомеханические свойства огнеупорных материалов. Выявлены прочностные характеристики шамотных огнеупоров.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что предел прочности на сжатие шамотных огнеупоров марки ШКУ-32 для огнеупоров после 1-2 плавов выше паспортного их значения при 20 °С на всём интервале температур от 20 °С до 800 °С. Для огнеупоров после трёх плавов предел прочности на сжатие выше паспортного значения огнеупоров после 1-2 плавов в интервалах от 100 до 380 °С и от 480 до 680 °С на 22 % и 40 % соответственно.

Значение предела прочности на растяжение для огнеупоров после 1-2 плавов получилось выше справочного значения на 25% в интервале от 440 °С до 800 °С. На участке от 450 °С до 550 °С предел прочности на растяжение для огнеупоров после трёх плавов выше справочного значения огнеупоров после 1-2 плавов всего лишь на 2 %.

Экспериментальным путём было доказано, что условия эксплуатации огнеупоров футеровки разливочных ковшей в значительной степени влияют на значения коэффициента теплопроводности. Проведённые исследования показали, что значения коэффициента теплопроводности огнеупоров, после трёх плавов, увеличиваются до 12 % от первоначального значения.

В пятом разделе проведен анализ термических напряжений, возникающих в процессе охлаждения футеровки разливочных ковшей. Установлено, что для огнеупоров после трёх плавов графики зависимости предела прочности напряжений сжатия от времени имеют схожую форму с графиками зависимости термических напряжений растяжения от времени для огнеупоров после 1-2 плавов.

На основе разработанной программы расчета термонапряженного состояния футеровки разливочного ковша предложен рациональный режим и график охлаждения его футеровки. В результате использования разработанного графика, при котором термические напряжения не превышают предел прочности используемых огнеупорных материалов, происходит снижение времени охлаждения с 19 ч 30 мин до 10 ч 10 мин, а также повышение срока службы огнеупорной футеровки, согласно литературным данным до 5 %.

Проведена оценка остаточного ресурса футеровки разливочных ковшей и разработаны рекомендации по контролируемому охлаждению футеровки разливочных ковшей. Проведена оценка экономической эффективности предлагаемых технических мероприятий.

В заключении отражены основные результаты исследования и приведены выводы по диссертационной работе.