

МИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Допущен к защите:

зав. кафедрой теплоэнергетики и металлургии,

доктор технических наук, профессор _____ А.С.Никифоров
(подпись)

_____ 2011г.

Магистерская диссертация
РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ РАЗОГРЕВА ФУТЕРОВОК
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЁЖНОСТИ ИХ РАБОТЫ

специальность 6N0717 - ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Магистрант _____ А.Е.Карманов
(подпись)

Научный руководитель,

кандидат технических наук _____ Е.В.Приходько
(подпись)

ПАВЛОДАР 2011

МИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
ИННОВАЦИОННЫЙ ЕВРАЗИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 669.621

РАЗРАБОТКА РЕЖИМОВ РАЗОГРЕВА ФУТЕРОВОК
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ
НАДЁЖНОСТИ ИХ РАБОТЫ

Магистерская диссертация на соискание академической степени магистра
теплоэнергетики по специальности 6N0717 - ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

ПАВЛОДАР 2011

РЕФЕРАТ

Диссертация магистра теплоэнергетики, 63 с., 12 рис., 4 табл., 23 ист.

Объектом исследования являются сталеразливочные ковши ёмкостью 25 тонн. Эксплуатация данных ковшей осуществляется на предприятии ПФ ТОО «Кастинг» (г. Павлодар).

Цель работы – рационализация процесса разогрева сталеразливочных ковшей с позиции возникающих термических напряжений в футеровке агрегата.

Высокотемпературные агрегаты (нагревательные, сушильные, обжиговые плавильные устройства и ковши для разлива стали и других металлов), футеруются огнеупорными материалами. Срок службы высокотемпературных агрегатов, во многом, определяется сроком службы футеровки. При термическом воздействии на футеровку печи возникают такие физические явления, как термическое расширение, пластическая деформация и растрескивание, которые определяют возможность осуществления термотехнологического процесса, стойкость футеровки без нарушения геометрических форм рабочей камеры, длительность эксплуатации и технико - экономические показатели процесса получения целевого продукта

При разогреве и работе оборудования в футеровке возникают термические напряжения. Причина их возникновения заключается в неравномерном распределении температуры в различных частях кладки или ограничении возможности теплового расширения тела. Как правило, к термическим напряжениям, разрушающим материал, ведёт слишком высокая скорость разогрева агрегатов. Для предотвращения разрушения футеровки под действием возникающих при нагреваний, необходимо ее работу вести в режиме, обеспечивающем величину скорости роста напряжений ниже скорости их релаксирования. Но, с другой стороны, чрезмерное затягивание процесса разогрева приводит не только к перерасходу топлива, но и увеличению простоя оборудования в ремонте, что также сказывается на себестоимости продукции. Таким образом, процесс разогрева необходимо вести с максимально возможными скоростями, обеспечивающими возникновение температурных напряжений не превышающих предел прочности материалов футеровки при данной температуре.

1 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУТЕРОВОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

1.1 Используемые в промышленности огнеупоры и условия их эксплуатации

Высокотемпературные агрегаты (нагревательные, сушильные, обжиговые плавильные устройства и ковши для разливки стали и других металлов), футеруются огнеупорными материалами. Срок службы высокотемпературных агрегатов, во многом, определяется сроком службы футеровки. При термическом воздействии на футеровку печи возникают такие физические явления, как термическое расширение, пластическая деформация и растрескивание, которые определяют возможность осуществления термотехнологического процесса, стойкость футеровки без нарушения геометрических форм рабочей камеры, длительность эксплуатации и технико-экономические показатели процесса получения целевого продукта [1].

Огнеупорные материалы – изделия на основе минерального сырья, отличающиеся способностью сохранять свои свойства в условиях эксплуатации при высоких температурах, и которые служат в качестве конструкционных материалов и защитных покрытий.

Функционально любое огнеупорное изделие может выполнять от одной до четырех основных задач [2]:

- 1) удерживать расплавленный металл или раскалённые газы (а также их потоки) в заданном объёме или пространстве;
- 2) предотвращать вторичное окисление и загрязнение металла неметаллическими включениями;
- 3) служить тепловой изоляцией металлических частей агрегатов;
- 4) поддерживать заданную температуру металла (газов) или заданные минимальные потери из агрегата.

Конструкторы, строители печей, изготовители огнеупоров и инженеры-эксплуатационники это хорошо понимают. Целесообразный выбор футеровки печей только тогда возможен, если с одной стороны, известны как можно точнее особенности характеристик огнеупорных материалов и с другой - нагрузки материалов на реальном производстве. Связь между различными видами термических нагрузок в промышленных печах и важнейшими эксплуатационными характеристиками огнеупоров (таблица 1.1) образуют основу для классификации их свойств и выбора испытательных методов. Эти методы также важны для контроля качества и разработки новых огнеупорных материалов.

Таблица 1.1 - Эксплуатационные характеристики огнеупоров

Вид испытания	Важные для практики свойства
Термическое и термомеханическое	Огнеупорность Температура деформации под нагрузкой Ползучесть под нагрузкой Предел прочности при высоких температурах Термическое расширение Дополнительная усадка / расширение (огнеупоров в процессе службы) Термостойкость
Термотехническое	Теплопроводность Удельная теплоёмкость Плотность сырого материала Температуропроводность

Огнеупорные материалы применяют для изготовления внутреннего облицовочного слоя (футеровки) металлургических печей и ковшей для расплавленного металла. Огнеупорные материалы способны выдержать нагрузки при высоких температурах, противостоять резким изменениям температур, химическому воздействию шлака и печных газов. Огнеупорность материала определяется температурой его размягчения. По химическим свойствам огнеупорные материалы разделяют на кислые, основные, нейтральные.

Высокое качество огнеупорных материалов — основное условие долговечности футеровки. Огнеупорные материалы должны обладать химической инертностью, высокими огнеупорностью и термической стойкостью, малыми теплопроводностью и электропроводностью, постоянством объема при повторных нагревах, допускать простую технологию применения и быть дешевыми.

Огнеупоры имеют очень большое значение в экономике нашей страны. Без огнеупоров невозможно выплавить ни 1 т металла, произвести ни 1 т цемента, стекла, ряда химических соединений, получить ни 1 кВт электроэнергии на ТЭС и много других областей, не мыслимых без огнеупоров.

Современные тенденции развития производства и применения огнеупоров заключаются в следующих моментах:

- повышение качества огнеупоров. Если раньше под повышением качества огнеупоров понимали увеличение показателей их свойств (прочности, плотности, термостойкости и др.), то сейчас фактически повышение качества огнеупоров означает степень их полезности у потребителей, т.е. степень удовлетворения потребностей потребителя комплексом показателей: повышением стойкости огнеупоров, снижением расхода огнеупоров на 1 т продукции, технико-экономическим эффектом и

итоговым показателем - коэффициентом эффективности огнеупоров (суммой производства и применения огнеупоров).

Другой актуальной современной тенденцией производства и применения огнеупоров является разработка технологии новых видов огнеупоров. Так, например, только в области шпинелидных огнеупоров по данным академика А.С. Бережного существует 1,5 тыс. шпинелидов, из которых можно изготовить 84 видов новых огнеупоров. Это без добавки графита, а с добавкой графита и бескислородных соединений можно получить более 200 видов новых высокостойких огнеупоров, изготовленных по электронной технологии. В этой области относительно подробно рассмотрены только шпинелиды системы $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и начаты работы по шпинелидным наноогнеупорам [3].

Для решения этих задач необходимо создать методологические основы и последовательность проектирования футеровок нового поколения, при следующих параметрах:

входные параметры:

- условия службы и механизм износа огнеупоров;
- расчеты физико-химических моделей огнеупоров нового поколения с помощью компьютерных программ;
- уточнение термофизических и химических свойств огнеупоров нового поколения путем изготовления лабораторных образцов и определение их свойств;
- разработка компьютерной технологии производства и применения огнеупоров нового поколения;

выходные параметры:

- расчеты, проектирования и изготовление теплоизоляционных футеровок нового поколения, полностью удовлетворяющих требованиям металлургов и других потребителей.

Материалы, которые могли бы найти применение в качестве футеровки металлургических печей, можно разделить на следующие группы окислы, карбиды, нитриды, сульфиды, бориды и элементы.

Сырье для *огнеупорных материалов* - простые и сложные оксиды (например, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , MgO-SiO_2), бескислородные соединения (например, графит, нитриды, карбиды, бориды, силициды), а также оксинитриды, оксикарбиды, сиалоны.

Для изготовления огнеупоров используют разнообразные технологии и процессы. Преобладающей является технология, включающая предварительную, тепловую обработку и измельчение компонентов, приготовление шихт с добавлением пластифицированных составляющих, формование из них изделий прессованием на механических и гидравлических прессах или экструзией с последующей допрессовкой или литьем, обжиг в туннельных, реже в периодических и газокамерных печах для получения заданных свойств материала.

Огнеупорные изделия могут быть формованными и неформованными.

Неформованные огнеупоры - огнеупоры, изготовленные без определенных форм и размеров в виде кусковых, порошковых и волокнистых материалов, а также паст и суспензий. Неформованные огнеупорные материалы обычно упрочняют введением минеральных (например, жидкое стекло) или органических (полимеры) связующих.

К ним относят металлургические заправочные порошки, заполнители и мелкозернистые компоненты для огнеупорных бетонов, огнеупорные цементы, бетонные смеси и готовые к применению массы, мертели, материалы для покрытий (в т.ч. торкрет-массы), некоторые виды волокнистых огнеупоров.

Неформованные огнеупоры могут быть сухими, полусухими, пластичными и жидкотекучими.

Неформованные огнеупоры применяют для выполнения и ремонта футеровок сталеразливочных ковшей (набивные и наливные кремнеземные, высокоглиноземные и магнезиальные массы); конвертеров (торкрет-массы), нагревательных и обжиговых печей (шамот, и высокоглиноземные массы), индукционных печей (корундовые и периклазовые массы), коксовых печей (обмазки), подин мартен, и электродуговых печей (заправочные порошки) и т. д.

Формование огнеупорных материалов проводят методами полусухого и горячего прессования, пластического формования, литья (вибrolитья) из текучих масс или расплава материала, а также распилом предварительно изготовленных блоков или горных пород.

Формованные огнеупоры применяют для изготовления огнеупорных кладок стен, сводов, подов и других конструкций коксовых, мартеновских и доменных печей, печей для выплавки различных сплавов, при футеровке ядерных реакторов, МГД-генераторов, авиационных и ракетных двигателей; неформованные - для заполнения швов при кладке формованных огнеупоров, нанесения защитных покрытий на металлы и огнеупоры.

По характеру термической обработки различают безобжиговые и обожженные огнеупорные материалы.

Безобжиговые огнеупоры - изделия из огнеупорных материалов и связки, приобретают требуемые свойства при сушке с температурой менее 400°C (после нагрева изделий от 400 до 1000°C их называют термообработанными). Связкой могут быть глины, керамические суспензии, растворы фосфатов, щелочные силикаты (жидкое стекло), смолы термопластичные и термореактивные, эластомеры и другие безобжиговые огнеупоры по прочности и пластичности не уступают, а по термостойкости превосходят обожженные огнеупоры.

Наиболее широко применяют следующие безобжиговые огнеупоры: кремнеземистые бетонные блоки (для нагревательных колодцев), шамот и высокоглиноземные (для обжиговых агрегатов), магнезиальноизвестковые на смоляной (пековой) связке (для сталеплавильных конвертеров) периклазовые

и периклазохромитовые (для сталеразливочных стаканов), магнезиальные в стальных каскетах.

Для обожженных огнеупорных материалов температура обжига превышает 600 °С и определяется достижением необходимых физико-химических свойств материала. Обжиг огнеупорных материалов проводят в плазменных или электрических печах периодического или непрерывного действия - камерных, кольцевых, туннельных, шахтных и др.

Другие важные свойства огнеупорных материалов - пористость, термическая стойкость, теплопроводность, температура начала деформации под нагрузкой и химическая стойкость в различных средах.

По пористости (объемной доле пор в %) различают:

- особоплотные огнеупорные материалы (пористость менее 3%),
- высокоплотные (3-10%),
- уплотненные (16-20%),
- материалы повышенной пористости (20-30%),
- легковесные (45-75%) - огнеупоры с высокой (45-85%) пористостью.
- ультралегковесные (75-90%), к которым обычно относят волокнистые огнеупорные материалы.

По химико-минеральному составу огнеупоры делят на типы (кремнеземистые, алюмосиликатные, глиноземистые, глиноземоизвестковые, магнезиальные, известковые, хромистые, цирконистые, оксидные, углеродистые, карбидкремниевые и бескислородные), на типы на группы. При композиционном составе в наименовании огнеупоров на первое место ставится преобладающий компонент (например, периклазохромитовые и хромитопериклазовые).

Графитовые огнеупорные материалы для изготовления форм. С целью уменьшения взаимодействия между расплавом и формой вместо кварцевых песков применяют высокоогнеупорные материалы и материалы высшей огнеупорности.

В качестве наполнителя используют огнеупорные материалы, которые имеют одинаковый коэффициент термического расширения (КТР) с материалом оболочки, так как при различии в КТР возможно возникновение напряжений и трещин в оболочковой форме при ее прокаливании и заливке.

В металлургии используются композиционные огнеупорные материалы для футеровки печей, для кожухов, арматуры печей, наконечников термопар, погружаемых в жидкий металл, и др. В данном случае эффективность применения заключается в увеличении срока службы металлургического оборудования. В горнорудной промышленности из композиционных материалов на основе тугоплавких соединений изготавливают буровой инструмент, коробки буровых машин, детали буровых комбайнов, транспортеров и др. Эффективность применения заключается в высокой абразивной стойкости и износостойкости композиций.

Для изготовления литейных форм применяют различные огнеупорные материалы. Химические свойства формовочных материалов в значительной

степени predeterminedются их минералогическим составом. Для изготовления оболочковых форм используют следующие огнеупорные материалы: кварцевый песок, дистен-силиманит, цирконовый песок, электрокорунд, оксид магния и оксид кальция.

Сталеплавильное производство является крупнейшим потребителем огнеупоров: при выплавке и разливке стали, расходуется 40% общего количества производимых огнеупорных изделий, в том числе наиболее качественных на основе оксидов магния и алюминия. Расход их зависит в значительной степени от структуры сталеплавильного производства [1]. Таким образом, сокращение удельного расхода огнеупоров в металлургии – актуальная задача, решение которой невозможно без изучения механизма термического разрушения.

Шамотные огнеупоры – содержат в своём составе 28-45% Al_2O_3 и 50-70 SiO_2 . Технология производства формованных шамотных огнеупоров включает: обжиг глины (каолина) при 1300-1500 °С во вращающихся или шахтных печах, измельчение полученного шамота, смешивание со связующей глиной и водой (иногда с добавлением других связующих материалов), формование, сушку и обжиг при 1300-1400 °С.

Шамотные огнеупоры применяют для футеровки доменных печей, сталеразливочных ковшей, нагревательных и обжиговых печей, котельных топок и др., а также для изготовления сифонных изделий для разливки стали. Неформованные шамотные огнеупоры изготавливают из измельченного шамота и связующих материалов и применяют в виде мертелей, набивных масс, порошков, заполнителей бетонов при выполнении и ремонте огнеупорных футеровок разных тепловых агрегатов.

Отличительной особенностью высокоглиноземистых огнеупорных изделий является повышенное содержание Al_2O_3 , которое превышает 45 %. Огнеупорность высокоглиноземистых изделий составляет порядка 1750 °С и выше. В сумме с высокой температурой начала размягчения и повышенной химической стойкостью против кислых и щелочных расплавов позволяет использовать их в основных тепловых агрегатах металлургической промышленности.

Наиболее распространенными агрегатами для применения высокоглиноземистых огнеупорных изделий являются: верхняя часть стен и купола воздухонагревателей, кладке лещади и горна в доменных печах, при непрерывной разливке стали; в печах с рабочей температурой 1400-1500 °С, сталеразливочные ковши при обработке стали вакуумированием, как заполнители огнеупорных бетонов, мертелей и т.п.

Эти огнеупорные изделия бывают трех видов:

- Муллитокремнеземистые (Al_2O_3 - 45-62%), МКР, имеют шамотную основу из глины и бокситов; характеризуются содержанием Al_2O_3 до 62 %. Они производятся методом плавки в электрической печи оксидов алюминия и кремния.

- Муллитовые (Al_2O_3 - 62-72 %);

- Муллитокорундовые (Al_2O_3 - 72-90 %) МК, так же, как и МЛ, имеют основу из глиноземов, маложелезистых бокситов и электрокорундов.

Высокоглиноземистые корундовые огнеупоры. К ним относятся огнеупоры, содержание Al_2O_3 в которых >95 %. Для изготовления такого огнеупора используют порошок электроплавкого корунда и технический глинозем. После формировки его обжигают при температуре 1600 – 1750 °С. Огнестойкость получаемого материала позволяет использовать его в процессах с температурой 1750 – 1800 °С, корундовый огнеупор способен устойчиво контактировать с жидким металлом и шлаками, кислотами, щелочами и расплавленным стеклом.

Из корундовых огнеупоров изготавливают корундовые плиты для шиберных затворов сталеразливочных ковшей, изделия для футеровки камер вакууматоров стали, насадки высокотемпературных воздухонагревателей, чехлы термонар, тигли для плавки стекол, металлов и др.

Неформованные корундовые огнеупоры - мертели и бетоны с корундовым заполнителем применяют для футеровки патрубков вакууматоров стали, а массы и обмазки - для изготовления и ремонта огнеупорных футеровок с рабочей температурой более 1700 °С.

Большое внимание уделяется магнезитовым огнеупорам, как одним из наиболее перспективных. Возросло и количество разработанных огнеупорных составов на основе MgO . Новые огнеупоры обладают улучшенными показателями по пределу прочности, пределу применяемых температур и др. [4, 5].

Магнезиальные огнеупоры – огнеупорные изделия, содержащие в основе MgO . Их изготавливают из смеси обожженных и сырых материалов, которые после добавки связки проходят термообработку при температуре 1500-1900 °С.

Такие огнеупоры обладают высокой огнестойкостью, что позволяет применять их в процессах, связанных с расплавом металла и шлаками, а также при футеровке агрегатов металлургии. Магнезиальные огнеупорные изделия имеют высокую стойкость при взаимодействии с расплавами металлов и основных шлаков.

Магнезиальные огнеупорные изделия бывают трех видов:

Магнезиальносиликатные огнеупоры - их основу составляет форстерит Mg_2SiO_4 , к которому добавлены 50-60 % MgO , 25-40 % SiO_2 и связующая добавка. Магнезиальносиликатные огнеупоры формуют со связующей добавкой и обжигают при 1450-1550 °С (или используют без обжига).

Основные свойства магнезиальносиликатных огнеупоров: пористость открытая 22-28%, температура начала размягчения под нагрузкой - до 1610-1620 °С.

Магнезиальносиликатные огнеупоры применяют для футеровки насадок регенераторов мартенов, и стекловарных печей, сталеразливочных ковшей (в т.ч. в виде набивных масс), плавильных агрегатов ЦМ, а также для изготовления сталеразливочных стаканов и др. Неформованные

магнезиальносиликатные огнеупоры могут применяться как добавка в металлургических порошках.

Магнезиальношпинелидные огнеупоры имеют в своем составе периклаз и хромшпинелид MgO . Обжигаемые при температуре 1700-1850 °С, периклазохромитовые огнеупоры имеют в своем составе более 60 % MgO , и от 5 до 20 % Cr_2O_3 . Для получения нужных характеристик огнеупора необходим чистый, более 96 %, MgO , а также концентраты хромита.

К магнезиальношпинелидным огнеупорам (также относят: хромитопериклазовые, изготавливаемые из смеси периклазового порошка с хромитовой рудой и содержащие 40-60 % MgO и 15-35 % Cr_2O_3 ; периклазошпинельные (более 40 % MgO и 5-55 % Al_2O_3), шпинельные, состоящие в основном из шпинели состава MgO и Al_2O_3 и хромитовые огнеупоры (более 30 % Cr_2O_3 и более 40 % MgO).

Такие огнеупоры используют в самых ответственных местах металлургических агрегатов: в сталелитейных печах при футеровке сводов, в горловинах и летках кислородных конвертеров, в сталелитейных ковшах, в высокотемпературных печах.

Стоимость магнезиальношпинелидных огнеупоров более низкая, чем магнезиальношпинелидных периклазохромитовых, поэтому первые применяются на менее ответственных участках металлургических агрегатов.

Магнезитоизвестковые - изготавливаются из прошедшего обжиг доломита или из составов, в которые входят окислы магния и кальция. Такие огнеупоры служат для футеровки конвертеров.

Периклазовые огнеупоры - магнезиальные огнеупоры, содержащие более 85 % MgO . Их изготавливают из периклазового порошка с добавлением клеящей связки обжигом при 1600-1900 °С; для безобжиговых периклазовых огнеупоров используют связки из лигносульфонатового сульфата магния и др.

Периклазовые огнеупорные изделия применяют для футеровки стенок мартеновских печей, миксеров, печей для плавки меди и никеля, высокотемпературных нагревательных печей, леток кислородных конвертеров и др., а также в виде плит шиберных затворов сталеразливочных ковшей, стаканов для разлива сталей, пористых фурм для продувки стали газами и т.п. Неформованные периклазовые огнеупоры используют для изготовления мертеля, металлургических (заправочных) порошков, набивных масс для вакууматоров стали, индукционных печей и др.

Периклазоуглеродистые огнеупоры - огнеупоры, изготовленные из периклазового порошка с добавлением 6-25 % природного или искусственного графита и органической связки (например, фенольной порошкообразной с этиленгликолем или бакелита). производятся из спеченного и плавленого периклаза с добавлением 6-25 % графита (натурального или искусственного) и органической связки (например, фенольной с этиленгликолем или бакелита).

Периклазоуглеродистые огнеупоры используются в промышленности для футеровки агрегатов, подающих газ в конвертерах со смешанной продувкой, а

также участков стен мощных электродуговых печей. Широко применяются периклазоуглеродные огнеупоры и в производстве шиберных затворов, а также шлакового пояса электродуговых печей и сталеразливочных ковшей.

Группа Магнезит в 2011 г модернизирует 4 электропечи и увеличит выпуск плавленного периклаза до 50 тысяч тонн в год.

Плавленный периклаз является основой для всех высококачественных огнеупорных изделий и увеличение объемов его производства входит в число ключевых стратегических задач Группы Магнезит.

Отличительной особенностью плавленных материалов являются их высокая плотность и значительная коррозионная стойкость. В технологии огнеупоров плавленные материалы занимают особое место, поскольку позволяют выпускать продукцию повышенной стойкости и развивать высокоэффективные процессы в металлургии, химической технологии, производстве строительных материалов, энергетике, приборостроении и других отраслях промышленности [6].

Алюмопериклазовые огнеупоры сочетают в себе качества углеродсодержащих и высокоглиноземистых огнеупоров. Хорошая термостойкость последних (более высокая, чем у огнеупоров основного состава) повышена введением углеродного компонента.

Алюмопериклазовые огнеупоры изготавливаются с использованием корунда, плавленного или спеченного периклаза, алюмомагнезиальной шпинели, высококачественных спеченных бокситов и крупночешуйчатого графита с различными функциональными добавками. Содержание Al_2O_3 в них превышает 73 %.

Данный вид огнеупорных изделий предлагается как альтернатива к периклазоуглеродистым и высокоглиноземистым огнеупорам, в случае если их стойкость не удовлетворяет техническим условиям. Они используются при футеровке сталеразливочных ковшей и кислородных конвертеров.

Периклазохромитовые изделия содержат более 60 % MgO и 5-20 % Cr_2O_3 . Периклазохромитовые огнеупоры формуют и обжигают при 1700-1850°C. Для высококачественных периклазохромитовых огнеупорных изделий используют MgO чистотой более 96 % и концентраты хромита.

Данный вид огнеупоров характеризуется высокой термостойкостью и стойкостью к фаялитовому шлаку. Они производятся из спеченного и плавленного периклаза с добавлением хромитовой руды. Содержание магнезита колеблется от 65 до 83 %, хромита – от 17 до 35 %.

Хромитопериклазовые огнеупоры используются в цветной металлургии для кладки высокотемпературных печей, в печах взвешенной плавки и обеднения шлаков, для футеровки отражательных печей, конвертеров. Хромитопериклазовые огнеупорные материалы применяются также в средней части насадок регенераторов, работающих при температурах 700-1100 °C.

1.2 Свойства огнеупоров и их влияние на стойкость футеровки

Основное свойство огнеупорных изделий - огнеупорность, т.е. способность изделия противостоять, не расплавляясь, действию высоких температур. Огнеупорность характеризуется температурой, при которой стандартный образец из материала в форме трехгранной усеченной пирамиды высотой 30 мм и сторонами оснований 8 и 2 мм (конус Зейгера) размягчается и деформируется так, что его вершина касается основания. Определенная таким образом температура обычно выше максимально допустимой температуры эксплуатации огнеупорных материалов.

Различают:

- собственно огнеупорные материалы (огнеупорность 1580-1770 °С);
- высокоогнеупорные (1770-2000 °С);
- материалы высшей огнеупорности (выше 2000 °С).

Огнеупоры могут быть общего назначения и для определения тепловых агрегатов и устройств, например, доменные, для сталеразливных ковшей и т.д., что указывается в нормативно-технической документации.

Термическая стойкость — это способность огнеупорных изделий выдерживать резкие колебания температур, не растрескиваясь и не разрушаясь.

Растрескивание или разрушение огнеупорных изделий при резких изменениях температуры объясняется возникновением в них напряжений при уменьшении или увеличении объема.

При нагревании температура наружных слоев огнеупорных изделий (до наступления теплового равновесия) значительно выше, чем внутренних, причем эта разница тем больше, чем меньше их теплопроводность и чем выше скорость повышения температуры при нагревании.

Под влиянием термического расширения при нагревании, т. е. увеличения объема, наружные слои огнеупорных изделий расширяются значительно больше, чем более холодные внутренние слои, при этом в определенных слоях огнеупорных изделий появляются скалывающие напряжения; если по своей величине они превосходят силы сцепления частиц между собой, то в них появляются трещины и отколы.

При охлаждении наружные слои огнеупорных изделий остывают быстрее, чем внутренние, причем уменьшение объема наружных слоев всегда происходит с опережением изменения объема внутренних, более нагретых слоев. Возникающие при этом растягивающие напряжения, так же как и при нагревании огнеупоров, приводят к их растрескиванию и разрушению.

Термическая стойкость кирпича определяется количеством теплосмен, т. е. количеством попеременных нагревов до 1300° С и охлаждений в проточной воде до потери 20% массы первоначально взятого образца вследствие его растрескивания.

Наибольшей термостойкостью обладают многошамотные, корундовые, углеродистые и карборундовые огнеупорные изделия, а наименьшей термостойкостью — динасовые, обладающие большими изменениями объема при превращении одной кристаллической формы в другую в определенных интервалах температур, и магнезитовые, составляющие которых имеют различные коэффициенты расширения.

Термическая стойкость огнеупорных изделий в основном зависит от их структуры и природы исходного сырья, причем, чем меньше температурное изменение объема огнеупорных изделий при резком их нагревании и охлаждении, тем выше термическая стойкость.

Такие особенности огнеупорных материалов, как малая деформативность, небольшая релаксационная способность и хрупкость способствуют возникновению термических напряжений, которые может привести к разрушению материала.

Механическая прочность огнеупорных изделий характеризуется пределом прочности в кгс/см², которую выдерживает образец при сжатии в обычных температурных условиях,

Предел прочности на сжатие огнеупоров определяется их структурой. Чем плотнее, мелкозернистее и однороднее структура огнеупорных изделий, тем меньше в них трещин и тем выше их механическая прочность.

В связи с тем, что механическая прочность огнеупоров связана с их структурой, обуславливающей пористость, шлакоустойчивость, термическую устойчивость и другие качества, предел прочности на сжатие при нормальных условиях является важным показателем. Чем выше предел прочности при сжатии, тем лучше качество огнеупоров. При обычной температуре предел прочности на сжатие находится в пределах от 80 до 1000 кгс/см².

Огнеупорные изделия в тепловых агрегатах в большинстве случаев подвергаются сжатию, в некоторых случаях – истиранию и очень редко – изгибу. Усилия сжатия весьма незначительны, так как возникают под действием собственной массы огнеупорной кладки и обычно не превышают 1 кгс/см² и только в редких случаях достигают 3-4 кгс/см².

Истирающему действию твердыми и жидкими материалами огнеупорные изделия подвергаются в шахтных (доменных, известеобжигательных вагранках) и вращающихся печах, где твердая шихта, загружаемая в печь, непрерывно перемещается, соприкасаясь при этом с кладкой, и разрушает (истирает) ее. Чем выше газопроницаемость и ниже температура деформации огнеупорных изделий под нагрузкой при высоких температурах, тем быстрее происходит ее истирание.

Сопротивление огнеупорных изделий изгибу примерно в 3-5 раз меньше сопротивления сжатию.

В работе [7] приведены результаты испытаний углеродсодержащих огнеупоров производства ОАО «Комбинат Магнезит». В статье указаны характеристики изделий, их стойкость, а также отмечена повышенная

устойчивость огнеупоров к термическому скалыванию при колебаниях температуры. При этом стоит отметить, что такая характеристика, как предел прочности при сжатии (принимая значения от 19 до 61 МПа – для разного вида огнеупоров) приведена только при температуре 20 °С. Таким образом, в заводских данных не показана динамика изменения этого параметра в зависимости от температуры.

При разработке тепловых режимов разогрева высокотемпературных агрегатов, значения многих параметров принимаются для расчётов постоянными, т.е. не зависящими от температуры. Так, зачастую, для расчётов принимают постоянными значения удельной объёмной теплоёмкости c , коэффициента теплопроводности λ и предела прочности σ . Между тем, значение такого параметра, как предел прочности материала на сжатие сильно зависит от температуры. Так, если при температуре 20 °С предел прочности на сжатие шамотного огнеупора составляет 20 МПа, то при 600 °С предел прочности равен уже 40 МПа [8].

Термомеханические свойства определяют, используя высокотемпературные методы с приложением внешних сил. При этом в испытуемом материале возникают механические напряжения. Взаимозависимость напряжения и деформации у огнеупорных материалов при высоких температурах очень сложная, поскольку имеют место не только обратимые, упругие деформации, но и необратимые, пластические, зависящие от времени деформации.

Термомеханическое поведение огнеупоров вследствие этого может рассматриваться как взаимозависимость параметров:

- напряжения;
- деформации;
- температуры;
- времени.

Для определения термомеханических и термотехнических свойств огнеупоров было разработано много методов, но только немногие из них нашли применение в мировой лабораторной практике и были соответственно стандартизированы:

- ISO 1893; ГОСТ 4070-2000 (EN 993-8; DIN 51053): Determination of Refractoriness Under Load (differential - with rising temperature).
- ISO 3187; ГОСТ 4070-2000 (EN 993-9; DIN 51053): Determination of Compression.
- ISO 5013; ГОСТ Р 50523-93 EN 993-7; DIN 51048): Determination of Modulus of Rupture at Elevated Temperatures.
- ISO 8894-1(EN 993-14; DIN 51046): Determination of Thermal Conductivity; Hot-wire Method (cross array; $X < 1,5$ W/mK).
- ISO 8894-2 (EN 993-15): Determination of Thermal Conductivity; Hot-wire Method (parallel; $X < 25$ W/mK).

Один из методов определения термомеханических и термотехнических свойств огнеупоров по ГОСТ 4071.1-94 деформации огнеупоров под

нагрузкой - это мера деформационного поведения огнеупорного материала при постоянном приложенном давлении при комнатной температуре. Измерения проводятся в статической атмосфере при комнатной температуре. Для повышения точности измерений дополнительно прилагается установка для продувки измерительной камеры инертным газом.

Для испытания углеродсодержащих материалов (например, магнезитокарбоновые кирпичей) реализована контролируемая испытательная атмосфера с использованием аппаратуры.

Система с плавно меняющейся нагрузкой устройство нагрузки может быть оборудовано по выбору дополнительно механизмом, позволяющим изменять нагрузку непрерывно. При варьируемой преднагрузке до 300 Н может быть дана дополнительная изменяющаяся нагрузка от 0 до 700 Н со скоростью изменения в интервале 0,3 - 3 Н/с.

Сущность этого метода. Образец для испытаний высверливают из изделия, вырезают или отсекают от одного из его прямых углов по направлению прессования. Если у изделия сложной формы (в том числе клинового) нет прямых углов или оно имеет форму тела вращения, образец изготавливают из его средней части по направлению прессования.

Образец высушивают до постоянной массы при температуре не ниже 110 °С или при температуре, на (15 ± 5) °С превышающей температуру кипения охлаждающей жидкости, применяемой при изготовлении или шлифовании образцов.

Образец или вспомогательное устройство с образцом устанавливают одной из нагружаемых поверхностей на нажимную плиту, обеспечивая центрирование образца. При испытании образцов, изготовленных из высокоплотных изделий или изделий из абразивных масс (глиноземистых, карбидкремниевых), рекомендуется применять картонные прокладки, помещаемые между образцом и нажимными плитами.

Размеры прокладок должны быть не менее чем на 5 мм больше размеров нагружаемых поверхностей испытуемого образца. Образец нагружают равномерно и непрерывно со скоростью $(1,0 \pm 0,1)$ Н/(мм² · с) до разрушения. Допускается увеличивать скорость до $(2,0 \pm 0,1)$ Н/(мм² · с). Регистрируют максимальную нагрузку. Недостаток этого метода при испытаниях огнеупорного материала - отсутствие учёта воздействия температуры.

Существует следующий метод ГОСТ 25085-81 определения прочности на деформацию при высоких температурах.

Термическое растрескивание представляет собой явление, возникающее в результате внутренних (термических, температурных) напряжений, превышающих допустимый предел прочности при данной температуре. Они вызваны различием термического расширения зон футеровки при тепловых ударах или при постоянном большом температурном градиенте. Если скорость разогрева будет такой, при которой в футеровке возникнут температурные напряжения превышающие допустимые пределы, то это

может привести к преждевременному её разрушению. Общепринятая скорость разогрева высокотемпературных агрегатов $60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ [9].

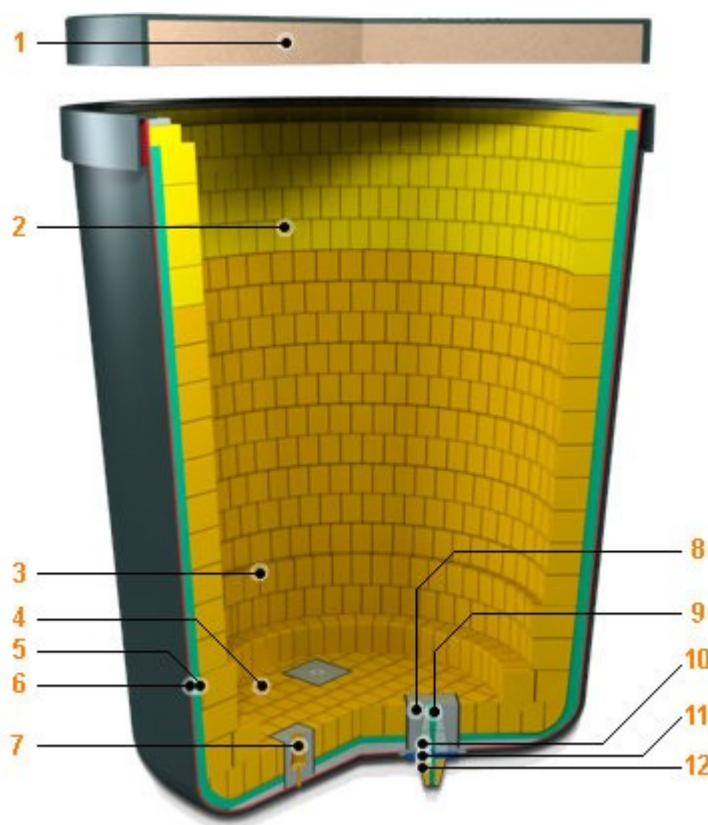
Общие вопросы тепловой работы высокотемпературных агрегатов представлены в литературе достаточно широко. Подробно рассматриваются вопросы термодинамических основ работы печей, радиационных и конвективных режимов работы, тепломассообмена в печах и др. [8, 10].

Волкова О. и Янке Д. в своей работе приводят результаты разработки числовой модели ковша для всестороннего рассмотрения теплового состояния сталеразливочных ковшей с целью оценки остаточной толщины стенки и температурных потерь расплава при различных условиях эксплуатации. Результатом работы является анализ тепловых состояний ковшей с доломитовой и шпинельной футеровкой [11].

1.3 Характеристика объекта исследования

В качестве объекта исследования тепловой работы высокотемпературных агрегатов были выбраны сталеразливочные ковши ёмкостью 25 тонн. Эксплуатация данных ковшей осуществляется на предприятии ПФ ТОО «Кастинг» (г. Павлодар). Ковши предназначены для слива металла из печей, обработки металла на установке печь–ковш до необходимого химического состава и транспортировки металла до машины непрерывного литья заготовок. Среднее время нахождения металла одной плавки в ковше составляет 165 минут. В среднем температура металла в ковше – $1615\text{ }^{\circ}\text{C}$. Общий вид ковша представлен на рисунке 1.1.

Рабочий слой футеровки исследуемого сталеразливочного ковша ёмкостью 25 тонн составляют периклазоуглеродистые огнеупорные материалы. Нижние ряды рабочего слоя футеровки составляют огнеупоры марки PFC – 9806 RA, два верхних ряда и шлаковый пояс – огнеупоры марки PFC – 9812 RA.



Зоны футеровки: 1-крышка фурмы; 2-шлаковый пояс; 3-стены; 4-днище; 5-арматурный слой; 6-теплоизоляционный слой; 7-фурма; 8-гнездовой блок; 9-стартовая смесь; 10-сталеразливочный стакан; 11-шиберная плита; 12-стакан-коллектор

Рисунок 1.1 – Общий вид 25 – тонного сталеразливочного ковша: 1 – разливочный стакан; 2 – продувочная пробка.

В таблице 1.2 приведены состав и некоторые характеристики используемых огнеупоров.

Таблица 1.2 – Состав и характеристики огнеупоров

Маркировка	Состав, %		Кажущаяся плотность, г/см ³	Открытая пористость, %	Предел прочности на сжатие, МПа
	MgO	C			
1	2	3	4	5	6
PFC – 9806 RA	≥ 80	≥ 8	≥ 3,05	≤ 4	≥ 40
PFC – 9812 RA	≥ 78	≥ 12	≥ 2,98	≤ 4	≥ 40

Футеровка ковша состоит из четырёх слоёв. Слой 1, непосредственно соприкасающийся с расплавленным металлом (рабочий слой), выложен

огнеупорными кирпичами толщиной 135 мм (шлаковый пояс – 150 мм). Слой 2 теплоизоляции состоит из набивной муллито – корундовой массы, толщиной 30 мм. Третий слой выложен из шамотного кирпича ШБ – 5 и имеет толщину 65 мм. Последний слой 4, соприкасающийся с кожухом ковша, представляет собой листы асбокартона, толщиной 10 мм (рисунок 1.2).

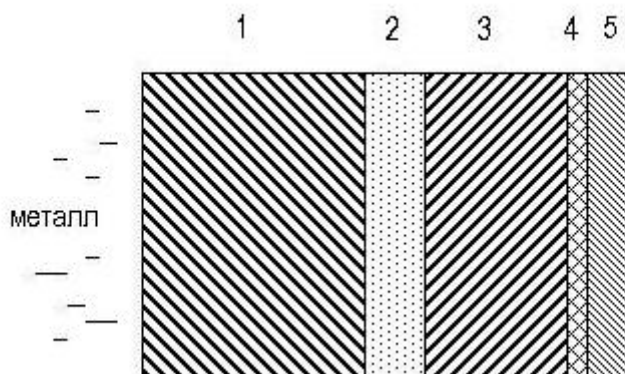
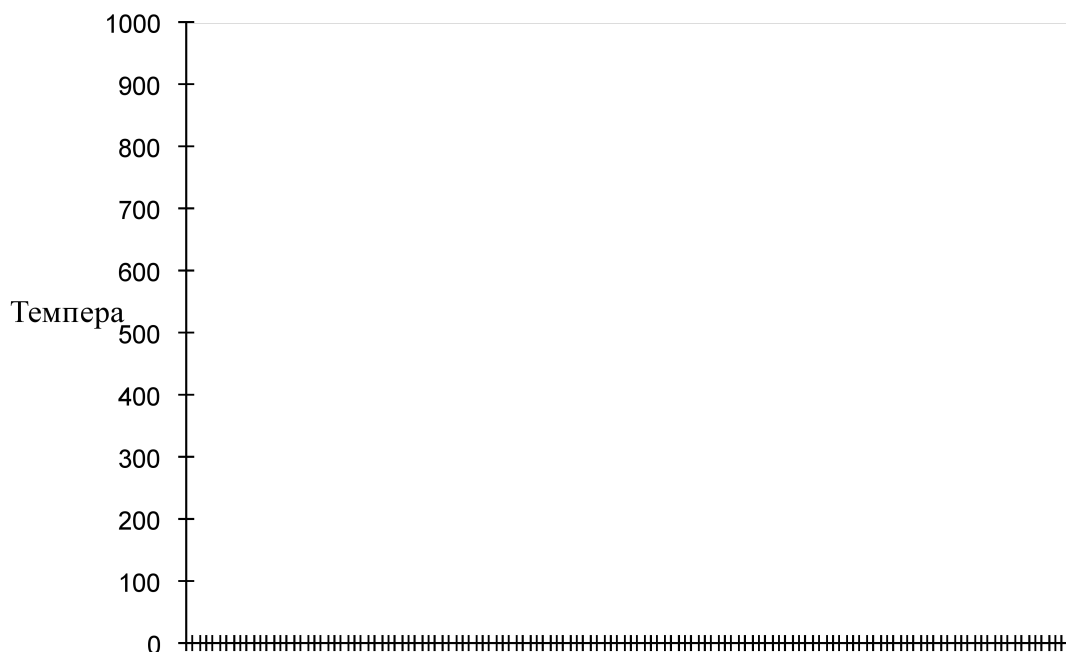


Рисунок 1.2 – Футеровка стен сталеразливочного ковша: 1 – рабочий слой; 2 – теплоизоляция; 3 – арматурный слой; 4 – асбокартон; 5 – металлический кожух.

Сушка и разогрев сталеразливочных ковшей производится газом на специальных стендах. При разогреве ковша не производится контроль температуры, т.к. стационарный контроль температуры технологически затруднён, а установка термодпар непосредственно в футеровке может привести к аварийной ситуации, связанной с протечкой металла через футеровку и расплавлению кожуха.

Для исследования процесса нагрева ковша были произведены замеры температур внутренней поверхности футеровки [12]. Графики нагрева представлены на рисунке 1.3. Кривая 1 соответствует измерению температуры на 2/3 высоты ковша, а кривая 2 – на подине.



Графики нагрева являются ступенчатыми. Видна временная выдержка, соответствующая температуре 350 – 400°C (кривая 1) и 150 – 200°C (кривая 2).

Эксплуатация ковшей при использовании данной футеровки показывает, что средняя продолжительность работы ковшей до промежуточного ремонта составляет в среднем 22 плавки. Причины вывода ковшей в промежуточный ремонт: износ огнеупорной кладки шлакового пояса и неудовлетворительное состояние буферной массы над шлаковым поясом. Остаточная толщина огнеупоров шлакового пояса перед выводом ковша в промежуточный ремонт составляет в среднем 97 мм. Средняя продолжительность работы ковшей до капитального ремонта составляет 40 плавок, при одном промежуточном ремонте (замена верхних рядов огнеупоров).

Футеровка ковша в холодном состоянии при выводе его в капитальный ремонт не имеет монолитной структуры. Наблюдаются вертикальные трещины, проходящие через все ряды кладки. Трещины проходят через стыки кирпичей и располагаются по окружности ковша через каждые 5 – 7 кирпичей (50 – 70 см). Средняя толщина трещин составляет 3 мм. Трещины образуются вследствие термического расширения огнеупоров. Кладка рабочего слоя осуществляется без связующего раствора между кирпичами. Кроме того, в кладке не предусмотрены температурные швы.

Выводы:

1) Надежная эксплуатация высокотемпературных агрегатов зависит от качества огнеупорных материалов. Кроме того, основным условием

долговечности футеровки металлургического агрегата является анализ экспериментальных данных различных режимов разогрева футеровок при использовании разнообразных огнеупорных материалов.

2) В настоящее время наблюдается увеличение потребления магнезитовых огнеупорных материалов, как огнеупоров, имеющих высокие термомеханические показатели при относительно невысокой стоимости.

3) Объект исследования – сталеразливочный ковш, ёмкостью 25 тонн, при разогреве и эксплуатации имеет ряд проблем, связанных с температурными режимами; следствием чего является наличие трещин в магнезитовом рабочем слое футеровки.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО АГРЕГАТА

2.1 Теории прочности материалов

При решении вопросов повышения стойкости футеровки различных высокотемпературных агрегатов необходимо провести анализ причин, приводящих к разрушению огнеупорных материалов, а также создать модель тепловой работы футеровки в целом.

Анализ условий работы различных типов промышленных печей показывает, что механизм разрушения футеровок достаточно многообразен, но можно выделить одну общую причину – это наличие значительных градиентов температуры, возникающих в кладке печей.

Существует ряд теорий и гипотез, предложенных для вычисления критериев предельного состояния. Рассмотрим наиболее значимые из них.

Как показывают экспериментальные исследования, прочность материалов существенно зависит от вида напряженного состояния. В общем случае нагруженного тела напряженное состояние в какой-либо точке вполне может быть определено величиной напряжений в трех координатных плоскостях, проходящих через эту точку. При произвольном выборе положения координатных плоскостей, в каждой из них, вообще говоря, имеются и нормальные, и касательные напряжения. Для них вводятся соответствующие обозначения в плоскости xy : s_{zz} , t_{zx} , t_{zy} ; в плоскости xz : s_{yy} , t_{yx} , t_{yz} ; в плоскости yz : s_{xx} , t_{xy} , t_{xz} . Здесь первый индекс показывает ориентацию площадки, в которой действует напряжение, т.е. какой из координатных осей она перпендикулярна. Второй индекс указывает направление напряжения по координатной оси.

В каждой точке тела существуют три взаимно перпендикулярные плоскости, свободные от касательных напряжений, носящие название главных площадок. Нормальные напряжения в этих площадках называются главными напряжениями и обозначаются s_1 , s_2 , s_3 . При этом всегда $s_1 > s_2 > s_3$. Заметим, что более подробно вопросы теории напряженного состояния в точке обсуждены в десятом разделе настоящей книги, и по данному вопросу имеется обширная литература.

Напряженные состояния разделяются на три группы. Напряженное состояние называется:

- а) объемным или трехосным, если все главные напряжения s_1 , s_2 , s_3 не равны нулю;
- б) плоским или двухосным, если одно из трех главных напряжений равно нулю;
- в) одномерным или одноосным, если два из трех главных напряжений равны нулю.

Основной задачей теории прочности является установление критерия прочности, позволяющего сравнить между собой опасность различных напряженных состояний материала.

Выбранный критерий прочности должен быть обоснован на основе экспериментальных данных путем проведения испытаний различных материалов в зависимости от вида напряженного состояния, как функция от соотношений между значениями главных напряжений.

Заметим, что, так как в настоящее время строгой единой теории прочности материалов, в зависимости от вида напряженного состояния, не существует, поэтому при выполнении практических расчетов применяются упрощенные критерии.

В настоящее время при выполнении расчетов конструкций на прочность, при произвольных напряженных состояниях, широко используются теории прочности.

Перечислим наиболее известные в сопротивлении материалов теории прочности.

- Первая теория прочности — Теория наибольших нормальных напряжений.
- Вторая теория прочности — Теория наибольших деформаций.
- Третья теория прочности — Теория наибольших касательных напряжений.
- Четвертая теория прочности (энергетическая) — Теория наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения.
- Теория прочности Мора — [Теория предельных напряжённых состояний](#) (иногда говорят — V теория прочности).

Из всех вышеперечисленных теорий прочности наиболее полной, точной и всеобъемлющей является теория Мора. Все её положения были проверены экспериментально. Она подходит как для проверки прочности хрупких материалов (чугун, бетон, кирпич), так и для проверки на прочность пластичных материалов (низкоуглеродистая сталь). Теория наибольших нормальных напряжений и теория наибольших деформаций подходит только для прочностного анализа хрупких материалов, причём только для каких-то определённых условий нагружения, если требовать повышенную точность расчёта. Вот поэтому первые две теории прочности сегодня применять не рекомендуется. Результаты теории наибольших касательных напряжений и теории наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения можно получить в некоторых частных случаях нагружения при применении теории Мора.

В зависимости от условий нагружения материал может находиться в различных механических состояниях: упругом, пластическом и в состоянии разрушения. Под предельным подразумевают такое напряженное состояние, при котором происходит качественное изменение свойств материала — переход от одного механического состояния к другому. Для пластических материалов предельным считается напряженное состояние, соответствующее заметным остаточным деформациям, а для хрупких — такое, при котором начинается разрушение материала.

При линейном напряженном состоянии предельное значение единственного в этом случае главного напряжения может быть непосредственно определено из опыта (σ_T – для пластических материалов и σ_B – для хрупких). Поэтому оценка прочности в этом частном случае проста. В случае сложного напряженного состояния (объемного или плоского) при оценке прочности необходимо учитывать наличие двух или трех отличных от нуля главных напряжений. При этом опасное состояние материала зависит не только от величины главных напряжений, но и от соотношений между ними.

Из-за невозможности экспериментального определения критериев опасного состояния материала при сложном напряженном состоянии пользуются гипотезами, формулирующими условия перехода материала в опасное состояние. На основании таких гипотез построены теории прочности. Эти теории исходят из предпосылок о том, что сложное и линейное напряженные состояния считаются эквивалентными (по прочности), если они при пропорциональном увеличении главных напряжений в одно и то же число раз одновременно становятся опасными. Поэтому оценка прочности материала при любом напряженном состоянии основывается на результатах опытов при простом растяжении (сжатии), и исследуемое напряженное состояние сравнивается с линейным. Для материалов с выраженной пластичностью за опасное (предельное) состояние принимается такое, при котором начинают развиваться остаточные деформации. Для материалов, находящихся в хрупком состоянии, опасным считается такое состояние, которое предшествует началу появления трещин.

Общая запись условия прочности при сложном напряженном состоянии имеет вид:

$$\sigma_{пр} \leq [R], \text{ или } \sigma_{пр} \leq [\sigma],$$

где $\sigma_{пр}$ — расчетное или приведенное напряжение при сложном напряженном состоянии.

Формулы приведенных напряжений устанавливаются теориями прочности в зависимости от принимаемых гипотез.

О применимости той или иной теории прочности для практических расчетов можно сказать следующее.

Разрушение материалов происходит путем отрыва за счет растягивающих напряжений или удлинений и путем среза за счет наибольших касательных напряжений. При этом разрушение отрывом может происходить при весьма малых остаточных деформациях или вовсе без них (хрупкое разрушение). Разрушение путем среза имеет место лишь после некоторой остаточной деформации (вязкое разрушение). Таким образом, первую и вторую теории прочности, отражающие разрушение отрывом, можно применять лишь для материалов, находящихся в хрупком состоянии. Третью и четвертую теории прочности, хорошо отражающие наступление текучести и разрушение путем

среза, надлежит применять для материалов, находящихся в пластическом состоянии.

Так как первая и вторая теории прочности обладают существенными недостатками, то в настоящее время утверждается мнение о нежелательности их применения. Таким образом, для практических расчетов следует рекомендовать четвертую (или третью) теорию прочности для материалов, одинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию, и теорию Мора — для материалов, различно ее проявляющихся растяжению и сжатию, т. е. для хрупких материалов (для них в настоящее время пока еще применяют и вторую теорию прочности).

Следует подчеркнуть, что состояние материала (хрупкое или пластическое) определяется не только его свойствами, но и видом напряженного состояния, температурой и скоростью нагружения. Как показывают опыты, пластичные материалы при определенных условиях нагружения и температуре ведут себя, как хрупкие, в то же время хрупкие материалы в определенных напряженных состояниях могут вести себя, как пластичные. Так, например, при напряженных состояниях, близких к всестороннему равномерному растяжению, пластичные материалы разрушаются, как хрупкие. Такие напряженные состояния принято называть «жесткими». Весьма «мягкими» являются напряженные состояния, близкие к всестороннему сжатию. В этих случаях хрупкие материалы могут вести себя, как пластичные. При всестороннем равномерном сжатии материалы могут выдержать, не разрушаясь, очень большие давления.

Кинетическая теория прочности подчеркивает необходимость учета влияния теплового движения (флуктуации тепловой энергии) на процессы деформирования и разрушения, особенно в их начальной стадии [13]. Процесс разрушения при нагрузках ниже критической не может происходить при отсутствии теплового движения атомов и молекул, которое является фактором, принципиально обуславливающим разрыв материала при нагрузках, меньших критической. Можно сделать вывод, что разрушение следует рассматривать как процесс, в котором вследствие тепловых флуктуации преодолевается энергетический барьер U_0 , сниженный в результате действия напряжений на величину $-U_a$. При этом процесс разрушения представляет собой ряд элементарных актов, связанных с тепловым движением атомов и молекул.

По кинетической теории прочности следует, что время, в течение которого объект может эксплуатироваться при максимальной нагрузке, должно совпадать с величиной, обратной частоте тепловых колебаний атомов. Резерв прочности материалов, таким образом, огромен, а степень его освоения зависит от уровня развития технологии и от уровня развития науки о прочности.

Согласно развиваемой С. Н. Журковым кинетической теории прочности твердых тел, нагруженный образец разрушается за счет хаотического теплового движения. Непрерывно возникающие дефекты кристаллической

решетки уже не рассасываются, а начинают скапливаться, образуя микроскопические, а затем и макроскопические разрывы в образце. Чем выше температура и больше приложенная нагрузка, тем быстрее накапливаются эти нарушения и тем раньше разрушается образец.

В соответствии с этой теорией, основанной на экспериментальных данных, разрушение различных материалов рассматривается как процесс, развивающийся во времени при приложении внешней силы.

Структура ряда широко используемых критериев кинетической теории прочности применительно к процессам динамического нагружения аналогична критерию С. Н. Журкова, в основу которого положен принцип температурно - временной суперпозиции.

Такой механизм разрушения объясняет смысл термина кинетическая теория прочности: разрушения в напряженном полимере как результат постепенной термомеханодеструкции макромолекул накапливаются до тех пор, пока не создадутся условия, обеспечивающие разрушение всего образца.

Теория Гриффитса. Разница между теоретической и практической прочностями по Гриффитсу заключается в том, что в реальных телах имеются многочисленные трещины (трещины Гриффитса), концентрирующие напряжения так, что на участках, свободных от трещин, напряжения достигают критических значений, равных и превышающих теоретическую прочность. Напряжение материала у трещины неодинаково, на остром конце трещины оно больше и равно:

$$\sigma_{\max} = 2\sigma_{cp} \sqrt{\frac{l}{r}} \quad (2.1)$$

где σ_{cp} — среднее напряжение в материале;

l — длина трещины около 10^{-4} см;

r — радиус кривизны кончика трещины равен приблизительно межатомному расстоянию $\approx (1-4)A^0$; $\left(\frac{l}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 10^2$, т.е. $\sigma_{\max}$ на два порядка больше σ_{cp} .

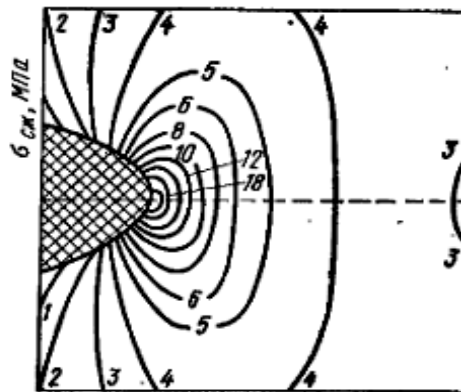


Рисунок 2.1 - Концентрация напряжений вблизи концевой части эллиптической трещины

Таким образом, при сравнительно небольшой величине среднего напряжения в материале на кончике трещины возникает большое локальное напряжение, приводящее к росту трещины. Растягивающие напряжения направлены перпендикулярно к трещине. Заштрихованная область представляет собой трещину. Цифры на кривых постоянного напряжения показывают, во сколько раз местное напряжение больше среднего.

Поры не только концентрируют напряжения, но и экранируют часть материала от напряжений. В самом деле материал, непосредственно расположенный над порой или под порой, испытывает гораздо меньшее напряжение, чем остальной материал, а материал между порами при этом будет испытывать еще большее напряжение. Экранизация напряжений в большей степени проявляется крупными порами.

Теория «двух стадий». По этой теории разрушение материалов под влиянием термических напряжений происходит в две стадии: зарождения трещин и их роста. Критерии термостойкости R , R^I и R^{II} относятся к стадии зарождения трещин.

Теория двух стадий не опровергает теорию максимальных напряжений, а развивает ее. Зародившаяся трещина в гетерогенных материалах, какими являются большинство огнеупоров, развивается медленно, а может и вообще не развиваться. По теории Гриффитса, трещины будут расти в том случае, если упругая энергия, освободившаяся из напряженной области, будет больше энергии, необходимой для создания двух новых поверхностей раздела.

По Хассельману, критерии распространения трещин выражаются следующими формулами [14]:

$$R^{III} = \frac{E}{[\sigma_{пч}^2 (1-\mu)]}; \quad (2.2)$$

$$R^{IV} = R^{III} \cdot \nu_{эф} \quad (2.3)$$

где $\nu_{эф}$ — эффективная энергия, необходимая для создания двух новых поверхностей раздела.

Чтобы трещины не развивались, материал должен обладать высоким значением модуля упругости и низкой прочностью, а чтобы трещины не зарождались, модуль упругости должен быть низким, прочность высокой.

Кажущееся противоречие, в самом деле, не является противоречием. В гетерогенном материале трещины зарождаются в твердых фазах, и, чтобы трещины в них не зарождались, эти фазы должны иметь высокую прочность, а распространяются трещины во всем объеме многофазного материала: по твердым фазам и порам. Напряжения в порах гасятся. Для того чтобы трещины не развивались, материал должен иметь поры, а следовательно, в целом быть менее прочным.

Трещины, зарождающиеся при термоударах в магнезите и хромите, гасятся в порах определенного строения.

Критерий R^{IV} удовлетворительно описывает термостойкость огнеупоров микротрещиноватой текстуры и не подходит или не всегда подходит к оценке термостойкости зернистых материалов, хотя оба вида текстур относятся к гетерогенным.

Гогоци Г.А. предложил классифицировать огнеупоры по их отношению к термостойкости не степени гетерогенности, а по мере хрупкости [15]. Термостойкость с учетом меры хрупкости выражается формулой:

$$R^* = R(3 + \chi) / 4\chi . \quad (2.4)$$

2.2 Постановка задачи

Срок безаварийной работы любого теплоэнергетического агрегата во многом определяется прочностью футеровки, поэтому, несмотря на многочисленные исследования, вопрос о повышении её стойкости остаётся одним из наиболее важных. Обеспечение рациональных с точки зрения напряжённо–деформированного состояния условий эксплуатации составляющих её конструктивных элементов – один из путей повышения стойкости футеровки в целом.

Анализ проведённых исследований показывает, что существует множество причин, вызывающих разрушение футеровок теплоэнергетических агрегатов. Несмотря на это, можно выделить одну общую причину – наличие значительных градиентов температуры, возникающих при работе оборудования [16].

Наиболее напряжённым периодом в работе футеровки является разогрев. Именно в этот период возникают максимальные температурные перепады и изменяется температурный коэффициент расширения.

В процессе нагрева футеровка теплоэнергетических агрегатов подвергается интенсивному воздействию высоких температур и тепловых потоков. Это вызывает значительный перепад температур по толщине кладки и появление больших температурных напряжений и деформаций, приводящих к её растрескиванию. Глубина проникновения трещин определяется конструкцией агрегата, его размерами и материалом футеровки. Появление трещин уменьшает огнеупорные свойства материалов и ведёт к более интенсивному износу футеровки в целом.

Огнеупорные материалы в сталеразливочных ковшах используются в качестве высокотемпературной тепловой изоляции без существенных механических нагрузок. Это означает, что при анализе их разрушений можно пренебречь действием механических нагрузок и ограничиться рассмотрением тепловых воздействий.

В процессе эксплуатации сталеразливочных ковшей футеровка периодически нагревается в условиях наполнения жидкой сталью при высокой температуре и охлаждается при её разливе. Разность температур между сталью и подогретой футеровкой может достигать до 800 °С и более. Большая скорость изменения температуры футеровки при нагреве и охлаждении приводит к растрескиванию или отслаиванию поверхностного слоя.

Другими словами, если огнеупорная кирпичная стенка подвергается одностороннему нагреву, то с повышением температуры нагреваемой поверхности возрастает её расширение. Участок поверхности нагрева, испытывающий наибольшее расширение, разрушается под действием возникающего напряжения, поскольку максимальное давление, порождаемое расширением, превышает предел прочности этого участка при сжатии.

В общем случае термонапряжённое состояние рабочего слоя футеровки теплоэнергетического агрегата математически описывается следующими системами уравнений [17]:

1) Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho \cdot c}, \quad (2.5)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 q_v – мощность внутренних источников тепла, Вт/м³;
 ρ – плотность вещества, кг/м³;
 c – теплоёмкость вещества, Дж/(кг·К).

2) Уравнениями равновесия

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

3) Зависимостями между напряжениями и деформациями

$$\begin{aligned} E_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha T, \\ E_{yy} &= \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha T, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$E_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})] + \alpha T,$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2G} \sigma_{xy}; \quad E_{yz} = \frac{1}{2G} \sigma_{yz}; \quad E_{zx} = \frac{1}{2G} \sigma_{zx}.$$

4) Зависимостями между деформациями и перемещениями

$$E_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad E_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad E_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z},$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right),$$

(2.8)

$$E_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right),$$

$$E_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} \right)$$

Наибольшее практическое значение имеет задача в квазистатической постановке, когда не учитываются инерционные эффекты, так как динамические эффекты, обусловленные нестационарным нагревом, и тепловые потоки, образующиеся вследствие деформации, настолько малы, что ими можно пренебречь.

При таких допущениях исходные уравнения и зависимости (2.5 – 2.8) распадаются на уравнение теплопроводности и задачу о термоупругих напряжениях при заданном температурном поле. Таким образом, необходимо определить компоненты напряжений при известном распределении температур по толщине футеровки. Эти функции в каждой точке тела удовлетворяют исходным уравнениям (2.5 – 2.8) и граничным условиям. При этом тело считается идеально упругим и изначально однородным.

Напряжения, возникающие в слое футеровки, определим, рассмотрев зависимость между термоупругими напряжениями и деформациями.

$$E_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha T(x, y, z, t),$$

$$E_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha T(x, y, z, t),$$

(2.9)

$$E_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})] + \alpha T(x, y, z, t),$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2G} \sigma_{xy}; \quad E_{yz} = \frac{1}{2G} \sigma_{yz}; \quad E_{zx} = \frac{1}{2G} \sigma_{zx}.$$

При этом температура по толщине рабочего слоя изменяется по закону $T = f(y)$. В данном случае компоненты напряжения будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma; \\ \sigma_{zz} &= \sigma_{xz} = \sigma_{yx} = \sigma_{zy} = 0.\end{aligned}\tag{2.10}$$

С учётом того, что $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$; $\sigma_{zy} = \sigma_{yz}$; $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$ [15] система уравнений (2.5 – 2.9) примет вид:

$$\begin{aligned}E_{xx} &= \frac{1}{E}(\sigma - \nu \cdot \sigma) + \alpha T(y, t), \\ E_{yy} &= \frac{1}{E}(\sigma - \nu \cdot \sigma) + \alpha T(y, t), \\ E_{zz} &= -\frac{1}{E}(2 \cdot \nu \cdot \sigma) + \alpha T(y, t).\end{aligned}\tag{2.11}$$

При рассмотрении каждого слоя футеровки в отдельности деформацию этого слоя принимаем равной нулю ($E_{xx} = E_{yy} = E_{zz} = 0$). Таким образом, в качестве основной расчётной формулы для определения температурных напряжений будем использовать равенство [18]:

$$\sigma = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \cdot T(y, t)\tag{2.12}$$

Функция распределения температуры в рабочем слое футеровки будет иметь вид:

$$T(y, t) = T_{cp} - T_i,\tag{2.13}$$

где T_{cp} – среднеинтегральная температура, °C,
 T_i – температура в рассматриваемой точке, °C.

2.3 Выбор схемы расчёта температурных полей

Расчёт термонапряжённого состояния тела разбивается на две задачи: расчёт температурного поля тела во времени и расчёт непосредственно температурных напряжений. При расчёте температурных напряжений первым этапом необходимо подсчитать распределение температур по сечению футеровки в данный момент времени. Для этого используется математическое моделирование тепловых процессов, происходящих в теплоэнергетических агрегатах, основанное на их математическом описании.

Применение высококачественных математических моделей приносит значительный эффект. Они позволяют проводить исследования процессов, происходящих в агрегатах, при меньших затратах, чем практические исследования на реальных агрегатах или физических моделях. С помощью математических моделей можно ещё на стадии проектирования найти оптимальное конструктивное оформление агрегата и выбрать оптимальные режимные параметры его работы.

Процесс распространения тепла в футеровке ковша является нестационарным, поэтому для решения задачи нестационарной теплопроводности применим метод конечных разностей [19].

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho \cdot c}, \quad (2.14)$$

При этом уравнение теплопроводности будет иметь бесчисленное множество решений. Чтобы из этого множества выделить одно решение, соответствующее единичному явлению данного класса, необходимо знать условия однозначности. В условия однозначности входят геометрические условия, определяющие форму и размер тела; начальные условия, то есть распределение температуры в объёме тела в некоторый момент времени $\tau=0$, принимаемый за начало отсчёта; граничные условия, характеризующие тепловое взаимодействие окружающей среды с поверхностью тела.

В данном случае, с учётом известных температур, на внутренней поверхности футеровки будем иметь граничные условия 1 рода:

$$T|_{y=0} = T_i. \quad (2.15)$$

На внешней поверхности футеровки будем иметь граничные условия 3 рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=H} = \alpha (T_o - T|_{y=H}) \quad (2.16)$$

Начальные условия будут представлены заданным начальным распределением температур в футеровке:

$$T(y) = T_n, \quad 0 \leq y \leq H \quad (2.17)$$

Для решения задачи внутреннего теплообмена в рабочем слое футеровки примем некоторые допущения. В случае нагрева сталеразливочного ковша будем считать размеры в направлении осей x и z неограниченными, а толщину в направлении оси y конечной. Температура изменяется только по толщине, внутренних источников тепла нет. С учётом того, что $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$,

математическая формулировка одномерной задачи теплопроводности будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad 0 < y < H, \quad (2.18)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Разобьём всю толщину футеровки H на n конечных элементарных слоёв, толщина каждого из которых равна Δy , то есть:

$$H = n \cdot \Delta y. \quad (2.19)$$

Отсчёт времени будем вести конечными интервалами $\Delta \tau$. Тогда производную температуры по времени в левой части уравнения (2.18) можно приближённо выразить через конечные приращения температуры и времени следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \approx \frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta \tau}, \quad (2.20)$$

где T_{i+1}^k – температура некоторого k – го элементарного слоя в момент времени $i+1$, то есть по прошествии времени $\tau = (i+1) \cdot \Delta \tau$ с начала процесса;

T_i^k – температура того же k – го слоя в предыдущий, то есть в k – тый момент времени.

Точно также первую производную температуры по координате y можно представить как:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_1 \approx \frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\Delta y}, \quad (2.21)$$

то есть как приращение температуры по координате, отнесённое к приращению координаты. Здесь T_i^k – температура k – го элементарного слоя в i – тый момент времени, а T_i^{k-1} – температура предыдущего $(k-1)$ – го слоя в тот же момент времени.

Очевидно, что соседнее, то есть взятое через отрезок Δy , значение этой производной будет иметь вид:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_2 \approx \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta y}. \quad (2.22)$$

Разность между двумя этими величинами, отнесённая к отрезку Δy , даст конечно-разностное выражение для второй производной температуры по координате:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_2 - \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_1}{\Delta y}, \quad (2.23)$$

или

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_i^{k+1} - 2 \cdot T_i^k + T_i^{k-1}}{\Delta y^2}. \quad (2.24)$$

Подставляя выражения (2.20) и (2.24) вместо соответствующих производных в уравнение (2.18), получим это уравнение в конечно-разностном виде:

$$\frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta \tau} = a \cdot \frac{T_i^{k+1} - 2 \cdot T_i^k + T_i^{k-1}}{\Delta y^2}. \quad (2.25)$$

Так как в задачах нестационарной теплопроводности всегда известно начальное распределение температуры, цель расчётов методом конечных разностей заключается в том, чтобы зная распределение температуры в данный, например i – тый, момент времени, найти это распределение в последующий, то есть в $(i+1)$ – й момент. Таким образом, искомой величиной в уравнении (2.25) является температура k – того элементарного слоя в $(i+1)$ – й момент времени, которую можно выразить через температуры любых слоёв, но обязательно в предыдущий (то есть в i – тый) момент времени.

Основная идея метода конечных разностей (метода сеток) заключается в том, что непрерывная область изменения пространственной переменной $0 \leq y \leq H$ заменяется конечной совокупностью дискретно расположенных узловых точек $y_1, y_2, \dots, y_n, y_{n+1}$. При равномерном расположении этих точек на отрезке $[0, H]$ их координаты равны $y_i = (i-1)\Delta y$ при $i = 1, \dots, n+1$, где расстояние между соседними точками (шаг по координате) $\Delta y = H / n$. Аналогичным образом, вместо непрерывного изменения температурного поля во времени рассматриваются значения температуры в фиксированные моменты времени $\tau_k = k\Delta \tau$, $k = 1, 2, \dots$, где $\Delta \tau$ – интервал между двумя последовательными моментами времени (шаг по времени).

В плоскости (y, τ) совокупность узловых точек с координатами (y_i, τ_k) образует прямоугольную сетку, и расчёт температурного поля $T(y, \tau)$ сводится к отысканию сеточной функции T_i^k , приближённо характеризующей температуру тела в узловых точках. При замене непрерывной функции $T(y, \tau)$ дискретной сеточной функцией T_i^k необходимо заменить дифференциальное уравнение теплопроводности с соответствующими краевыми условиями

системой алгебраических (разностных) уравнений, связывающих значения сеточной функции в соседних узловых точках. Такая система алгебраических уравнений, являющаяся приближённой математической моделью процесса теплопроводности, называется разностной схемой решения исходной краевой задачи.

Таким образом, уравнение (2.25) является разностным аналогом дифференциального уравнения теплопроводности. Решение уравнения (2.25) может быть произведено различными путями. Получающиеся при этом разностные схемы могут значительно отличаться друг от друга в отношении точности и эффективности. Рассмотрим эффективность некоторых из них [19]:

а) Явная разностная схема.

Из уравнения (2.25) после ряда преобразований получаем ряд уравнений, характеризующих явную разностную схему:

$$T_{n+1}^{k+1} = 2fT_n^k + [1 - 2f(1+b)]T_{n+1}^k + 2fbT_0 \quad (2.26)$$

$$T_i^{k+1} = fT_{i-1}^k + (1-2f)T_i^k + fT_{i+1}^k \quad (2.27)$$

где:

$$b = \frac{\alpha \Delta y}{\lambda}, \quad f = \frac{a \Delta \tau}{\Delta y^2} \quad (2.28)$$

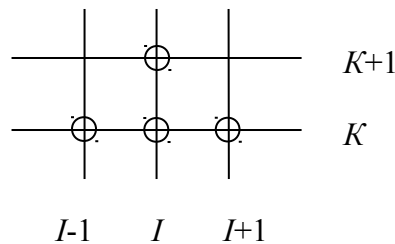


Рисунок 2.2 – Четырёхточечный шаблон, соответствующей явной разностной схеме.

То есть в каждый $(k+1)$ – й момент времени новые значения температуры T_i^{k+1} определяется тремя её значениями: T_{i-1}^k ; T_i^k ; T_{i+1}^k в предыдущий k – тый момент времени. Таким образом, используя приведённые разностные уравнения, можно, последовательно переходя от k – го к $(k+1)$ – му моменту времени, произвести расчёт дискретного температурного поля. Особенностью явной разностной схемы является то, что она распадается на отдельные уравнения, решение которых производится независимо друг от друга, причём вычисление новых значений температур в каждый момент времени производится по явным формулам.

Погрешность аппроксимации явной разностной схемы (сходимость) равна [19]:

$$\nu = O(\Delta y^2 + \Delta \tau), \quad (2.29)$$

то есть, имеет второй порядок точности по координате и первый порядок по времени.

Недостатком явной разностной схемы является ограничение выражения:

$$f \leq 1/[2 \cdot (1+b)] \quad (2.30)$$

на величину параметра:

$$f = a \cdot \Delta \tau / \Delta y^2. \quad (2.31)$$

Что требует выбора достаточно малого шага Δy , обусловленного необходимостью детального описания температурного поля. Кроме того, поскольку максимально допустимая величина шага $\Delta \tau$ уменьшается при возрастании параметра:

$$b = \alpha \cdot \Delta y / \lambda, \quad (2.32)$$

Ограничение (2.32) становится особенно обременительным при описании процессов, характеризующихся высокой интенсивностью внешней теплоотдачи.

б) Неявная четырёхточечная разностная схема.

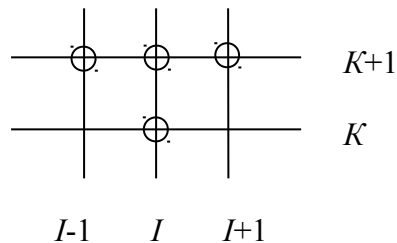


Рисунок 2.3 – Четырёхточечный шаблон, соответствующей неявной разностной схеме.

Решение системы неявных разностных уравнений производится в следующей последовательности. Сначала, перемещаясь по сетке, слева направо вычисляем значения коэффициентов α_i и β_i (прямая прогонка), по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{2 \cdot f}{1 + 2 \cdot f}, \quad \beta_1 = \frac{T_1^k}{1 + 2 \cdot f}, \quad (2.33)$$

$$\alpha_i = \frac{f}{1 + f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}, \quad \beta_i = \frac{T_i^k + f \cdot \beta_{i-1}}{1 + f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}. \quad (2.34)$$

Затем, после нахождения температуры в правом граничном узле, перемещаясь по сетке справа налево, определяем искомые значения температур (обратная прогонка) по формуле:

$$T_i^{k+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{k+1} + \beta_i \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.35)$$

После этого производится переход к очередному шагу по времени, и вся описанная процедура повторяется. При реализации метода прогонки значение коэффициентов β_i необходимо пересчитывать на каждом шаге по времени в соответствии с изменением температур T_i^k , а коэффициенты α_i , остающиеся неизменными в течение всего расчёта, могут быть вычислены заранее.

Поскольку неявная разностная схема аппроксимирует исходную задачу теплопроводности и является устойчивой, она сходится, причём скорость её сходимости равна:

$$\nu = O(\Delta y^2 + \Delta \tau). \quad (2.36)$$

В безусловной устойчивости неявных разностных схем заключается весьма существенное их преимущество перед явной схемой. Поскольку при заданном шаге по координате выбор шага по времени в этих схемах определяется только соображениями допустимой погрешности расчёта, при решении многих практических задач его величина может иметь гораздо большее значение, чем при использовании явной разностной схемы.

в) Неявная шеститочечная разностная схема.

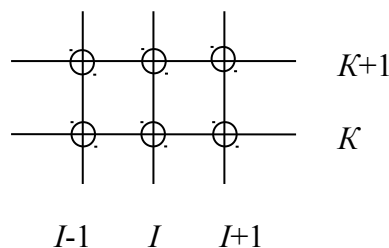


Рисунок 2.4 – Шеститочечный шаблон, соответствующей неявной разностной схеме.

Система линейных алгебраических уравнений, соответствующих неявной шеститочечной схеме решается также методом прогонки. Формулы для расчета прогоночных коэффициентов следующие:

$$\alpha_1 = \frac{f}{1+f}, \quad \beta_1 = \frac{(1+f) \cdot T_1^k + f \cdot T_2^k}{1+f} \quad (2.37)$$

$$\alpha_i = \frac{0,5 \cdot f}{f + 0,5 \cdot f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}, \quad \beta_i = \frac{0,5 \cdot f \cdot T_{i-1}^k + (1-f)T_i^k + 0,5 \cdot f \cdot T_{i+1}^k + 0,5 \cdot f \cdot \beta_{i-1}}{1 + 0,5 \cdot f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}. \quad (2.38)$$

Температура правого граничного узла находится по формуле:

$$T_{n+1}^{k+1} = \frac{[1 - f \cdot (1+b)] \cdot T_{n+1}^k + f \cdot (T_n^k + 2 \cdot b \cdot T_0 + \beta_n)}{1 + f \cdot (1+b - \alpha_n)}. \quad (2.39)$$

После нахождения температуры в правом граничном узле, перемещаясь по сетке справа налево, определяем значения температур по формуле:

$$T_i^{k+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{k+1} + \beta_i \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.40)$$

Неявная шеститочечная разностная схема аппроксимирует исходную задачу теплопроводности и является безусловно устойчивой. Эта схема сходится, причём скорость её сходимости равна:

$$v = O(\Delta y^2 + \Delta \tau^2). \quad (2.41)$$

Таким образом, для решения исходной одномерной задачи теплопроводности (2.18) возможно применение всех трёх методов расчёта температурных полей. При использовании явной разностной схемы необходим выбор достаточно малого шага Δy , что значительно увеличивает объём расчётов при рассмотрении достаточно продолжительных процессов разогрева металлургических агрегатов. Неявная четырёхточечная схема не накладывает каких-либо ограничений на выбор шага по координате и времени, но она не обладает такой точностью как шеститочечная разностная схема. Поэтому в качестве расчётной схемы применяем шеститочечную неявную разностную схему, имеющую более высокий порядок сходимости по времени, чем другие схемы.

2.4 Методика и результаты расчёта температурных полей

Футеровка сталеразливочного ковша состоит из четырёх слоёв. Первоначально рассмотрим рабочий слой футеровки.

В ходе расчёта будем использовать значения температуры внутренней поверхности футеровки, полученные экспериментальным путём.

Зависимость температуры внутренней поверхности футеровки от времени показана на рисунке 1.3. Использование этих данных позволяет несколько сократить процесс расчёта, то есть не рассчитывать температуру внутренней поверхности футеровки по формуле (2.35), а использовать эмпирические данные замеров. Кроме сокращения временных затрат, использование значений температур правого граничного узла приводит к уменьшению погрешности, связанной с вычислением температур этой точки.

Таким образом, алгоритм расчёта температурных полей футеровки состоит в следующем:

1. Находим значение коэффициента f по формуле (2.31).
2. Вычисляем прогоночные коэффициенты α_l и β_l а также α_i и β_i для k -го момента времени по формулам (2.37) и (2.38).
3. Находим значение температурных полей для k -го момента времени по формуле (2.40).
4. Вычисляем прогоночный коэффициент β_i для $(k+1)$ -го момента времени.
5. Находим значение температурных полей для $(k+1)$ -го момента времени.
6. Вычисляя прогоночные коэффициенты β_i для последующих моментов времени, находим значение температурных полей для этих моментов времени. Таким образом, производим расчёт температур футеровки в процессе её разогрева.

При дальнейших расчётах температурных напряжений необходимы значения среднеинтегральной температуры поля. Среднеинтегральная температура будет отличаться от средней температуры по сечению футеровки. Они будут равны лишь при прямолинейном распределении температур в футеровке. В ином случае среднеинтегральную температуру можно определить методом трапеций [20]:

$$T_{cp} = \int_0^H T(y) dy = \frac{H}{3} \cdot [(T_{n+1} + T_o) + 4 \cdot \sum T_1 + 2 \cdot \sum T_2], \quad (2.42)$$

где H – толщина слоя футеровки, м;

T_{n+1} , T_o – значения температур в правом и левом граничном узле, °C;

$\sum T_1$ – сумма значений температур в нечётных по номеру узлах, °C;

$\sum T_2$ – сумма значений температур в чётных по номеру узлах, °C.

В качестве первоначальных данных для расчёта температурных полей используем следующие значения: начальная температура рабочего слоя футеровки сталковша по всей толщине составляет 25 °C; толщина рабочего слоя – 135 мм.

При вычислении температур футеровки по неявной шеститочечной схеме рабочий слой футеровки разбиваем на двадцать равных частей (двадцать одна узловая точка). Соответственно, шаг по координате Δy составит 0,00675 м.

Весь промежуток времени процесса разогрева футеровки сталеразливочного ковша составляет 24 часа. Для расчёта принимаем шаг по времени Δt , равный 60 секундам.

В приложении А приведены температурные поля футеровки в моменты времени с резким подъёмом температуры и шагом по времени 10 минут.

Выводы:

1) В процессе нагрева футеровка теплоэнергетических агрегатов подвергается интенсивному воздействию высоких температур и тепловых потоков. Это вызывает значительный перепад температур по толщине кладки и появление больших температурных напряжений и деформаций, приводящих к её растрескиванию. Появление трещин уменьшает огнеупорные свойства материалов и ведёт к более интенсивному износу футеровки в целом.

2) Для решения одномерной задачи теплопроводности в качестве расчётной схемы применяем шеститочечную неявную разностную схему, имеющую более высокий порядок сходимости по времени, чем другие схемы.

3 РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАЗОГРЕВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

3.1 Экспериментальное определение предела прочности огнеупорных материалов при сжатии в зависимости от температуры

В рассматриваемом высокотемпературном агрегате рабочий слой футеровки сталеразливочного ковша составляют периклазоуглеродистые огнеупоры. Широкий ассортимент производимых промышленностью огнеупорных изделий на основе периклаза (MgO) создаёт определенные трудности в поиске табличных данных тепломеханических характеристик периклазоуглеродистых изделий состава. Поэтому для дальнейших исследований возникла необходимость в экспериментальном определении предела прочности при комнатной и повышенной температуре.

Повышение точности расчёта термонапряжённого состояния кладки требует получения тепломеханических характеристик огнеупорных материалов при их рабочих температурах. Для этой цели был создан экспериментальный стенд по измерению предела прочности огнеупорных материалов при повышенных температурах.

С каждым видом механизма разрушения связывается определённый критерий прочности — та или иная характеристика физического состояния материала элементов машин и аппаратов, определяемая расчётным или экспериментальным путём. Для каждого из критериев прочности материала конструкции экспериментально устанавливаются его предельные значения. По предельным значениям далее определяются допускаемые значения этих критериев. Последние определяются, как правило, путём деления предельных значений критерия прочности на соответствующий коэффициент запаса прочности. Значения коэффициентов запаса прочности назначаются на основе опыта эксплуатации с учётом степени ответственности проектируемой конструкции, расчётного срока её эксплуатации и возможных последствий её разрушения.

Для повышения точности измерений в экспериментальном стенде реализуется способ термомеханических испытаний материалов, который позволяет определить предел прочности материалов на сжатие при повышенных температурах образца с применением устройства, позволяющего определить температуру материала прямым методом [22].

Техническим результатом изобретения является получение значений предела прочности на сжатие различных материалов при повышенных температурах материала с меньшей погрешностью.

Это достигается тем, что в способе термомеханических испытаний материалов, заключающемся в нагреве контрольного и испытуемого образца из исследуемого материала, выдержке при заданной температуре и нагружению испытуемого образца до разрушения, предлагается процесс

нагрева испытуемого образца контролировать по нагреву контрольного образца.

При этом замер температуры внутри контрольного образца t_1 производить в точке, максимально приближенной к геометрическому центру контрольного образца. Это позволит повысить точность измерения температуры t материала.

На рисунке 3.1 изображено устройство для термомеханических испытаний материалов.

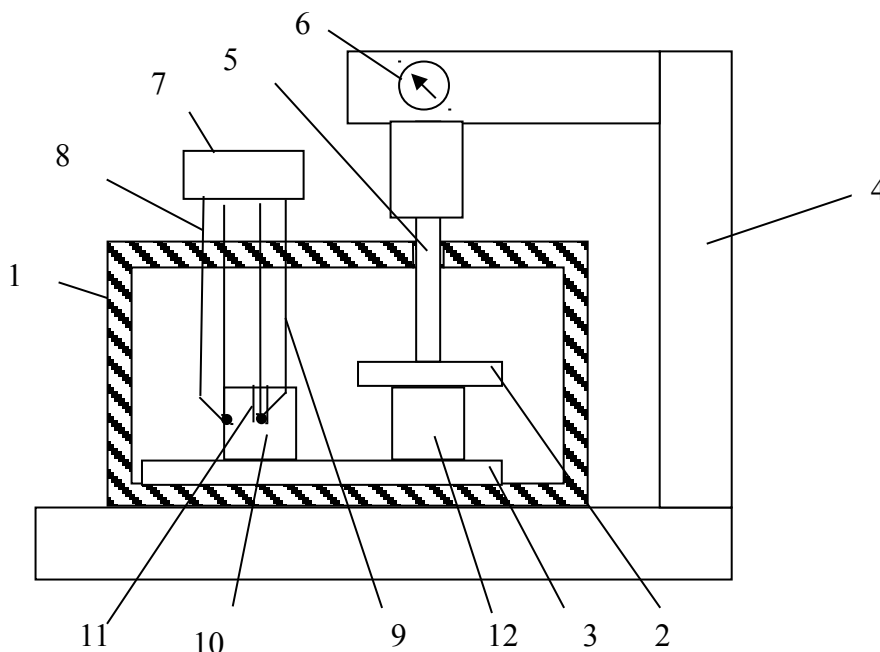


Рисунок 3.1 - Устройство для термомеханических испытаний материалов

Устройство содержит печь 1, в которой находятся верхняя 2 и нижняя 3 плиты. Для нагружения имеется пресс 4, который посредством силовой тяги 5 воздействует на верхнюю плиту 2. Измерение создаваемой нагрузки определяется по силоизмерительному устройству 6. Для вычисления температуры t используется вторичный прибор – сумматор 7.

К сумматору 7 подключены термопары 8 и 9. Термопары 8 и 9 расположены в контрольном образце 10 из исследуемого материала, расположенном на нижней плите 3. Горячий спай термопары 8 максимально приближен к геометрическому центру. Например, это может быть канал 11, просверленный по вертикальной оси симметрии до половины высоты контрольного образца. Термопара 9 расположена на любой боковой поверхности контрольного образца 10. Испытуемый образец 12 располагается в печи 1 между верхней 2 и нижней 3 плитой.

Способ осуществляется следующим образом.

Из исследуемого материала изготавливаются два одинаковых образца в форме цилиндра или прямоугольного параллелепипеда: контрольный 1 и

испытуемый 2. В контрольном образце 1 размещают термопару 4, горячий спай которой максимально приближен к геометрическому центру (по вертикальной оси симметрии высверливают канал 3 до половины высоты контрольного образца). Термопару 5, для измерения температуры на поверхности контрольного образца 1, устанавливают в любой точке на боковой поверхности. Контрольный образец 1 с закреплёнными термопарами и испытуемый образец 2 помещают в печь 6 на нижнюю плиту 7. При этом цилиндрические образцы устанавливают на любое основание, а образцы в виде прямоугольного параллелепипеда – на любую грань.

Термопары подключают к вторичному прибору для измерения температуры – сумматору 8, который показывает значение температуры t , определяемое по формуле:

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (3.1)$$

где t_1 – показания термопары внутри контрольного образца;

t_2 – показания термопары на поверхности контрольного образца.

Затем включают печь и начинают нагрев образцов.

После включения в работу печи 6 следят за величиной значения температуры t , которая определяет достижение заданной температуры испытания. Температура t считается температурой испытания.

После достижения такого температурного состояния испытуемый образец 2 подвергают одноосному нагружению прессом 9 посредством воздействия силовой тяги 10 на верхнюю плиту 11 до разрушения испытуемого образца 2. Нагрузка на образец определяется по силоизмерительному устройству 12. При этом нагрузка должна возрастать непрерывно и равномерно со скоростью, обеспечивающей его разрушение через 20-60 с после начала испытания.

Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ (Н/м²) испытуемого образца вычисляют по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{F}, \quad (3.2)$$

где $\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии, Н/м²;

P — наибольшая нагрузка, при которой произошло разрушение образца, Н;

F — площадь поперечного сечения образца, м².

Предлагаемый способ позволяет получить значение предела прочности на сжатие различных материалов при повышенных температурах материала с меньшей погрешностью.

В соответствии с данным способом был создан экспериментальный стенд (рисунок 3.2) и произведены исследования зависимости предела прочности на сжатие огнеупоров от температуры.

Для измерения давления в цилиндре прессы с рабочей жидкостью используется манометр. Для повышения точности измерений была проведена поверка этого прибора (акт о поверке приведён в приложении А).



Рисунок 3.2 - Стенд для исследования зависимости предела прочности на сжатие от температуры

В качестве исследуемых образцов использовались периклазоуглеродистые огнеупоры состава: $\text{MgO} \geq 80 \%$; $\text{C} \geq 8 \%$. При этом заявляемый предел прочности на сжатие равен 40 МПа (паспортные данные завода-изготовителя).

Характерным для прочности реальных тел является так называемый масштабный фактор — зависимость прочности от размеров тела. При стандартных испытаниях материала на образцах различных размеров для приведения результатов в сопоставимый вид используются переводные коэффициенты. Масштабный фактор объясняется в основном статистической природой процессов разрушения, связанной с влиянием неоднородностей макроструктуры и дефектов материала на процесс возникновения и развития трещин. С увеличением размеров образцов вероятность неоднородностей структуры возрастает и среднее значение предела прочности материала уменьшается.

Можно выделить ряд последовательных стадий разрушения огнеупорных изделий.

Вначале идёт образование локальных микротрещин (посечек) термического происхождения, секущих изделие. Толщина микротрещин колеблется от нескольких микрон до 0,2 мм в малоизменённой и переходной зонах имеются скрытые посечки, заполненные силикатами и ферритами кальция, то есть продуктами затвердевания шлака. Затем стоит упомянуть о процессе химического коррозионного растворения периклаза в шлаковом расплаве. Особенно интенсивно этот процесс протекает на рабочей поверхности футеровки.

Итогом является циклическое скалывание наружных слоёв изделий, вследствие резких колебаний температуры и недостаточной термостойкости огнеупора. Следует отметить, что циклы скалывания зависят от расположения изделий относительно уровня металла.

Таким образом, износ периклазовых изделий происходит за счёт циклического скалывания внешних слоёв изделий и частично вследствие химического разъедания периклаза в рабочей зоне. Износ огнеупоров осуществляется в результате химического взаимодействия между компонентами шлака и огнеупора с образованием легкоплавких соединений. Высокая стойкость периклазоуглеродистых изделий обусловлена образованием плотной рабочей зоны, состоящей из сростка кристаллов шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$, реликтовых обломков периклаза, мервинитамелилита и гексаалюмината кальция. Эта плотная зона предохраняет углерод от выгорания и способствует адгезии шлака, что резко повышает шлакоустойчивость изделий.

Огнеупоры при обыкновенной температуре характеризуются хрупким разрушением, которое обычно наступает после небольшой (упругой) деформации и незначительной по величине пластической (необратимой).

Упругая деформация связана с увеличением расстояния между атомами вещества при приложении нагрузки и зависит от энергии кристаллической решётки. Эта связь выражается зависимостью модуля упругости от температуры плавления.

Хрупкое и вязкое разрушение имеют разные виды разрушенной поверхности. Характер дефектов даёт понятие, какого рода разрушение имеет место. При хрупком разрушении поверхность надломлена. При вязком разрушении поверхность натянута (вяжет разрушение).

Вязкость разрушения – это относительное повышение растягивающих напряжений в устье трещины при переходе её от стабильной к нестабильной стадии роста.

Вязкость разрушения тесно связана с показателями прочности материала. Увеличение прочности сопровождается снижением пластичности и вязкости разрушения. Это объясняется тем, что у высокопрочных материалов мала энергия, поглощаемая при разрушении уровень которой определяется величиной пластической деформации у вершины трещины. Для

высокопрочных материалов эффект увеличения прочности существенно перекрывается снижением пластичности, в результате чего вязкость разрушения уменьшается. Материалы средней и низкой прочности при комнатной температуре обычно имеют более высокие значения, чем высокопрочные. С понижением температуры прочность растет и при определённых условиях поведение материала средней и низкой прочности становится таким же, как у высокопрочного материала при комнатной температуре. При низких температурах испытание вязкости разрушения можно проводить на образцах меньших размеров.

На рисунке 3.3 показано хрупкое разрушение периклазоуглерода при комнатной температуре.



Рисунок 3.3 – Разрушение периклазоуглерода при комнатной температуре

Определение предела прочности проводилось в диапазоне температур 18 – 500 °С. Результаты измерений приведены на рисунке 3.4.

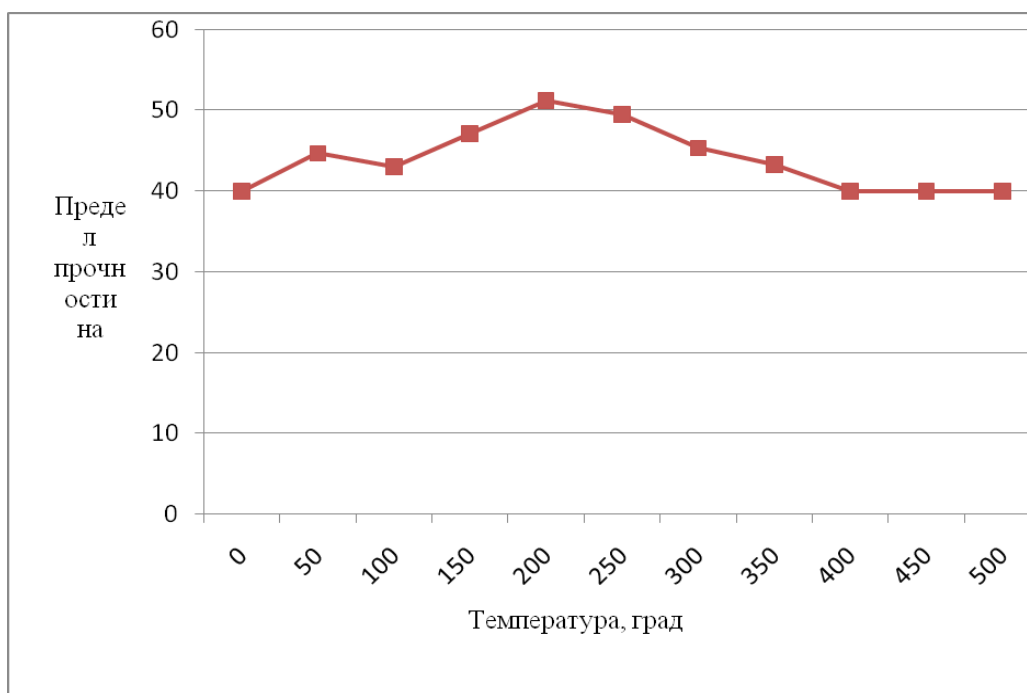


Рисунок 3.4 – Зависимость предела прочности от температуры

Кривая зависимости предела прочности от температуры имеет следующие тенденции: начиная с температуры ~ 90 °С предел прочности огнеупора растёт, доходя до значения 51,2 МПа (при температуре ~ 200 °С), затем значение предела прочности начинает плавно снижаться, доходя до 40 МПа (при ~ 400 °С).

Таким образом, значение предела прочности на сжатие в интервале температур 150 – 300 °С увеличивается на 18 – 28 %, что даёт дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энергоресурсов на разогрев.

3.2 Расчёт термических напряжений в футеровке сталеразливочного ковша

Расчёт температурных напряжений, с учётом рассчитанных ранее значений температурных полей, производится по формуле:

$$\sigma = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \cdot T(y, t). \quad (3.3)$$

При этом принимаем следующие значения параметров для периклазоуглеродистых огнеупоров (постоянные для рассматриваемой области 25-938 °С): E – модуль упругости ($E=0,7 \cdot 10^5$ МПа); α – коэффициент термического расширения ($\alpha=13 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹), ν – коэффициент Пуассона ($\nu=0,15$) [23].

Для периклазоуглеродистых огнеупоров предел прочности на сжатие принимается равным 40 МПа; предел прочности на растяжение: 25 МПа.

Для упрощения процессов расчета температурных полей и напряжений в футеровке теплоэнергетических агрегатов автором была составлена программа для их расчёта. Программа предполагает первоначальный ввод следующих значений:

- 1) толщины слоя футеровки металлургического агрегата;
- 2) числа шагов по координате (толщине);
- 3) шага по времени;
- 4) начальной температуры тела;
- 5) общего времени нагрева футеровки;
- 6) коэффициента упругости используемого материала;
- 7) коэффициента термического расширения;
- 8) коэффициента Пуассона;
- 9) коэффициента температуропроводности (вводится новое значение при следующем шаге по времени, вследствие зависимости его от температуры).

В приложении Б приведены значения температур рабочего слоя футеровки для моментов времени, при которых образующиеся термические напряжения превышают предел прочности.

Анализируя возникающие напряжения и скачки температур можно увидеть чёткая взаимосвязь между ними: скачк температур во временном периоде: 0:00 – 01:00 и 05:00 – 07:00 вызывает превышение предела прочности в моменты времени: 00:00 – 01:00 и 05:10 – 07:00. При нагреве в высокотемпературном участке от средней температуры возникает напряжение сжатия (σ_c), а в низкотемпературном участке напряжение растяжения (σ_p). Кроме того, следует отметить, что резкий скачок температур в первую очередь сказывается на напряжениях сжатия (при норме значений напряжений растяжения), а затем плавно переходит в низкотемпературный участок и сказывается на напряжениях растяжения.

Максимальное значение напряжения сжатия в течение всего процесса разогрева больше допустимого в 3,89 раза, а напряжения растяжения – в 3,4 раза.

Стоит отметить также временные области в которых не наблюдается резких скачков температур, но имеются напряжения превышающие предел прочности (от 05:20 до 06:30). Разрушительные напряжения вызваны в данном случае чрезмерными скоростями разогрева (в среднем 19 °C/мин), тогда как, исходя из предела прочности на сжатие 40 МПа скорость должна лимитироваться 8-10 °C/мин.

Анализируя полученные значения, можно сделать следующие выводы:

1. Скачок значений термических напряжений возникает вследствие резкого повышения температур при разогреве.
2. При значении предела прочности на сжатие 40 МПа скорость разогрева футеровки не должна 8-10 °C/мин.

3. При разогреве футеровки определяющим критерием из пределов прочности (на сжатие и растяжение) является предел прочности на сжатие. Именно его величина, в первую очередь, определяет темп разогрева.

Кроме того, можно однозначно считать, что при разогреве футеровки нельзя допускать скачкообразного подъёма и особенно снижения температуры, а также неравномерного нагрева огнеупоров на разных участках (как по высоте, так и по окружности).

Поэтому можно сделать вывод о превышении допустимых скоростей разогрева в соответствующие моменты времени. Кроме того, разогрев ковша осуществляется в течение 24 часов, а из графика (рисунок 1.3) видно, что максимальной температуры внутренняя поверхность футеровки достигает уже после 16 часов нагрева. Тем самым, в последние 8 часов происходит поддержание максимальной температуры футеровки, а не её разогрев.

Существующие скорости нагрева футеровки сталеразливочного ковша являются недопустимыми, так как возникающие при этом термические напряжения превышают допустимый предел в несколько раз. Более того, считается, что разогрев ковша осуществляется в течение 24 часов, а из графиков видно, что максимальной температуры (938 °С) внутренняя поверхность футеровки достигает уже после 16 часов нагрева. Всё сказанное позволяет сделать вывод о необходимости рационализации графика разогрева, который должен быть рассчитан из условия недопущения градиентов температур, вызывающих появление термических напряжений выше допустимых, с учётом найденной зависимости предела прочности на сжатие от температуры.

3.3 Разработка рациональных графиков разогрева

При разработке графиков разогрева кладки необходимо не только избегать превышения допустимых скоростей, но и минимизировать время разогрева. Необходимо также учесть два процесса: испарение гигроскопической влаги (при температуре ~ 100°С) и удаление связанной влаги («полочка» при температуре 350 – 400°С).

Для удаления свободной влаги, содержащейся в рабочем слое футеровки делаем временную выдержку при температуре 130 °С в течение 30 минут.

Удаление связанной влаги в процессе нагрева будем проводить аналогично графику, принятому на предприятии, то есть, при достижении внутренней поверхности футеровки температуры 345 °С дальнейший нагрев до температуры 400 °С проводим в течение четырёх часов. Разогрев осуществляет до температуры 938 °С.

Полученные при расчёте значения предела прочности на сжатие не должны превышать предел прочности полученный эмпирическим путём (для диапазона температур 18-500 °С).

В приложении В приведены значения температур по толщине рабочего слоя футеровки сталеразливочной ванны в диапазоне температур 20 – 500 °С.

Рассмотрим разработанный график разогрева (кривая 2, рисунок 3.5).

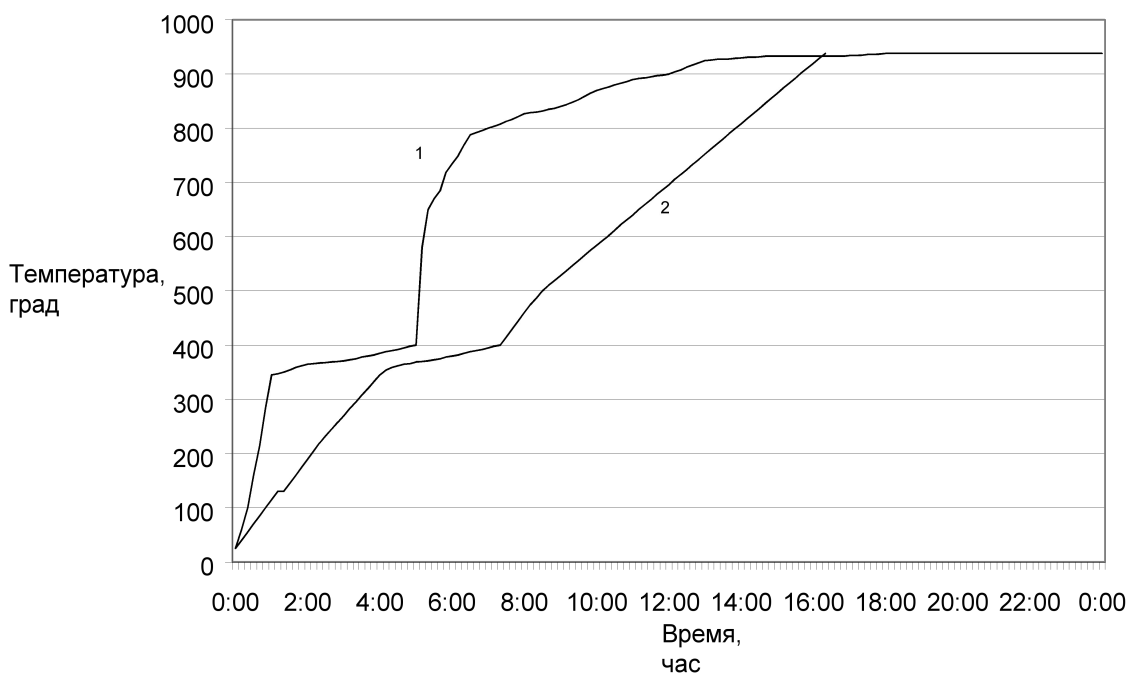


Рисунок 3.5 Разработанный график разогрева

Скорости подъема температуры для каждого участка кривой подбирались индивидуально. Средняя скорость повышения температуры на участках от 18 до 500 °С (не содержащих участки сушки), составила ~ 90 °С/ч. Общее время разогрева до температуры 938 °С составляет 16 часов 20 минут.

Разработанные графики разогрева позволяют, не превышая предел прочности огнеупорных материалов, производить процесс разогрева с максимально возможными скоростями и контролировать его. При этом происходит значительное снижение времени на процесс разогрева.

4.5 Экономическая эффективность

Разогрев сталеразливочных ковшей со скоростями, термические напряжения при которых не превышают предел прочности позволят повысить стойкость футеровки и количество плавов. Ориентируясь на литературные данные [12], можно считать, что внедрение данных разработок позволит повысить стойкость футеровок сталеразливочных ковшей с 40 до 42 плавов, то есть на 5 %. Снижение времени разогрева сталеразливочных ковшей после капитального ремонта с 24 часов до 16 часов 20 минут позволит сократить расход газа на 32 %.

Подсчитаем годовую экономическую эффективность внедрения ($\mathcal{E}_{\Sigma}$). Эффективность будет складываться из двух составляющих: экономии

денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки ($\mathcal{E}_1$) и экономии средств на разогрев ковшей после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева ($\mathcal{E}_2$).

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2. \quad (3.4)$$

В течение одного месяца в среднем производится один капитальный и один промежуточный ремонт футеровки сталеразливочного ковша. Общее число ковшей на предприятии составляет 20 шт. Рабочий слой футеровки полностью меняется лишь при капитальном ремонте, поэтому для подсчёта экономии денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки ($\mathcal{E}_1$) учитываем только капитальные ремонты. Таким образом, годовое количество капитальных ремонтов футеровки при увеличении её стойкости на 5 % составит:

$$N = N' - (N' \cdot 0,05), \quad (3.5)$$

где N , N' – количество капитальных ремонтов до и после повышения стойкости.

$$N = 12 - (12 \cdot 0,05) = 11,4$$

Годовое количество капитальных ремонтов всех ковшей:

$$T = n \cdot N, \quad (3.6)$$

где n – число ковшей.

Годовое количество капитальных ремонтов всех ковшей до повышения стойкости футеровки:

$$T = 20 \cdot 12 = 240$$

Годовое количество капитальных ремонтов всех ковшей после повышения стойкости футеровки:

$$T' = 20 \cdot 11,4 = 228,6$$

Снижение количества капитальных ремонтов всех ковшей вследствие повышения стойкости футеровки:

$$\Delta T = T - T' \quad (3.7)$$

$$\Delta T = 240 - 228,6 = 11,4$$

По данным предприятия, в среднем, стоимость одной тонны огнеупорного материала для футеровки рабочего слоя сталеразливочных ковшей составляет 150000 тнг. С учётом того, что масса рабочего слоя футеровки составляет 5606 кг имеем стоимость рабочего слоя футеровки одного ковша:

$$S = m \cdot s, \quad (3.8)$$

где m – масса рабочего слоя футеровки, кг;
 s – средняя стоимость одной тонны огнеупорного материала, тнг.

$$S = 5,606 \cdot 150000 = 840900 \text{ тнг.}$$

Годовая экономия денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки:

$$\mathcal{E}_1 = S \cdot \Delta T. \quad (3.9)$$

$$\mathcal{E}_1 = 840900 \cdot 11,4 = 9586260 \text{ тнг.}$$

При разогреве сталеразливочных ковшей после капитального (продолжительность 24 часа) и промежуточного (продолжительность 24 часа) ремонтов, с учётом расхода газа (10 м³/ч) полный расход газа на разогрев составит:

$$q = (\tau_1 + \tau_2) \cdot q_1, \quad (3.10)$$

где τ_1, τ_2 – время разогрева стальной ковша после капитального и промежуточного ремонта соответственно, ч;
 q_1 – расход газа на разогрев ковшей, м³/ч.

$$q = (24 + 24) \cdot 10 = 480 \text{ м}^3$$

Расход газа, с учётом повышения стойкости футеровки:

$$q = 480 \cdot 0,32 = 153,6 \text{ м}^3.$$

Годовой расход газа на разогрев сталеразливочных ковшей:

$$Q = q \cdot T' \quad (3.11)$$

$$Q = 153,6 \cdot 228,6 = 35112,96 \text{ м}^3.$$

С учётом закупочной стоимости газа для предприятия ($s_2 = 34$ тнг/м³) получаем экономию средств на разогрев ковшей после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева:

$$\mathcal{E}_2 = Q \cdot s_2. \quad (3.12)$$

$$\mathcal{E}_2 = 35112,96 \cdot 34 = 1193840,64 \text{ тнг.}$$

Годовая экономическая эффективность внедрения составила:

$$\mathcal{E}_\Sigma = 9586260 + 1193840,64 = 10780100,64 \text{ тнг.}$$

Разработанные режимы нагрева футеровки сталеразливочных ковшей позволяют производить разогрев оборудования до необходимой температуры. Возникающие при этом термические напряжения не превышают предел прочности, что приводит к увеличению стойкости футеровки на 5 %

Выводы:

1) Повышение точности расчёта термонапряжённого состояния кладки требует получения тепломеханических характеристик огнеупорных материалов при их рабочих температурах, для чего можно использовать стенд по измерению предела прочности огнеупорных материалов при повышенных температурах. Значение предела прочности на сжатие в интервале температур 150 – 300 °С увеличивается на 18 – 28 %, что даёт дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энергоресурсов на разогрев.

2) Расчёт температурных напряжений при существующих на предприятии скоростях показал, что максимальное значение напряжения сжатия в течение процесса разогрева больше допустимого в 3,89 раза, а напряжения растяжения – в 3,4 раза.

3) При разработке рациональных графиков разогрева средняя скорость повышения температуры на участках от 18 до 500 °С (не содержащих участки сушки), составила ~ 90 °С/ч. Общее время разогрева до температуры 938 °С составляет 16 часов 20 минут.

4) Экономическая эффективность при внедрении данных разработок, состоящая из экономии денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки и экономии средств на разогрев ковшей после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева, будет составлять более 10 млн. тнг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В магистерской работе выполнен анализ условий эксплуатации футеровок высокотемпературных агрегатов, а также используемых в промышленности огнеупоров и условий их эксплуатации.

2. По данным значений температур на внутренней поверхности стальной ковша рассчитаны температуры по сечению рабочего слоя и термические напряжения. Показано, что значения термических напряжений превышают предел прочности для используемых огнеупорных материалов.

3. Проведено экспериментальное исследование зависимости предела прочности на сжатие огнеупорных материалов от температуры. Проведённые исследования позволяют сделать вывод, что значение предела прочности на сжатие в интервале температур 150 – 300 °С увеличивается на 18 – 28 %, что даёт дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энергоресурсов на разогрев.

4. Разработаны графики разогрева стальной ковшеи после капитального ремонта при соблюдении условий: возникающие термические напряжения не превышают предел прочности периклазоуглеродистых огнеупоров; затраты времени на разогрев ковшеи минимальны. При разработке рациональных графиков разогрева средняя скорость повышения температуры на участках от 18 до 500 °С (не содержащих участки сушки), составила ~ 90 °С/ч. Общее время разогрева до температуры 938 °С составляет 16 часов 20 минут.

5. Экономическая эффективность при внедрении данных разработок, состоящая из экономии денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки и экономии средств на разогрев ковшеи после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева, будет составлять более 10 млн. тнг.

Список использованных источников

- 1 Антипин В.Г., Чухаль П.А., Вяткин Ю.Ф. Служба огнеупоров в сталеплавильных агрегатах // Сталь. 1991. №8. с. 21 – 27.
- 2 Кузнецов А.Т., Кокушкин И.В., Сенявин Н.К., Шершнёв А.А. Напряжённо – деформированное состояние и разрушение огнеупоров при тепловом воздействии // Огнеупоры. 1987. №2. с. 52 – 56.
- 3 Хорошавин Л.Б. Современные тенденции развития производства и применения огнеупоров. Сайт: <http://urm.ru/ru/186>
- 4 Пат. 3713855 США. Кирпич с высоким содержанием MgO и улучшенными показателями по пределу прочности на разрыв при повышенной температуре /Elta Corp.; Jan. 30, 1973.
- 5 Пат. 3808014 США. Спеченный магнезитовый огнеупор /D. R. F. Spencer and D. C. Wooldridge.; Apr. 30, 1974.
- 6 Сайт:<http://www.magnezit.biz/ru/about/press/news/index.php?from4=2&id4=719>
- 7 Ярушина Т.В., Шатилов О.Ф., Коптелов В.Н. Новые углеродсодержащие огнеупоры ОАО «Комбинат Магнезит» для футеровки сталеразливочных ковшей // Новые огнеупоры. 2003. №1. с. 14 – 19.
- 8 Глишков М.А., Глишков Г.М. Общая теория печей. М.: Металлургия, 1978. – 264с.
- 9 Стрелов К.К., Кашеев И.Д., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. М.: Металлургия, 1988. – 528с.
- 10 Казанцев Е.И. Промышленные печи. М.: Металлургия, 1975. – 366с.
- 11 Волкова О. и Янке Д. Моделирование температурных полей в сталеразливочных ковшах с футеровкой из доломитовых кирпичей или высокоглиноземистой массы // Чёрные металлы. 2003. №2. с. 26 – 31.
- 12 Приходько Е.В. Повышение эффективности работы теплоиспользующих установок за счёт новых технологий сушки и разогрева футеровки. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. / Омский гос. тех. университет, - Омск, 2006.
- 13 Журков С.Н. Изучение разрушения полимеров методом ЭПР. ДАН СССР, 1964. №2. с. 103.
- 14 Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. М.: Металлургия, 1978. – 376 с.
- 15 Гогоци Г.А. К вопросу о термостойкости гетерогенной керамики и огнеупоров // Огнеупоры. 1993. №11. с. 2 – 8.
- 16 Никифоров А.С. Оценка термонапряжённого состояния футеровки металлургических печей // Доклады Национальной Академии наук Республики Казахстан. – 2003, №6. – С.103-107.

- 17 Девятков С.А., Карасёв А.В., Степанова Е.П. Основные физические и математические модели в расчётах на прочность. Омск: Изд – во ОмГТУ, 2004. – 67с.
- 18 Никифоров А.С. Надежность работы футеровок металлургических печей // г. Павлодар 2003. с.16-17
- 19 Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. – 239с.
- 20 Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Физматгиз, 1963. – 660с.
- 21 Кузнецов Г.И., Кортель А.А., Борисов В.Г., Аксерольд Л.М., Пивинский Ю.Е. Новые виды огнеупоров для чёрной металлургии // Огнеупоры. 1992. №1. с. 32 – 36.
- 22 Приходько Е.В., Никифоров А.С., Шанов И.В. Инновационный патент № 21807 РК. Способ термомеханических испытаний материалов и устройство для его осуществления, опубл. 15.10.2009, бюл. № 10. – 4с.: ил.
- 23 Стрелов К.К. Структура и свойства огнеупоров. М.: Металлургия, 1982. – 208с.

Содержание

Введение.....	5
1 Анализ условий эксплуатации футеровок высокотемпературных агрегатов.....	7
1.1 Используемые в промышленности огнеупоры и условия их эксплуатации.....	7
1.2 Свойства огнеупоров и их влияние на стойкость футеровки.....	16
1.3 Характеристика объекта исследования.....	20
2 Исследование термонапряжённого состояния футеровки высокотемпературного агрегата.....	24
2.1 Теории прочности материалов.....	24
2.2 Постановка задачи	30
2.3 Выбор схемы расчёта температурных полей.....	33
2.4 Методика и результаты расчёта температурных полей.....	40
3 Рационализация режимов разогрева высокотемпературных агрегатов.....	43
3.1 Экспериментальное определение предела прочности огнеупорных материалов при сжатии в зависимости от температуры.....	43
3.2 Расчёт термических напряжений в футеровке сталеразливочного ковша.....	49
3.3 Разработка рациональных графиков разогрева сталеразливочных ковшей.....	51
3.4 Экономическая эффективность.....	52
Заключение	56
Список использованных источников.....	57
Приложения.....	59

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Высокотемпературные агрегаты объединяют широкий круг промышленных установок: от сушильных и металлургических печей до энергетических котлов. При этом, все эти агрегаты имеют конструктивную составляющую - футеровку, предназначенную для обеспечения защиты агрегата (или его поверхностей) от возможных механических или физических повреждений.

При разогреве и работе оборудования в футеровке возникают термические напряжения. Причина их возникновения заключается в неравномерном распределении температуры в различных частях кладки или ограничении возможности теплового расширения тела. Как правило, к термическим напряжениям, разрушающим материал, ведёт слишком высокая скорость разогрева агрегатов. Для предотвращения разрушения футеровки под действием возникающих при нагреваний, необходимо ее работу вести в режиме, обеспечивающем величину скорости роста напряжения ниже скорости их релаксирования. Но, с другой стороны, чрезмерное затягивание процесса разогрева приводит не только к перерасходу топлива, но и увеличению простоя оборудования в ремонте, что также сказывается на себестоимости продукции. Таким образом, процесс разогрева необходимо вести с максимально возможными скоростями, обеспечивающими возникновение температурных напряжений не превышающих предел прочности материалов футеровки при данной температуре.

Следовательно, сокращение удельного расхода огнеупоров (вследствие повышения их стойкости) и экономия топлива – актуальная задача, решение которой невозможно без изучения механизма термического разрушения и точных данных о тепломеханических свойствах материалов во всём диапазоне используемых температур.

Цель работы – рационализация процесса разогрева сталеразливочных ковшей с позиции возникающих термических напряжений в футеровке агрегата.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ существующего процесса разогрева сталеразливочных ковшей.
2. Провести экспериментальные исследования воздействия температуры на предел прочности на сжатие используемых огнеупорных материалов.
3. Разработать рациональные графики разогрева сталеразливочных ковшей с учётом зависимости предела прочности на сжатие от температуры, при использовании которых возникающие термические напряжения не превышают предел прочности для используемых огнеупорных материалов.
4. Определить технико-экономическую эффективность предложенных разработок.

Новизна научных исследований заключается в следующем:

- разработана методика определения предела прочности материалов в зависимости от температуры;
- получены экспериментальные данные о зависимости предела прочности огнеупоров от температуры;
- разработаны графики разогрева сталеразливочных ковшей с учётом зависимости предела прочности огнеупоров от температуры.

Значение научных результатов для теории и практики. Методика определения предела прочности и результаты экспериментального определения зависимости предела прочности от температуры могут быть использованы при оценке надёжности и долговечности работы высокотемпературных агрегатов.

Научные публикации. Приходько Е.В., Карманов А.Е. Разработка режимов разогрева высокотемпературных агрегатов с учетом зависимости предела прочности материалов от температуры // Вестник ИнЕУ. 2010. №4. с.41 – 43.

Приходько Е.В., Карманов А.Е. Разработка методики сушки и разогрева высокотемпературных агрегатов. Материалы международной научн.-техн. конф. Наука и образование в 21 веке. Динамика развития в Евразийском пространстве: / ИнЕУ, - Павлодар, 2011.

1 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУТЕРОВОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

1.1 Используемые в промышленности огнеупоры и условия их эксплуатации

Высокотемпературные агрегаты (нагревательные, сушильные, обжиговые плавильные устройства и ковши для разливки стали и других металлов), футеруются огнеупорными материалами. Срок службы высокотемпературных агрегатов, во многом, определяется сроком службы футеровки. При термическом воздействии на футеровку печи возникают такие физические явления, как термическое расширение, пластическая деформация и растрескивание, которые определяют возможность осуществления термотехнологического процесса, стойкость футеровки без нарушения геометрических форм рабочей камеры, длительность эксплуатации и технико-экономические показатели процесса получения целевого продукта [1].

Огнеупорные материалы – изделия на основе минерального сырья, отличающиеся способностью сохранять свои свойства в условиях эксплуатации при высоких температурах, и которые служат в качестве конструкционных материалов и защитных покрытий.

Функционально любое огнеупорное изделие может выполнять от одной до четырех основных задач [2]:

- 1) удерживать расплавленный металл или раскалённые газы (а также их потоки) в заданном объёме или пространстве;
- 2) предотвращать вторичное окисление и загрязнение металла неметаллическими включениями;
- 3) служить тепловой изоляцией металлических частей агрегатов;
- 4) поддерживать заданную температуру металла (газов) или заданные минимальные потери из агрегата.

Конструкторы, строители печей, изготовители огнеупоров и инженеры-эксплуатационники это хорошо понимают. Целесообразный выбор футеровки печей только тогда возможен, если с одной стороны, известны как можно точнее особенности характеристик огнеупорных материалов и с другой - нагрузки материалов на реальном производстве. Связь между различными видами термических нагрузок в промышленных печах и важнейшими эксплуатационными характеристиками огнеупоров (таблица 1.1) образуют основу для классификации их свойств и выбора испытательных методов. Эти методы также важны для контроля качества и разработки новых огнеупорных материалов.

Таблица 1.1 - Эксплуатационные характеристики огнеупоров

Вид испытания	Важные для практики свойства
Термическое и термомеханическое	Огнеупорность Температура деформации под нагрузкой Ползучесть под нагрузкой Предел прочности при высоких температурах Термическое расширение Дополнительная усадка / расширение (огнеупоров в процессе службы) Термостойкость
Термотехническое	Теплопроводность Удельная теплоёмкость Плотность сырого материала Температуропроводность

Огнеупорные материалы применяют для изготовления внутреннего облицовочного слоя (футеровки) металлургических печей и ковшей для расплавленного металла. Огнеупорные материалы способны выдержать нагрузки при высоких температурах, противостоять резким изменениям температур, химическому воздействию шлака и печных газов. Огнеупорность материала определяется температурой его размягчения. По химическим свойствам огнеупорные материалы разделяют на кислые, основные, нейтральные.

Высокое качество огнеупорных материалов — основное условие долговечности футеровки. Огнеупорные материалы должны обладать химической инертностью, высокими огнеупорностью и термической стойкостью, малыми теплопроводностью и электропроводностью, постоянством объема при повторных нагревах, допускать простую технологию применения и быть дешевыми.

Огнеупоры имеют очень большое значение в экономике нашей страны. Без огнеупоров невозможно выплавить ни 1 т металла, произвести ни 1 т цемента, стекла, ряда химических соединений, получить ни 1 кВт электроэнергии на ТЭС и много других областей, не мыслимых без огнеупоров.

Современные тенденции развития производства и применения огнеупоров заключаются в следующих моментах:

- повышение качества огнеупоров. Если раньше под повышением качества огнеупоров понимали увеличение показателей их свойств (прочности, плотности, термостойкости и др.), то сейчас фактически повышение качества огнеупоров означает степень их полезности у потребителей, т.е. степень удовлетворения потребностей потребителя комплексом показателей: повышением стойкости огнеупоров, снижением расхода огнеупоров на 1 т продукции, технико-экономическим эффектом и

итоговым показателем - коэффициентом эффективности огнеупоров (суммой производства и применения огнеупоров).

Другой актуальной современной тенденцией производства и применения огнеупоров является разработка технологии новых видов огнеупоров. Так, например, только в области шпинелидных огнеупоров по данным академика А.С. Бережного существует 1,5 тыс. шпинелидов, из которых можно изготовить 84 видов новых огнеупоров. Это без добавки графита, а с добавкой графита и бескислородных соединений можно получить более 200 видов новых высокостойких огнеупоров, изготовленных по электронной технологии. В этой области относительно подробно рассмотрены только шпинелиды системы $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и начаты работы по шпинелидным наноогнеупорам [3].

Для решения этих задач необходимо создать методологические основы и последовательность проектирования футеровок нового поколения, при следующих параметрах:

входные параметры:

- условия службы и механизм износа огнеупоров;
- расчеты физико-химических моделей огнеупоров нового поколения с помощью компьютерных программ;
- уточнение термофизических и химических свойств огнеупоров нового поколения путем изготовления лабораторных образцов и определение их свойств;
- разработка компьютерной технологии производства и применения огнеупоров нового поколения;

выходные параметры:

- расчеты, проектирования и изготовление теплоизоляционных футеровок нового поколения, полностью удовлетворяющих требованиям металлургов и других потребителей.

Материалы, которые могли бы найти применение в качестве футеровки металлургических печей, можно разделить на следующие группы окислы, карбиды, нитриды, сульфиды, бориды и элементы.

Сырье для *огнеупорных материалов* - простые и сложные оксиды (например, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , MgO-SiO_2), бескислородные соединения (например, графит, нитриды, карбиды, бориды, силициды), а также оксинитриды, оксикарбиды, сиалоны.

Для изготовления огнеупоров используют разнообразные технологии и процессы. Преобладающей является технология, включающая предварительную, тепловую обработку и измельчение компонентов, приготовление шихт с добавлением пластифицированных составляющих, формование из них изделий прессованием на механических и гидравлических прессах или экструзией с последующей допрессовкой или литьем, обжиг в туннельных, реже в периодических и газокамерных печах для получения заданных свойств материала.

Огнеупорные изделия могут быть формованными и неформованными.

Неформованные огнеупоры - огнеупоры, изготовленные без определенных форм и размеров в виде кусковых, порошковых и волокнистых материалов, а также паст и суспензий. Неформованные огнеупорные материалы обычно упрочняют введением минеральных (например, жидкое стекло) или органических (полимеры) связующих.

К ним относят металлургические заправочные порошки, заполнители и мелкозернистые компоненты для огнеупорных бетонов, огнеупорные цементы, бетонные смеси и готовые к применению массы, мертели, материалы для покрытий (в т.ч. торкрет-массы), некоторые виды волокнистых огнеупоров.

Неформованные огнеупоры могут быть сухими, полусухими, пластичными и жидкотекучими.

Неформованные огнеупоры применяют для выполнения и ремонта футеровок сталеразливочных ковшей (набивные и наливные кремнеземные, высокоглиноземные и магнезиальные массы); конвертеров (торкрет-массы), нагревательных и обжиговых печей (шамот, и высокоглиноземные массы), индукционных печей (корундовые и периклазовые массы), коксовых печей (обмазки), подин мартен, и электродуговых печей (заправочные порошки) и т. д.

Формование огнеупорных материалов проводят методами полусухого и горячего прессования, пластического формования, литья (вибrolитья) из текучих масс или расплава материала, а также распилом предварительно изготовленных блоков или горных пород.

Формованные огнеупоры применяют для изготовления огнеупорных кладок стен, сводов, подов и других конструкций коксовых, мартеновских и доменных печей, печей для выплавки различных сплавов, при футеровке ядерных реакторов, МГД-генераторов, авиационных и ракетных двигателей; неформованные - для заполнения швов при кладке формованных огнеупоров, нанесения защитных покрытий на металлы и огнеупоры.

По характеру термической обработки различают безобжиговые и обожженные огнеупорные материалы.

Безобжиговые огнеупоры - изделия из огнеупорных материалов и связки, приобретают требуемые свойства при сушке с температурой менее 400°C (после нагрева изделий от 400 до 1000°C их называют термообработанными). Связкой могут быть глины, керамические суспензии, растворы фосфатов, щелочные силикаты (жидкое стекло), смолы термопластичные и термореактивные, эластомеры и другие безобжиговые огнеупоры по прочности и пластичности не уступают, а по термостойкости превосходят обожженные огнеупоры.

Наиболее широко применяют следующие безобжиговые огнеупоры: кремнеземистые бетонные блоки (для нагревательных колодцев), шамот и высокоглиноземные (для обжиговых агрегатов), магнезиальноизвестковые на смоляной (пековой) связке (для сталеплавильных конвертеров) периклазовые

и периклазохромитовые (для сталеразливочных стаканов), магнезиальные в стальных кассетах.

Для обожженных огнеупорных материалов температура обжига превышает 600 °С и определяется достижением необходимых физико-химических свойств материала. Обжиг огнеупорных материалов проводят в плазменных или электрических печах периодического или непрерывного действия - камерных, кольцевых, туннельных, шахтных и др.

Другие важные свойства огнеупорных материалов - пористость, термическая стойкость, теплопроводность, температура начала деформации под нагрузкой и химическая стойкость в различных средах.

По пористости (объемной доле пор в %) различают:

- особоплотные огнеупорные материалы (пористость менее 3%),
- высокоплотные (3-10%),
- уплотненные (16-20%),
- материалы повышенной пористости (20-30%),
- легковесные (45-75%) - огнеупоры с высокой (45-85%) пористостью.
- ультралегковесные (75-90%), к которым обычно относят волокнистые огнеупорные материалы.

По химико-минеральному составу огнеупоры делят на типы (кремнеземистые, алюмосиликатные, глиноземистые, глиноземоизвестковые, магнезиальные, известковые, хромистые, цирконистые, оксидные, углеродистые, карбидкремниевые и бескислородные), на типы на группы. При композиционном составе в наименовании огнеупоров на первое место ставится преобладающий компонент (например, периклазохромитовые и хромитопериклазовые).

Графитовые огнеупорные материалы для изготовления форм. С целью уменьшения взаимодействия между расплавом и формой вместо кварцевых песков применяют высокоогнеупорные материалы и материалы высшей огнеупорности.

В качестве наполнителя используют огнеупорные материалы, которые имеют одинаковый коэффициент термического расширения (КТР) с материалом оболочки, так как при различии в КТР возможно возникновение напряжений и трещин в оболочковой форме при ее прокаливании и заливке.

В металлургии используются композиционные огнеупорные материалы для футеровки печей, для кожухов, арматуры печей, наконечников термодар, погружаемых в жидкий металл, и др. В данном случае эффективность применения заключается в увеличении срока службы металлургического оборудования. В горнорудной промышленности из композиционных материалов на основе тугоплавких соединений изготавливают буровой инструмент, коробки буровых машин, детали буровых комбайнов, транспортеров и др. Эффективность применения заключается в высокой абразивной стойкости и износостойкости композиций.

Для изготовления литейных форм применяют различные огнеупорные материалы. Химические свойства формовочных материалов в значительной

степени predeterminedются их минералогическим составом. Для изготовления оболочковых форм используют следующие огнеупорные материалы: кварцевый песок, дистен-силиманит, цирконовый песок, электрокорунд, оксид магния и оксид кальция.

Сталеплавильное производство является крупнейшим потребителем огнеупоров: при выплавке и разливке стали, расходуется 40% общего количества производимых огнеупорных изделий, в том числе наиболее качественных на основе оксидов магния и алюминия. Расход их зависит в значительной степени от структуры сталеплавильного производства [1]. Таким образом, сокращение удельного расхода огнеупоров в металлургии – актуальная задача, решение которой невозможно без изучения механизма термического разрушения.

Шамотные огнеупоры – содержат в своём составе 28-45% Al_2O_3 и 50-70 SiO_2 . Технология производства формованных шамотных огнеупоров включает: обжиг глины (каолина) при 1300-1500 °С во вращающихся или шахтных печах, измельчение полученного шамота, смешивание со связующей глиной и водой (иногда с добавлением других связующих материалов), формование, сушку и обжиг при 1300-1400 °С.

Шамотные огнеупоры применяют для футеровки доменных печей, сталеразливочных ковшей, нагревательных и обжиговых печей, котельных топок и др., а также для изготовления сифонных изделий для разливки стали. Неформованные шамотные огнеупоры изготавливают из измельченного шамота и связующих материалов и применяют в виде мертелей, набивных масс, порошков, заполнителей бетонов при выполнении и ремонте огнеупорных футеровок разных тепловых агрегатов.

Отличительной особенностью высокоглиноземистых огнеупорных изделий является повышенное содержание Al_2O_3 , которое превышает 45 %. Огнеупорность высокоглиноземистых изделий составляет порядка 1750 °С и выше. В сумме с высокой температурой начала размягчения и повышенной химической стойкостью против кислых и щелочных расплавов позволяет использовать их в основных тепловых агрегатах металлургической промышленности.

Наиболее распространенными агрегатами для применения высокоглиноземистых огнеупорных изделий являются: верхняя часть стен и купола воздухонагревателей, кладке лещади и горна в доменных печах, при непрерывной разливке стали; в печах с рабочей температурой 1400-1500 °С, сталеразливочные ковши при обработке стали вакуумированием, как заполнители огнеупорных бетонов, мертелей и т.п.

Эти огнеупорные изделия бывают трех видов:

- Муллитокремнеземистые (Al_2O_3 - 45-62%), МКР, имеют шамотную основу из глины и бокситов; характеризуются содержанием Al_2O_3 до 62 %. Они производятся методом плавки в электрической печи оксидов алюминия и кремния.

- Муллитовые (Al_2O_3 - 62-72 %);

- Муллитокорундовые (Al_2O_3 - 72-90 %) МК, так же, как и МЛ, имеют основу из глиноземов, маложелезистых бокситов и электрокорундов.

Высокоглиноземистые корундовые огнеупоры. К ним относятся огнеупоры, содержание Al_2O_3 в которых >95 %. Для изготовления такого огнеупора используют порошок электроплавкого корунда и технический глинозем. После формировки его обжигают при температуре 1600 – 1750 °С. Огнестойкость получаемого материала позволяет использовать его в процессах с температурой 1750 – 1800 °С, корундовый огнеупор способен устойчиво контактировать с жидким металлом и шлаками, кислотами, щелочами и расплавленным стеклом.

Из корундовых огнеупоров изготавливают корундовые плиты для шибберных затворов сталеразливочных ковшей, изделия для футеровки камер вакууматоров стали, насадки высокотемпературных воздухонагревателей, чехлы термонар, тигли для плавки стекол, металлов и др.

Неформованные корундовые огнеупоры - мертели и бетоны с корундовым заполнителем применяют для футеровки патрубков вакууматоров стали, а массы и обмазки - для изготовления и ремонта огнеупорных футеровок с рабочей температурой более 1700 °С.

Большое внимание уделяется магнезитовым огнеупорам, как одним из наиболее перспективных. Возросло и количество разработанных огнеупорных составов на основе MgO . Новые огнеупоры обладают улучшенными показателями по пределу прочности, пределу применяемых температур и др. [4, 5].

Магнезиальные огнеупоры – огнеупорные изделия, содержащие в основе MgO . Их изготавливают из смеси обожженных и сырых материалов, которые после добавки связки проходят термообработку при температуре 1500-1900 °С.

Такие огнеупоры обладают высокой огнестойкостью, что позволяет применять их в процессах, связанных с расплавом металла и шлаками, а также при футеровке агрегатов металлургии. Магнезиальные огнеупорные изделия имеют высокую стойкость при взаимодействии с расплавами металлов и основных шлаков.

Магнезиальные огнеупорные изделия бывают трех видов:

Магнезиальносиликатные огнеупоры - их основу составляет форстерит Mg_2SiO_4 , к которому добавлены 50-60 % MgO , 25-40 % SiO_2 и связующая добавка. Магнезиальносиликатные огнеупоры формуют со связующей добавкой и обжигают при 1450-1550 °С (или используют без обжига).

Основные свойства магнезиальносиликатных огнеупоров: пористость открытая 22-28%, температура начала размягчения под нагрузкой - до 1610-1620 °С.

Магнезиальносиликатные огнеупоры применяют для футеровки насадок регенераторов мартенов, и стекловарных печей, сталеразливочных ковшей (в т.ч. в виде набивных масс), плавильных агрегатов ЦМ, а также для изготовления сталеразливочных стаканов и др. Неформованные

магнезиальносиликатные огнеупоры могут применяться как добавка в металлургических порошках.

Магнезиальношпинелидные огнеупоры имеют в своем составе периклаз и хромшпинелид MgO . Обжигаемые при температуре 1700-1850 °С, периклазохромитовые огнеупоры имеют в своем составе более 60 % MgO , и от 5 до 20 % Cr_2O_3 . Для получения нужных характеристик огнеупора необходим чистый, более 96 %, MgO , а также концентраты хромита.

К магнезиальношпинелидным огнеупорам (также относят: хромитопериклазовые, изготавливаемые из смеси периклазового порошка с хромитовой рудой и содержащие 40-60 % MgO и 15-35 % Cr_2O_3 ; периклазошпинельные (более 40 % MgO и 5-55 % Al_2O_3), шпинельные, состоящие в основном из шпинели состава MgO и Al_2O_3 и хромитовые огнеупоры (более 30 % Cr_2O_3 и более 40 % MgO).

Такие огнеупоры используют в самых ответственных местах металлургических агрегатов: в сталелитейных печах при футеровке сводов, в горловинах и летках кислородных конвертеров, в сталелитейных ковшах, в высокотемпературных печах.

Стоимость магнезиальношпинелидных огнеупоров более низкая, чем магнезиальношпинелидных периклазохромитовых, поэтому первые применяются на менее ответственных участках металлургических агрегатов.

Магнезитоизвестковые - изготавливаются из прошедшего обжиг доломита или из составов, в которые входят окислы магния и кальция. Такие огнеупоры служат для футеровки конвертеров.

Периклазовые огнеупоры - магнезиальные огнеупоры, содержащие более 85 % MgO . Их изготавливают из периклазового порошка с добавлением клеящей связки обжигом при 1600-1900 °С; для безобжиговых периклазовых огнеупоров используют связки из лигносульфонатового сульфата магния и др.

Периклазовые огнеупорные изделия применяют для футеровки стенок мартеновских печей, миксеров, печей для плавки меди и никеля, высокотемпературных нагревательных печей, леток кислородных конвертеров и др., а также в виде плит шиберных затворов сталеразливочных ковшей, стаканов для разливки сталей, пористых фурм для продувки стали газами и т.п. Неформованные периклазовые огнеупоры используют для изготовления мертеля, металлургических (заправочных) порошков, набивных масс для вакууматоров стали, индукционных печей и др.

Периклазоуглеродистые огнеупоры - огнеупоры, изготовленные из периклазового порошка с добавлением 6-25 % природного или искусственного графита и органической связки (например, фенольной порошкообразной с этиленгликолем или бакелита). производятся из спеченного и плавленого периклаза с добавлением 6-25 % графита (натурального или искусственного) и органической связки (например, фенольной с этиленгликолем или бакелита).

Периклазоуглеродистые огнеупоры используются в промышленности для футеровки агрегатов, подающих газ в конвертерах со смешанной продувкой, а

также участков стен мощных электродуговых печей. Широко применяются периклазоуглеродные огнеупоры и в производстве шиберных затворов, а также шлакового пояса электродуговых печей и сталеразливочных ковшей.

Группа Магнезит в 2011 г модернизирует 4 электропечи и увеличит выпуск плавленного периклаза до 50 тысяч тонн в год.

Плавленный периклаз является основой для всех высококачественных огнеупорных изделий и увеличение объемов его производства входит в число ключевых стратегических задач Группы Магнезит.

Отличительной особенностью плавленных материалов являются их высокая плотность и значительная коррозионная стойкость. В технологии огнеупоров плавленные материалы занимают особое место, поскольку позволяют выпускать продукцию повышенной стойкости и развивать высокоэффективные процессы в металлургии, химической технологии, производстве строительных материалов, энергетике, приборостроении и других отраслях промышленности [6].

Алюмопериклазовые огнеупоры сочетают в себе качества углеродсодержащих и высокоглиноземистых огнеупоров. Хорошая термостойкость последних (более высокая, чем у огнеупоров основного состава) повышена введением углеродного компонента.

Алюмопериклазовые огнеупоры изготавливаются с использованием корунда, плавленного или спеченного периклаза, алюмомагнезиальной шпинели, высококачественных спеченных бокситов и крупночешуйчатого графита с различными функциональными добавками. Содержание Al_2O_3 в них превышает 73 %.

Данный вид огнеупорных изделий предлагается как альтернатива к периклазоуглеродистым и высокоглиноземистым огнеупорам, в случае если их стойкость не удовлетворяет техническим условиям. Они используются при футеровке сталеразливочных ковшей и кислородных конвертеров.

Периклазохромитовые изделия содержат более 60 % MgO и 5-20 % Cr_2O_3 . Периклазохромитовые огнеупоры формуют и обжигают при 1700-1850°C. Для высококачественных периклазохромитовых огнеупорных изделий используют MgO чистотой более 96 % и концентраты хромита.

Данный вид огнеупоров характеризуется высокой термостойкостью и стойкостью к фаялитовому шлаку. Они производятся из спеченного и плавленного периклаза с добавлением хромитовой руды. Содержание магнезита колеблется от 65 до 83 %, хромита – от 17 до 35 %.

Хромитопериклазовые огнеупоры используются в цветной металлургии для кладки высокотемпературных печей, в печах взвешенной плавки и обеднения шлаков, для футеровки отражательных печей, конвертеров. Хромитопериклазовые огнеупорные материалы применяются также в средней части насадок регенераторов, работающих при температурах 700-1100 °C.

1.2 Свойства огнеупоров и их влияние на стойкость футеровки

Основное свойство огнеупорных изделий - огнеупорность, т.е. способность изделия противостоять, не расплавляясь, действию высоких температур. Огнеупорность характеризуется температурой, при которой стандартный образец из материала в форме трехгранной усеченной пирамиды высотой 30 мм и сторонами оснований 8 и 2 мм (конус Зейгера) размягчается и деформируется так, что его вершина касается основания. Определенная таким образом температура обычно выше максимально допустимой температуры эксплуатации огнеупорных материалов.

Различают:

- собственно огнеупорные материалы (огнеупорность 1580-1770 °С);
- высокоогнеупорные (1770-2000 °С);
- материалы высшей огнеупорности (выше 2000 °С).

Огнеупоры могут быть общего назначения и для определения тепловых агрегатов и устройств, например, доменные, для сталеразливных ковшей и т.д., что указывается в нормативно-технической документации.

Термическая стойкость — это способность огнеупорных изделий выдерживать резкие колебания температур, не растрескиваясь и не разрушаясь.

Растрескивание или разрушение огнеупорных изделий при резких изменениях температуры объясняется возникновением в них напряжений при уменьшении или увеличении объема.

При нагревании температура наружных слоев огнеупорных изделий (до наступления теплового равновесия) значительно выше, чем внутренних, причем эта разница тем больше, чем меньше их теплопроводность и чем выше скорость повышения температуры при нагревании.

Под влиянием термического расширения при нагревании, т. е. увеличения объема, наружные слои огнеупорных изделий расширяются значительно больше, чем более холодные внутренние слои, при этом в определенных слоях огнеупорных изделий появляются скалывающие напряжения; если по своей величине они превосходят силы сцепления частиц между собой, то в них появляются трещины и отколы.

При охлаждении наружные слои огнеупорных изделий остывают быстрее, чем внутренние, причем уменьшение объема наружных слоев всегда происходит с опережением изменения объема внутренних, более нагретых слоев. Возникающие при этом растягивающие напряжения, так же как и при нагревании огнеупоров, приводят к их растрескиванию и разрушению.

Термическая стойкость кирпича определяется количеством теплосмен, т. е. количеством попеременных нагревов до 1300° С и охлаждений в проточной воде до потери 20% массы первоначально взятого образца вследствие его растрескивания.

Наибольшей термостойкостью обладают многошамотные, корундовые, углеродистые и карборундовые огнеупорные изделия, а наименьшей термостойкостью — динасовые, обладающие большими изменениями объема при превращении одной кристаллической формы в другую в определенных интервалах температур, и магнезитовые, составляющие которых имеют различные коэффициенты расширения.

Термическая стойкость огнеупорных изделий в основном зависит от их структуры и природы исходного сырья, причем, чем меньше температурное изменение объема огнеупорных изделий при резком их нагревании и охлаждении, тем выше термическая стойкость.

Такие особенности огнеупорных материалов, как малая деформативность, небольшая релаксационная способность и хрупкость способствуют возникновению термических напряжений, которые может привести к разрушению материала.

Механическая прочность огнеупорных изделий характеризуется пределом прочности в кгс/см², которую выдерживает образец при сжатии в обычных температурных условиях,

Предел прочности на сжатие огнеупоров определяется их структурой. Чем плотнее, мелкозернистее и однороднее структура огнеупорных изделий, тем меньше в них трещин и тем выше их механическая прочность.

В связи с тем, что механическая прочность огнеупоров связана с их структурой, обуславливающей пористость, шлакоустойчивость, термическую устойчивость и другие качества, предел прочности на сжатие при нормальных условиях является важным показателем. Чем выше предел прочности при сжатии, тем лучше качество огнеупоров. При обычной температуре предел прочности на сжатие находится в пределах от 80 до 1000 кгс/см².

Огнеупорные изделия в тепловых агрегатах в большинстве случаев подвергаются сжатию, в некоторых случаях – истиранию и очень редко – изгибу. Усилия сжатия весьма незначительны, так как возникают под действием собственной массы огнеупорной кладки и обычно не превышают 1 кгс/см² и только в редких случаях достигают 3-4 кгс/см².

Истирающему действию твердыми и жидкими материалами огнеупорные изделия подвергаются в шахтных (доменных, известеобжигательных вагранках) и вращающихся печах, где твердая шихта, загружаемая в печь, непрерывно перемещается, соприкасаясь при этом с кладкой, и разрушает (истирает) ее. Чем выше газопроницаемость и ниже температура деформации огнеупорных изделий под нагрузкой при высоких температурах, тем быстрее происходит ее истирание.

Сопротивление огнеупорных изделий изгибу примерно в 3-5 раз меньше сопротивления сжатию.

В работе [7] приведены результаты испытаний углеродсодержащих огнеупоров производства ОАО «Комбинат Магнезит». В статье указаны характеристики изделий, их стойкость, а также отмечена повышенная

устойчивость огнеупоров к термическому скалыванию при колебаниях температуры. При этом стоит отметить, что такая характеристика, как предел прочности при сжатии (принимая значения от 19 до 61 МПа – для разного вида огнеупоров) приведена только при температуре 20 °С. Таким образом, в заводских данных не показана динамика изменения этого параметра в зависимости от температуры.

При разработке тепловых режимов разогрева высокотемпературных агрегатов, значения многих параметров принимаются для расчётов постоянными, т.е. не зависящими от температуры. Так, зачастую, для расчётов принимают постоянными значения удельной объёмной теплоёмкости c , коэффициента теплопроводности λ и предела прочности σ . Между тем, значение такого параметра, как предел прочности материала на сжатие сильно зависит от температуры. Так, если при температуре 20 °С предел прочности на сжатие шамотного огнеупора составляет 20 МПа, то при 600 °С предел прочности равен уже 40 МПа [8].

Термомеханические свойства определяют, используя высокотемпературные методы с приложением внешних сил. При этом в испытуемом материале возникают механические напряжения. Взаимозависимость напряжения и деформации у огнеупорных материалов при высоких температурах очень сложная, поскольку имеют место не только обратимые, упругие деформации, но и необратимые, пластические, зависящие от времени деформации.

Термомеханическое поведение огнеупоров вследствие этого может рассматриваться как взаимозависимость параметров:

- напряжения;
- деформации;
- температуры;
- времени.

Для определения термомеханических и термотехнических свойств огнеупоров было разработано много методов, но только немногие из них нашли применение в мировой лабораторной практике и были соответственно стандартизированы:

- ISO 1893; ГОСТ 4070-2000 (EN 993-8; DIN 51053): Determination of Refractoriness Under Load (differential - with rising temperature).
- ISO 3187; ГОСТ 4070-2000 (EN 993-9; DIN 51053): Determination of Compression.
- ISO 5013; ГОСТ Р 50523-93 EN 993-7; DIN 51048): Determination of Modulus of Rupture at Elevated Temperatures.
- ISO 8894-1(EN 993-14; DIN 51046): Determination of Thermal Conductivity; Hot-wire Method (cross array; $X < 1,5 \text{ W/mK}$).
- ISO 8894-2 (EN 993-15): Determination of Thermal Conductivity; Hot-wire Method (parallel; $X < 25 \text{ W/mK}$).

Один из методов определения термомеханических и термотехнических свойств огнеупоров по ГОСТ 4071.1-94 деформации огнеупоров под

нагрузкой - это мера деформационного поведения огнеупорного материала при постоянном приложенном давлении при комнатной температуре. Измерения проводятся в статической атмосфере при комнатной температуре. Для повышения точности измерений дополнительно прилагается установка для продувки измерительной камеры инертным газом.

Для испытания углеродсодержащих материалов (например, магнезитокарбоновые кирпичей) реализована контролируемая испытательная атмосфера с использованием аппаратуры.

Система с плавно меняющейся нагрузкой устройство нагрузки может быть оборудовано по выбору дополнительно механизмом, позволяющим изменять нагрузку непрерывно. При варьируемой преднагрузке до 300 Н может быть дана дополнительная изменяющаяся нагрузка от 0 до 700 Н со скоростью изменения в интервале 0,3 - 3 Н/с.

Сущность этого метода. Образец для испытаний высверливают из изделия, вырезают или отсекают от одного из его прямых углов по направлению прессования. Если у изделия сложной формы (в том числе клинового) нет прямых углов или оно имеет форму тела вращения, образец изготавливают из его средней части по направлению прессования.

Образец высушивают до постоянной массы при температуре не ниже 110 °С или при температуре, на (15 ± 5) °С превышающей температуру кипения охлаждающей жидкости, применяемой при изготовлении или шлифовании образцов.

Образец или вспомогательное устройство с образцом устанавливают одной из нагружаемых поверхностей на нажимную плиту, обеспечивая центрирование образца. При испытании образцов, изготовленных из высокоплотных изделий или изделий из абразивных масс (глиноземистых, карбидкремниевых), рекомендуется применять картонные прокладки, помещаемые между образцом и нажимными плитами.

Размеры прокладок должны быть не менее чем на 5 мм больше размеров нагружаемых поверхностей испытуемого образца. Образец нагружают равномерно и непрерывно со скоростью $(1,0 \pm 0,1)$ Н/(мм² · с) до разрушения. Допускается увеличивать скорость до $(2,0 \pm 0,1)$ Н/(мм² · с). Регистрируют максимальную нагрузку. Недостаток этого метода при испытаниях огнеупорного материала - отсутствие учёта воздействия температуры.

Существует следующий метод ГОСТ 25085-81 определения прочности на деформацию при высоких температурах.

Термическое растрескивание представляет собой явление, возникающее в результате внутренних (термических, температурных) напряжений, превышающих допустимый предел прочности при данной температуре. Они вызваны различием термического расширения зон футеровки при тепловых ударах или при постоянном большом температурном градиенте. Если скорость разогрева будет такой, при которой в футеровке возникнут температурные напряжения превышающие допустимые пределы, то это

может привести к преждевременному её разрушению. Общепринятая скорость разогрева высокотемпературных агрегатов $60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ [9].

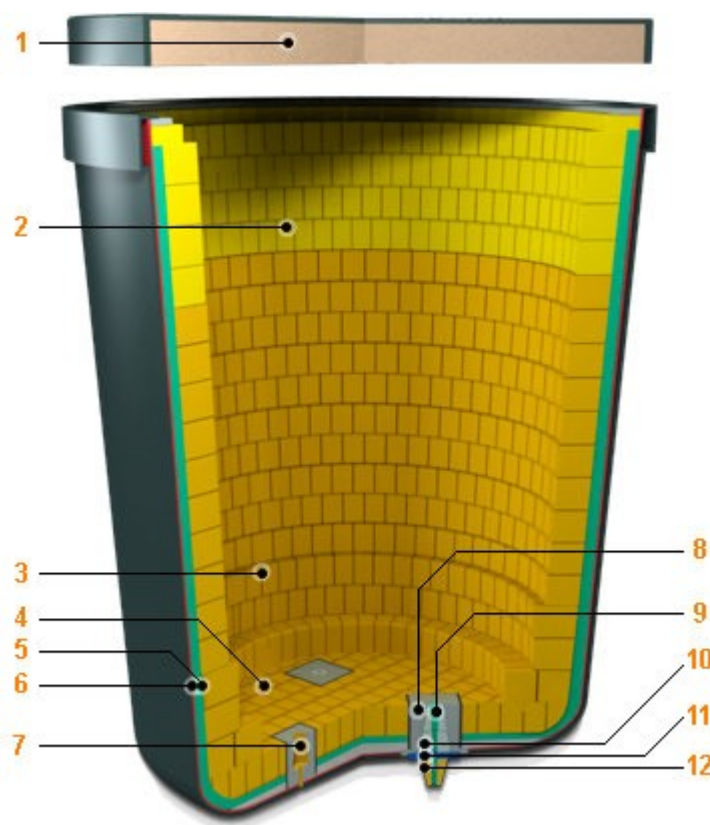
Общие вопросы тепловой работы высокотемпературных агрегатов представлены в литературе достаточно широко. Подробно рассматриваются вопросы термодинамических основ работы печей, радиационных и конвективных режимов работы, тепломассообмена в печах и др. [8, 10].

Волкова О. и Янке Д. в своей работе приводят результаты разработки числовой модели ковша для всестороннего рассмотрения теплового состояния сталеразливочных ковшей с целью оценки остаточной толщины стенки и температурных потерь расплава при различных условиях эксплуатации. Результатом работы является анализ тепловых состояний ковшей с доломитовой и шпинельной футеровкой [11].

1.3 Характеристика объекта исследования

В качестве объекта исследования тепловой работы высокотемпературных агрегатов были выбраны сталеразливочные ковши ёмкостью 25 тонн. Эксплуатация данных ковшей осуществляется на предприятии ПФ ТОО «Кастинг» (г. Павлодар). Ковши предназначены для слива металла из печей, обработки металла на установке печь–ковш до необходимого химического состава и транспортировки металла до машины непрерывного литья заготовок. Среднее время нахождения металла одной плавки в ковше составляет 165 минут. В среднем температура металла в ковше – $1615\text{ }^{\circ}\text{C}$. Общий вид ковша представлен на рисунке 1.1.

Рабочий слой футеровки исследуемого сталеразливочного ковша ёмкостью 25 тонн составляют периклазоуглеродистые огнеупорные материалы. Нижние ряды рабочего слоя футеровки составляют огнеупоры марки PFC – 9806 RA, два верхних ряда и шлаковый пояс – огнеупоры марки PFC – 9812 RA.



Зоны футеровки: 1-крышка фурмы; 2-шлаковый пояс; 3-стены; 4-днище; 5-арматурный слой; 6-теплоизоляционный слой; 7-фурма; 8-гнездовой блок; 9-стартовая смесь; 10-сталеразливочный стакан; 11-шиберная плита; 12-стакан-коллектор

Рисунок 1.1 – Общий вид 25 – тонного сталеразливочного ковша: 1 – разливочный стакан; 2 – продувочная пробка.

В таблице 1.2 приведены состав и некоторые характеристики используемых огнеупоров.

Таблица 1.2 – Состав и характеристики огнеупоров

Маркировка	Состав, %		Кажущаяся плотность, г/см ³	Открытая пористость, %	Предел прочности на сжатие, МПа
	MgO	C			
1	2	3	4	5	6
PFC – 9806 RA	≥ 80	≥ 8	≥ 3,05	≤ 4	≥ 40
PFC – 9812 RA	≥ 78	≥ 12	≥ 2,98	≤ 4	≥ 40

Футеровка ковша состоит из четырёх слоёв. Слой 1, непосредственно соприкасающийся с расплавленным металлом (рабочий слой), выложен

огнеупорными кирпичами толщиной 135 мм (шлаковый пояс – 150 мм). Слой 2 теплоизоляции состоит из набивной муллито – корундовой массы, толщиной 30 мм. Третий слой выложен из шамотного кирпича ШБ – 5 и имеет толщину 65 мм. Последний слой 4, соприкасающийся с кожухом ковша, представляет собой листы асбокартона, толщиной 10 мм (рисунок 1.2).

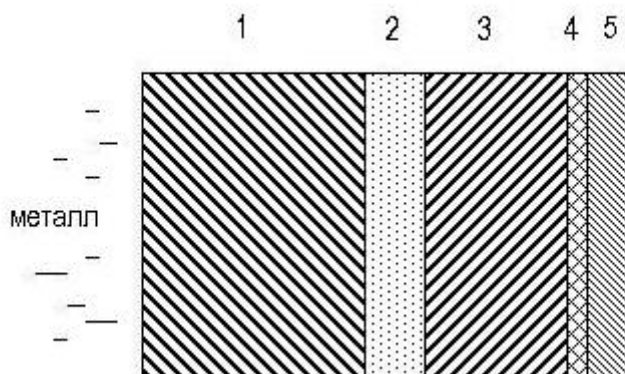
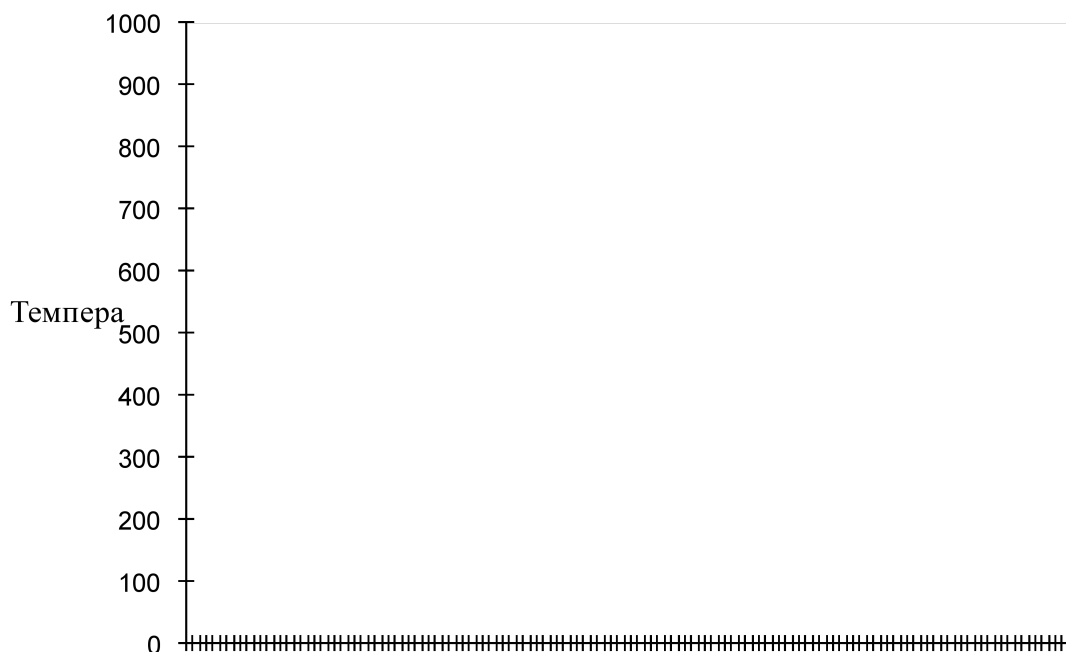


Рисунок 1.2 – Футеровка стен сталеразливочного ковша: 1 – рабочий слой; 2 – теплоизоляция; 3 – арматурный слой; 4 – асбокартон; 5 – металлический кожух.

Сушка и разогрев сталеразливочных ковшей производится газом на специальных стендах. При разогреве ковша не производится контроль температуры, т.к. стационарный контроль температуры технологически затруднён, а установка термопар непосредственно в футеровке может привести к аварийной ситуации, связанной с протечкой металла через футеровку и расплавлению кожуха.

Для исследования процесса нагрева ковша были произведены замеры температур внутренней поверхности футеровки [12]. Графики нагрева представлены на рисунке 1.3. Кривая 1 соответствует измерению температуры на 2/3 высоты ковша, а кривая 2 – на подине.



Графики нагрева являются ступенчатыми. Видна временная выдержка, соответствующая температуре 350 – 400°C (кривая 1) и 150 – 200°C (кривая 2).

Эксплуатация ковшей при использовании данной футеровки показывает, что средняя продолжительность работы ковшей до промежуточного ремонта составляет в среднем 22 плавки. Причины вывода ковшей в промежуточный ремонт: износ огнеупорной кладки шлакового пояса и неудовлетворительное состояние буферной массы над шлаковым поясом. Остаточная толщина огнеупоров шлакового пояса перед выводом ковша в промежуточный ремонт составляет в среднем 97 мм. Средняя продолжительность работы ковшей до капитального ремонта составляет 40 плавок, при одном промежуточном ремонте (замена верхних рядов огнеупоров).

Футеровка ковша в холодном состоянии при выводе его в капитальный ремонт не имеет монолитной структуры. Наблюдаются вертикальные трещины, проходящие через все ряды кладки. Трещины проходят через стыки кирпичей и располагаются по окружности ковша через каждые 5 – 7 кирпичей (50 – 70 см). Средняя толщина трещин составляет 3 мм. Трещины образуются вследствие термического расширения огнеупоров. Кладка рабочего слоя осуществляется без связующего раствора между кирпичами. Кроме того, в кладке не предусмотрены температурные швы.

Выводы:

1) Надежная эксплуатация высокотемпературных агрегатов зависит от качества огнеупорных материалов. Кроме того, основным условием

долговечности футеровки металлургического агрегата является анализ экспериментальных данных различных режимов разогрева футеровок при использовании разнообразных огнеупорных материалов.

2) В настоящее время наблюдается увеличение потребления магнезитовых огнеупорных материалов, как огнеупоров, имеющих высокие термомеханические показатели при относительно невысокой стоимости.

3) Объект исследования – сталеразливочный ковш, ёмкостью 25 тонн, при разогреве и эксплуатации имеет ряд проблем, связанных с температурными режимами; следствием чего является наличие трещин в магнезитовом рабочем слое футеровки.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО АГРЕГАТА

2.1 Теории прочности материалов

При решении вопросов повышения стойкости футеровки различных высокотемпературных агрегатов необходимо провести анализ причин, приводящих к разрушению огнеупорных материалов, а также создать модель тепловой работы футеровки в целом.

Анализ условий работы различных типов промышленных печей показывает, что механизм разрушения футеровок достаточно многообразен, но можно выделить одну общую причину – это наличие значительных градиентов температуры, возникающих в кладке печей.

Существует ряд теорий и гипотез, предложенных для вычисления критериев предельного состояния. Рассмотрим наиболее значимые из них.

Как показывают экспериментальные исследования, прочность материалов существенно зависит от вида напряженного состояния. В общем случае нагруженного тела напряженное состояние в какой-либо точке вполне может быть определено величиной напряжений в трех координатных плоскостях, проходящих через эту точку. При произвольном выборе положения координатных плоскостей, в каждой из них, вообще говоря, имеются и нормальные, и касательные напряжения. Для них вводятся соответствующие обозначения в плоскости xy : s_{zz} , t_{zx} , t_{zy} ; в плоскости xz : s_{yy} , t_{yx} , t_{yz} ; в плоскости yz : s_{xx} , t_{xy} , t_{xz} . Здесь первый индекс показывает ориентацию площадки, в которой действует напряжение, т.е. какой из координатных осей она перпендикулярна. Второй индекс указывает направление напряжения по координатной оси.

В каждой точке тела существуют три взаимно перпендикулярные плоскости, свободные от касательных напряжений, носящие название главных площадок. Нормальные напряжения в этих площадках называются главными напряжениями и обозначаются s_1 , s_2 , s_3 . При этом всегда $s_1 > s_2 > s_3$. Заметим, что более подробно вопросы теории напряженного состояния в точке обсуждены в десятом разделе настоящей книги, и по данному вопросу имеется обширная литература.

Напряженные состояния разделяются на три группы. Напряженное состояние называется:

- а) объемным или трехосным, если все главные напряжения s_1 , s_2 , s_3 не равны нулю;
- б) плоским или двухосным, если одно из трех главных напряжений равно нулю;
- в) одномерным или одноосным, если два из трех главных напряжений равны нулю.

Основной задачей теории прочности является установление критерия прочности, позволяющего сравнить между собой опасность различных напряженных состояний материала.

Выбранный критерий прочности должен быть обоснован на основе экспериментальных данных путем проведения испытаний различных материалов в зависимости от вида напряженного состояния, как функция от соотношений между значениями главных напряжений.

Заметим, что, так как в настоящее время строгой единой теории прочности материалов, в зависимости от вида напряженного состояния, не существует, поэтому при выполнении практических расчетов применяются упрощенные критерии.

В настоящее время при выполнении расчетов конструкций на прочность, при произвольных напряженных состояниях, широко используются теории прочности.

Перечислим наиболее известные в сопротивлении материалов теории прочности.

- Первая теория прочности — Теория наибольших нормальных напряжений.
- Вторая теория прочности — Теория наибольших деформаций.
- Третья теория прочности — Теория наибольших касательных напряжений.
- Четвертая теория прочности (энергетическая) — Теория наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения.
- Теория прочности Мора — [Теория предельных напряжённых состояний](#) (иногда говорят — V теория прочности).

Из всех вышеперечисленных теорий прочности наиболее полной, точной и всеобъемлющей является теория Мора. Все её положения были проверены экспериментально. Она подходит как для проверки прочности хрупких материалов (чугун, бетон, кирпич), так и для проверки на прочность пластичных материалов (низкоуглеродистая сталь). Теория наибольших нормальных напряжений и теория наибольших деформаций подходит только для прочностного анализа хрупких материалов, причём только для каких-то определённых условий нагружения, если требовать повышенную точность расчёта. Вот поэтому первые две теории прочности сегодня применять не рекомендуется. Результаты теории наибольших касательных напряжений и теории наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения можно получить в некоторых частных случаях нагружения при применении теории Мора.

В зависимости от условий нагружения материал может находиться в различных механических состояниях: упругом, пластическом и в состоянии разрушения. Под предельным подразумевают такое напряженное состояние, при котором происходит качественное изменение свойств материала — переход от одного механического состояния к другому. Для пластических материалов предельным считается напряженное состояние, соответствующее заметным остаточным деформациям, а для хрупких — такое, при котором начинается разрушение материала.

При линейном напряженном состоянии предельное значение единственного в этом случае главного напряжения может быть непосредственно определено из опыта (σ_T – для пластических материалов и σ_B – для хрупких). Поэтому оценка прочности в этом частном случае проста. В случае сложного напряженного состояния (объемного или плоского) при оценке прочности необходимо учитывать наличие двух или трех отличных от нуля главных напряжений. При этом опасное состояние материала зависит не только от величины главных напряжений, но и от соотношений между ними.

Из-за невозможности экспериментального определения критериев опасного состояния материала при сложном напряженном состоянии пользуются гипотезами, формулирующими условия перехода материала в опасное состояние. На основании таких гипотез построены теории прочности. Эти теории исходят из предпосылок о том, что сложное и линейное напряженные состояния считаются эквивалентными (по прочности), если они при пропорциональном увеличении главных напряжений в одно и то же число раз одновременно становятся опасными. Поэтому оценка прочности материала при любом напряженном состоянии основывается на результатах опытов при простом растяжении (сжатии), и исследуемое напряженное состояние сравнивается с линейным. Для материалов с выраженной пластичностью за опасное (предельное) состояние принимается такое, при котором начинают развиваться остаточные деформации. Для материалов, находящихся в хрупком состоянии, опасным считается такое состояние, которое предшествует началу появления трещин.

Общая запись условия прочности при сложном напряженном состоянии имеет вид:

$$\sigma_{\text{пр}} \leq [R], \text{ или } \sigma_{\text{пр}} \leq [\sigma],$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ — расчетное или приведенное напряжение при сложном напряженном состоянии.

Формулы приведенных напряжений устанавливаются теориями прочности в зависимости от принимаемых гипотез.

О применимости той или иной теории прочности для практических расчетов можно сказать следующее.

Разрушение материалов происходит путем отрыва за счет растягивающих напряжений или удлинений и путем среза за счет наибольших касательных напряжений. При этом разрушение отрывом может происходить при весьма малых остаточных деформациях или вовсе без них (хрупкое разрушение). Разрушение путем среза имеет место лишь после некоторой остаточной деформации (вязкое разрушение). Таким образом, первую и вторую теории прочности, отражающие разрушение отрывом, можно применять лишь для материалов, находящихся в хрупком состоянии. Третью и четвертую теории прочности, хорошо отражающие наступление текучести и разрушение путем

среза, надлежит применять для материалов, находящихся в пластическом состоянии.

Так как первая и вторая теории прочности обладают существенными недостатками, то в настоящее время утверждается мнение о нежелательности их применения. Таким образом, для практических расчетов следует рекомендовать четвертую (или третью) теорию прочности для материалов, одинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию, и теорию Мора — для материалов, различно ее проявляющихся растяжению и сжатию, т. е. для хрупких материалов (для них в настоящее время пока еще применяют и вторую теорию прочности).

Следует подчеркнуть, что состояние материала (хрупкое или пластическое) определяется не только его свойствами, но и видом напряженного состояния, температурой и скоростью нагружения. Как показывают опыты, пластичные материалы при определенных условиях нагружения и температуре ведут себя, как хрупкие, в то же время хрупкие материалы в определенных напряженных состояниях могут вести себя, как пластичные. Так, например, при напряженных состояниях, близких к всестороннему равномерному растяжению, пластичные материалы разрушаются, как хрупкие. Такие напряженные состояния принято называть «жесткими». Весьма «мягкими» являются напряженные состояния, близкие к всестороннему сжатию. В этих случаях хрупкие материалы могут вести себя, как пластичные. При всестороннем равномерном сжатии материалы могут выдержать, не разрушаясь, очень большие давления.

Кинетическая теория прочности подчеркивает необходимость учета влияния теплового движения (флуктуации тепловой энергии) на процессы деформирования и разрушения, особенно в их начальной стадии [13]. Процесс разрушения при нагрузках ниже критической не может происходить при отсутствии теплового движения атомов и молекул, которое является фактором, принципиально обуславливающим разрыв материала при нагрузках, меньших критической. Можно сделать вывод, что разрушение следует рассматривать как процесс, в котором вследствие тепловых флуктуации преодолевается энергетический барьер U_0 , сниженный в результате действия напряжений на величину $-U_a$. При этом процесс разрушения представляет собой ряд элементарных актов, связанных с тепловым движением атомов и молекул.

По кинетической теории прочности следует, что время, в течение которого объект может эксплуатироваться при максимальной нагрузке, должно совпадать с величиной, обратной частоте тепловых колебаний атомов. Резерв прочности материалов, таким образом, огромен, а степень его освоения зависит от уровня развития технологии и от уровня развития науки о прочности.

Согласно развиваемой С. Н. Журковым кинетической теории прочности твердых тел, нагруженный образец разрушается за счет хаотического теплового движения. Непрерывно возникающие дефекты кристаллической

решетки уже не рассасываются, а начинают скапливаться, образуя микроскопические, а затем и макроскопические разрывы в образце. Чем выше температура и больше приложенная нагрузка, тем быстрее накапливаются эти нарушения и тем раньше разрушается образец.

В соответствии с этой теорией, основанной на экспериментальных данных, разрушение различных материалов рассматривается как процесс, развивающийся во времени при приложении внешней силы.

Структура ряда широко используемых критериев кинетической теории прочности применительно к процессам динамического нагружения аналогична критерию С. Н. Журкова, в основу которого положен принцип температурно - временной суперпозиции.

Такой механизм разрушения объясняет смысл термина кинетическая теория прочности: разрушения в напряженном полимере как результат постепенной термомеханодеструкции макромолекул накапливаются до тех пор, пока не создадутся условия, обеспечивающие разрушение всего образца.

Теория Гриффитса. Разница между теоретической и практической прочностями по Гриффитсу заключается в том, что в реальных телах имеются многочисленные трещины (трещины Гриффитса), концентрирующие напряжения так, что на участках, свободных от трещин, напряжения достигают критических значений, равных и превышающих теоретическую прочность. Напряжение материала у трещины неодинаково, на остром конце трещины оно больше и равно:

$$\sigma_{\max} = 2\sigma_{cp} \sqrt{\frac{l}{r}} \quad (2.1)$$

где σ_{cp} — среднее напряжение в материале;

l — длина трещины около 10^{-4} см;

r — радиус кривизны кончика трещины равен приблизительно межатомному расстоянию $\approx (1-4)A^0$; $\left(\frac{l}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 10^2$, т.е. $\sigma_{\max}$ на два порядка больше σ_{cp} .

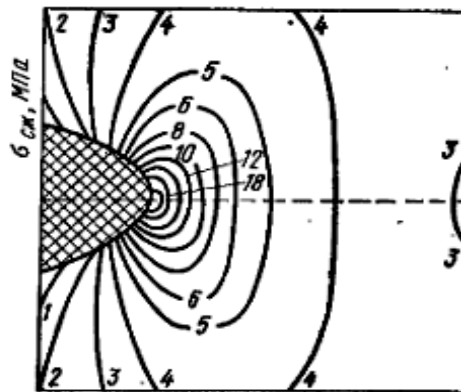


Рисунок 2.1 - Концентрация напряжений вблизи концевой части эллиптической трещины

Таким образом, при сравнительно небольшой величине среднего напряжения в материале на кончике трещины возникает большое локальное напряжение, приводящее к росту трещины. Растягивающие напряжения направлены перпендикулярно к трещине. Заштрихованная область представляет собой трещину. Цифры на кривых постоянного напряжения показывают, во сколько раз местное напряжение больше среднего.

Поры не только концентрируют напряжения, но и экранируют часть материала от напряжений. В самом деле материал, непосредственно расположенный над порой или под порой, испытывает гораздо меньшее напряжение, чем остальной материал, а материал между порами при этом будет испытывать еще большее напряжение. Экранизация напряжений в большей степени проявляется крупными порами.

Теория «двух стадий». По этой теории разрушение материалов под влиянием термических напряжений происходит в две стадии: зарождения трещин и их роста. Критерии термостойкости R , R^I и R^{II} относятся к стадии зарождения трещин.

Теория двух стадий не опровергает теорию максимальных напряжений, а развивает ее. Зародившаяся трещина в гетерогенных материалах, какими являются большинство огнеупоров, развивается медленно, а может и вообще не развиваться. По теории Гриффитса, трещины будут расти в том случае, если упругая энергия, освободившаяся из напряженной области, будет больше энергии, необходимой для создания двух новых поверхностей раздела.

По Хассельману, критерии распространения трещин выражаются следующими формулами [14]:

$$R^{II} = \frac{E}{[\sigma_{пч}^2 (1 - \mu)]}; \quad (2.2)$$

$$R^{IV} = R^{III} \cdot \nu_{эф} \quad (2.3)$$

где $\nu_{эф}$ — эффективная энергия, необходимая для создания двух новых поверхностей раздела.

Чтобы трещины не развивались, материал должен обладать высоким значением модуля упругости и низкой прочностью, а чтобы трещины не зарождались, модуль упругости должен быть низким, прочность высокой.

Кажущееся противоречие, в самом деле, не является противоречием. В гетерогенном материале трещины зарождаются в твердых фазах, и, чтобы трещины в них не зарождались, эти фазы должны иметь высокую прочность, а распространяются трещины во всем объеме многофазного материала: по твердым фазам и порам. Напряжения в порах гасятся. Для того чтобы трещины не развивались, материал должен иметь поры, а следовательно, в целом быть менее прочным.

Трещины, зарождающиеся при термоударах в магнезите и хромите, гасятся в порах определенного строения.

Критерий R^{IV} удовлетворительно описывает термостойкость огнеупоров микротрещиноватой текстуры и не подходит или не всегда подходит к оценке термостойкости зернистых материалов, хотя оба вида текстур относятся к гетерогенным.

Гогоци Г.А. предложил классифицировать огнеупоры по их отношению к термостойкости не степени гетерогенности, а по мере хрупкости [15]. Термостойкость с учетом меры хрупкости выражается формулой:

$$R^* = R(3 + \chi) / 4\chi . \quad (2.4)$$

2.2 Постановка задачи

Срок безаварийной работы любого теплоэнергетического агрегата во многом определяется прочностью футеровки, поэтому, несмотря на многочисленные исследования, вопрос о повышении её стойкости остаётся одним из наиболее важных. Обеспечение рациональных с точки зрения напряжённо–деформированного состояния условий эксплуатации составляющих её конструктивных элементов – один из путей повышения стойкости футеровки в целом.

Анализ проведённых исследований показывает, что существует множество причин, вызывающих разрушение футеровок теплоэнергетических агрегатов. Несмотря на это, можно выделить одну общую причину – наличие значительных градиентов температуры, возникающих при работе оборудования [16].

Наиболее напряжённым периодом в работе футеровки является разогрев. Именно в этот период возникают максимальные температурные перепады и изменяется температурный коэффициент расширения.

В процессе нагрева футеровка теплоэнергетических агрегатов подвергается интенсивному воздействию высоких температур и тепловых потоков. Это вызывает значительный перепад температур по толщине кладки и появление больших температурных напряжений и деформаций, приводящих к её растрескиванию. Глубина проникновения трещин определяется конструкцией агрегата, его размерами и материалом футеровки. Появление трещин уменьшает огнеупорные свойства материалов и ведёт к более интенсивному износу футеровки в целом.

Огнеупорные материалы в сталеразливочных ковшах используются в качестве высокотемпературной тепловой изоляции без существенных механических нагрузок. Это означает, что при анализе их разрушений можно пренебречь действием механических нагрузок и ограничиться рассмотрением тепловых воздействий.

В процессе эксплуатации сталеразливочных ковшей футеровка периодически нагревается в условиях наполнения жидкой сталью при высокой температуре и охлаждается при её разливе. Разность температур между сталью и подогретой футеровкой может достигать до 800 °С и более. Большая скорость изменения температуры футеровки при нагреве и охлаждении приводит к растрескиванию или отслаиванию поверхностного слоя.

Другими словами, если огнеупорная кирпичная стенка подвергается одностороннему нагреву, то с повышением температуры нагреваемой поверхности возрастает её расширение. Участок поверхности нагрева, испытывающий наибольшее расширение, разрушается под действием возникающего напряжения, поскольку максимальное давление, порождаемое расширением, превышает предел прочности этого участка при сжатии.

В общем случае термонапряжённое состояние рабочего слоя футеровки теплоэнергетического агрегата математически описывается следующими системами уравнений [17]:

1) Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho \cdot c}, \quad (2.5)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 q_v – мощность внутренних источников тепла, Вт/м³;
 ρ – плотность вещества, кг/м³;
 c – теплоёмкость вещества, Дж/(кг·К).

2) Уравнениями равновесия

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

3) Зависимостями между напряжениями и деформациями

$$\begin{aligned} E_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha T, \\ E_{yy} &= \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha T, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$E_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})] + \alpha T,$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2G} \sigma_{xy}; \quad E_{yz} = \frac{1}{2G} \sigma_{yz}; \quad E_{zx} = \frac{1}{2G} \sigma_{zx}.$$

4) Зависимостями между деформациями и перемещениями

$$E_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad E_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad E_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z},$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right),$$

(2.8)

$$E_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right),$$

$$E_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} \right)$$

Наибольшее практическое значение имеет задача в квазистатической постановке, когда не учитываются инерционные эффекты, так как динамические эффекты, обусловленные нестационарным нагревом, и тепловые потоки, образующиеся вследствие деформации, настолько малы, что ими можно пренебречь.

При таких допущениях исходные уравнения и зависимости (2.5 – 2.8) распадаются на уравнение теплопроводности и задачу о термоупругих напряжениях при заданном температурном поле. Таким образом, необходимо определить компоненты напряжений при известном распределении температур по толщине футеровки. Эти функции в каждой точке тела удовлетворяют исходным уравнениям (2.5 – 2.8) и граничным условиям. При этом тело считается идеально упругим и изначально однородным.

Напряжения, возникающие в слое футеровки, определим, рассмотрев зависимость между термоупругими напряжениями и деформациями.

$$E_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha T(x, y, z, t),$$

$$E_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha T(x, y, z, t),$$

(2.9)

$$E_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})] + \alpha T(x, y, z, t),$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2G} \sigma_{xy}; \quad E_{yz} = \frac{1}{2G} \sigma_{yz}; \quad E_{zx} = \frac{1}{2G} \sigma_{zx}.$$

При этом температура по толщине рабочего слоя изменяется по закону $T = f(y)$. В данном случае компоненты напряжения будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma; \\ \sigma_{zz} &= \sigma_{xz} = \sigma_{yx} = \sigma_{zy} = 0.\end{aligned}\tag{2.10}$$

С учётом того, что $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$; $\sigma_{zy} = \sigma_{yz}$; $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$ [15] система уравнений (2.5 – 2.9) примет вид:

$$\begin{aligned}E_{xx} &= \frac{1}{E}(\sigma - \nu \cdot \sigma) + \alpha T(y, t), \\ E_{yy} &= \frac{1}{E}(\sigma - \nu \cdot \sigma) + \alpha T(y, t), \\ E_{zz} &= -\frac{1}{E}(2 \cdot \nu \cdot \sigma) + \alpha T(y, t).\end{aligned}\tag{2.11}$$

При рассмотрении каждого слоя футеровки в отдельности деформацию этого слоя принимаем равной нулю ($E_{xx} = E_{yy} = E_{zz} = 0$). Таким образом, в качестве основной расчётной формулы для определения температурных напряжений будем использовать равенство [18]:

$$\sigma = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \cdot T(y, t)\tag{2.12}$$

Функция распределения температуры в рабочем слое футеровки будет иметь вид:

$$T(y, t) = T_{cp} - T_i,\tag{2.13}$$

где T_{cp} – среднеинтегральная температура, °С,
 T_i – температура в рассматриваемой точке, °С.

2.3 Выбор схемы расчёта температурных полей

Расчёт термонапряжённого состояния тела разбивается на две задачи: расчёт температурного поля тела во времени и расчёт непосредственно температурных напряжений. При расчёте температурных напряжений первым этапом необходимо подсчитать распределение температур по сечению футеровки в данный момент времени. Для этого используется математическое моделирование тепловых процессов, происходящих в теплоэнергетических агрегатах, основанное на их математическом описании.

Применение высококачественных математических моделей приносит значительный эффект. Они позволяют проводить исследования процессов, происходящих в агрегатах, при меньших затратах, чем практические исследования на реальных агрегатах или физических моделях. С помощью математических моделей можно ещё на стадии проектирования найти оптимальное конструктивное оформление агрегата и выбрать оптимальные режимные параметры его работы.

Процесс распространения тепла в футеровке ковша является нестационарным, поэтому для решения задачи нестационарной теплопроводности применим метод конечных разностей [19].

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho \cdot c}, \quad (2.14)$$

При этом уравнение теплопроводности будет иметь бесчисленное множество решений. Чтобы из этого множества выделить одно решение, соответствующее единичному явлению данного класса, необходимо знать условия однозначности. В условия однозначности входят геометрические условия, определяющие форму и размер тела; начальные условия, то есть распределение температуры в объёме тела в некоторый момент времени $\tau=0$, принимаемый за начало отсчёта; граничные условия, характеризующие тепловое взаимодействие окружающей среды с поверхностью тела.

В данном случае, с учётом известных температур, на внутренней поверхности футеровки будем иметь граничные условия 1 рода:

$$T|_{y=0} = T_i. \quad (2.15)$$

На внешней поверхности футеровки будем иметь граничные условия 3 рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=H} = \alpha (T_o - T|_{y=H}) \quad (2.16)$$

Начальные условия будут представлены заданным начальным распределением температур в футеровке:

$$T(y) = T_n, \quad 0 \leq y \leq H \quad (2.17)$$

Для решения задачи внутреннего теплообмена в рабочем слое футеровки примем некоторые допущения. В случае нагрева сталеразливочного ковша будем считать размеры в направлении осей x и z неограниченными, а толщину в направлении оси y конечной. Температура изменяется только по толщине, внутренних источников тепла нет. С учётом того, что $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$,

математическая формулировка одномерной задачи теплопроводности будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad 0 < y < H, \quad (2.18)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Разобьём всю толщину футеровки H на n конечных элементарных слоёв, толщина каждого из которых равна Δy , то есть:

$$H = n \cdot \Delta y. \quad (2.19)$$

Отсчёт времени будем вести конечными интервалами $\Delta \tau$. Тогда производную температуры по времени в левой части уравнения (2.18) можно приближённо выразить через конечные приращения температуры и времени следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \approx \frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta \tau}, \quad (2.20)$$

где T_{i+1}^k – температура некоторого k – го элементарного слоя в момент времени $i+1$, то есть по прошествии времени $\tau = (i+1) \cdot \Delta \tau$ с начала процесса;

T_i^k – температура того же k – го слоя в предыдущий, то есть в k – тый момент времени.

Точно также первую производную температуры по координате y можно представить как:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_1 \approx \frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\Delta y}, \quad (2.21)$$

то есть как приращение температуры по координате, отнесённое к приращению координаты. Здесь T_i^k – температура k – го элементарного слоя в i – тый момент времени, а T_i^{k-1} – температура предыдущего $(k-1)$ – го слоя в тот же момент времени.

Очевидно, что соседнее, то есть взятое через отрезок Δy , значение этой производной будет иметь вид:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_2 \approx \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta y}. \quad (2.22)$$

Разность между двумя этими величинами, отнесённая к отрезку Δy , даст конечно-разностное выражение для второй производной температуры по координате:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_2 - \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_1}{\Delta y}, \quad (2.23)$$

или

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_i^{k+1} - 2 \cdot T_i^k + T_i^{k-1}}{\Delta y^2}. \quad (2.24)$$

Подставляя выражения (2.20) и (2.24) вместо соответствующих производных в уравнение (2.18), получим это уравнение в конечно-разностном виде:

$$\frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta \tau} = a \cdot \frac{T_i^{k+1} - 2 \cdot T_i^k + T_i^{k-1}}{\Delta y^2}. \quad (2.25)$$

Так как в задачах нестационарной теплопроводности всегда известно начальное распределение температуры, цель расчётов методом конечных разностей заключается в том, чтобы зная распределение температуры в данный, например i – тый, момент времени, найти это распределение в последующий, то есть в $(i+1)$ – й момент. Таким образом, искомой величиной в уравнении (2.25) является температура k – того элементарного слоя в $(i+1)$ – й момент времени, которую можно выразить через температуры любых слоёв, но обязательно в предыдущий (то есть в i – тый) момент времени.

Основная идея метода конечных разностей (метода сеток) заключается в том, что непрерывная область изменения пространственной переменной $0 \leq y \leq H$ заменяется конечной совокупностью дискретно расположенных узловых точек $y_1, y_2, \dots, y_n, y_{n+1}$. При равномерном расположении этих точек на отрезке $[0, H]$ их координаты равны $y_i = (i-1)\Delta y$ при $i = 1, \dots, n+1$, где расстояние между соседними точками (шаг по координате) $\Delta y = H / n$. Аналогичным образом, вместо непрерывного изменения температурного поля во времени рассматриваются значения температуры в фиксированные моменты времени $\tau_k = k\Delta \tau$, $k = 1, 2, \dots$, где $\Delta \tau$ – интервал между двумя последовательными моментами времени (шаг по времени).

В плоскости (y, τ) совокупность узловых точек с координатами (y_i, τ_k) образует прямоугольную сетку, и расчёт температурного поля $T(y, \tau)$ сводится к отысканию сеточной функции T_i^k , приближённо характеризующей температуру тела в узловых точках. При замене непрерывной функции $T(y, \tau)$ дискретной сеточной функцией T_i^k необходимо заменить дифференциальное уравнение теплопроводности с соответствующими краевыми условиями

системой алгебраических (разностных) уравнений, связывающих значения сеточной функции в соседних узловых точках. Такая система алгебраических уравнений, являющаяся приближённой математической моделью процесса теплопроводности, называется разностной схемой решения исходной краевой задачи.

Таким образом, уравнение (2.25) является разностным аналогом дифференциального уравнения теплопроводности. Решение уравнения (2.25) может быть произведено различными путями. Получающиеся при этом разностные схемы могут значительно отличаться друг от друга в отношении точности и эффективности. Рассмотрим эффективность некоторых из них [19]:

а) Явная разностная схема.

Из уравнения (2.25) после ряда преобразований получаем ряд уравнений, характеризующих явную разностную схему:

$$T_{n+1}^{k+1} = 2fT_n^k + [1 - 2f(1+b)]T_{n+1}^k + 2fbT_0 \quad (2.26)$$

$$T_i^{k+1} = fT_{i-1}^k + (1-2f)T_i^k + fT_{i+1}^k \quad (2.27)$$

где:

$$b = \frac{\alpha \Delta y}{\lambda}, \quad f = \frac{a \Delta \tau}{\Delta y^2} \quad (2.28)$$

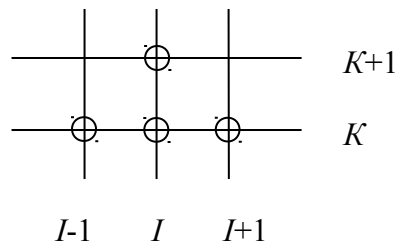


Рисунок 2.2 – Четырёхточечный шаблон, соответствующей явной разностной схеме.

То есть в каждый $(k+1)$ – й момент времени новые значения температуры T_i^{k+1} определяется тремя её значениями: T_{i-1}^k ; T_i^k ; T_{i+1}^k в предыдущий k – тый момент времени. Таким образом, используя приведённые разностные уравнения, можно, последовательно переходя от k – го к $(k+1)$ – му моменту времени, произвести расчёт дискретного температурного поля. Особенностью явной разностной схемы является то, что она распадается на отдельные уравнения, решение которых производится независимо друг от друга, причём вычисление новых значений температур в каждый момент времени производится по явным формулам.

Погрешность аппроксимации явной разностной схемы (сходимость) равна [19]:

$$\nu = O(\Delta y^2 + \Delta \tau), \quad (2.29)$$

то есть, имеет второй порядок точности по координате и первый порядок по времени.

Недостатком явной разностной схемы является ограничение выражения:

$$f \leq 1/[2 \cdot (1+b)] \quad (2.30)$$

на величину параметра:

$$f = a \cdot \Delta \tau / \Delta y^2. \quad (2.31)$$

Что требует выбора достаточно малого шага Δy , обусловленного необходимостью детального описания температурного поля. Кроме того, поскольку максимально допустимая величина шага $\Delta \tau$ уменьшается при возрастании параметра:

$$b = \alpha \cdot \Delta y / \lambda, \quad (2.32)$$

Ограничение (2.32) становится особенно обременительным при описании процессов, характеризующихся высокой интенсивностью внешней теплоотдачи.

б) Неявная четырёхточечная разностная схема.

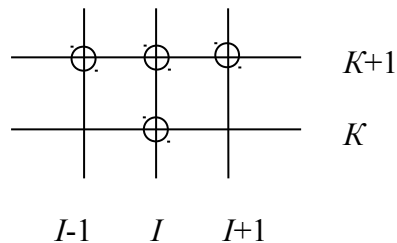


Рисунок 2.3 – Четырёхточечный шаблон, соответствующей неявной разностной схеме.

Решение системы неявных разностных уравнений производится в следующей последовательности. Сначала, перемещаясь по сетке, слева направо вычисляем значения коэффициентов α_i и β_i (прямая прогонка), по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{2 \cdot f}{1 + 2 \cdot f}, \quad \beta_1 = \frac{T_1^k}{1 + 2 \cdot f}, \quad (2.33)$$

$$\alpha_i = \frac{f}{1 + f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}, \quad \beta_i = \frac{T_i^k + f \cdot \beta_{i-1}}{1 + f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}. \quad (2.34)$$

Затем, после нахождения температуры в правом граничном узле, перемещаясь по сетке справа налево, определяем искомые значения температур (обратная прогонка) по формуле:

$$T_i^{k+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{k+1} + \beta_i \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.35)$$

После этого производится переход к очередному шагу по времени, и вся описанная процедура повторяется. При реализации метода прогонки значение коэффициентов β_i необходимо пересчитывать на каждом шаге по времени в соответствии с изменением температур T_i^k , а коэффициенты α_i , остающиеся неизменными в течение всего расчёта, могут быть вычислены заранее.

Поскольку неявная разностная схема аппроксимирует исходную задачу теплопроводности и является устойчивой, она сходится, причём скорость её сходимости равна:

$$\nu = O(\Delta y^2 + \Delta \tau). \quad (2.36)$$

В безусловной устойчивости неявных разностных схем заключается весьма существенное их преимущество перед явной схемой. Поскольку при заданном шаге по координате выбор шага по времени в этих схемах определяется только соображениями допустимой погрешности расчёта, при решении многих практических задач его величина может иметь гораздо большее значение, чем при использовании явной разностной схемы.

в) Неявная шеститочечная разностная схема.

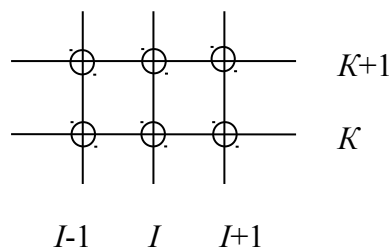


Рисунок 2.4 – Шеститочечный шаблон, соответствующей неявной разностной схеме.

Система линейных алгебраических уравнений, соответствующих неявной шеститочечной схеме решается также методом прогонки. Формулы для расчета прогоночных коэффициентов следующие:

$$\alpha_1 = \frac{f}{1+f}, \quad \beta_1 = \frac{(1+f) \cdot T_1^k + f \cdot T_2^k}{1+f} \quad (2.37)$$

$$\alpha_i = \frac{0,5 \cdot f}{f + 0,5 \cdot f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}, \quad \beta_i = \frac{0,5 \cdot f \cdot T_{i-1}^k + (1-f)T_i^k + 0,5 \cdot f \cdot T_{i+1}^k + 0,5 \cdot f \cdot \beta_{i-1}}{1 + 0,5 \cdot f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}. \quad (2.38)$$

Температура правого граничного узла находится по формуле:

$$T_{n+1}^{k+1} = \frac{[1 - f \cdot (1+b)] \cdot T_{n+1}^k + f \cdot (T_n^k + 2 \cdot b \cdot T_0 + \beta_n)}{1 + f \cdot (1+b - \alpha_n)}. \quad (2.39)$$

После нахождения температуры в правом граничном узле, перемещаясь по сетке справа налево, определяем значения температур по формуле:

$$T_i^{k+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{k+1} + \beta_i \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.40)$$

Неявная шеститочечная разностная схема аппроксимирует исходную задачу теплопроводности и является безусловно устойчивой. Эта схема сходится, причём скорость её сходимости равна:

$$v = O(\Delta y^2 + \Delta \tau^2). \quad (2.41)$$

Таким образом, для решения исходной одномерной задачи теплопроводности (2.18) возможно применение всех трёх методов расчёта температурных полей. При использовании явной разностной схемы необходим выбор достаточно малого шага Δy , что значительно увеличивает объём расчётов при рассмотрении достаточно продолжительных процессов разогрева металлургических агрегатов. Неявная четырёхточечная схема не накладывает каких-либо ограничений на выбор шага по координате и времени, но она не обладает такой точностью как шеститочечная разностная схема. Поэтому в качестве расчётной схемы применяем шеститочечную неявную разностную схему, имеющую более высокий порядок сходимости по времени, чем другие схемы.

2.4 Методика и результаты расчёта температурных полей

Футеровка сталеразливочного ковша состоит из четырёх слоёв. Первоначально рассмотрим рабочий слой футеровки.

В ходе расчёта будем использовать значения температуры внутренней поверхности футеровки, полученные экспериментальным путём.

Зависимость температуры внутренней поверхности футеровки от времени показана на рисунке 1.3. Использование этих данных позволяет несколько сократить процесс расчёта, то есть не рассчитывать температуру внутренней поверхности футеровки по формуле (2.35), а использовать эмпирические данные замеров. Кроме сокращения временных затрат, использование значений температур правого граничного узла приводит к уменьшению погрешности, связанной с вычислением температур этой точки.

Таким образом, алгоритм расчёта температурных полей футеровки состоит в следующем:

1. Находим значение коэффициента f по формуле (2.31).
2. Вычисляем прогоночные коэффициенты α_l и β_l а также α_i и β_i для k -го момента времени по формулам (2.37) и (2.38).
3. Находим значение температурных полей для k -го момента времени по формуле (2.40).
4. Вычисляем прогоночный коэффициент β_i для $(k+1)$ -го момента времени.
5. Находим значение температурных полей для $(k+1)$ -го момента времени.
6. Вычисляя прогоночные коэффициенты β_i для последующих моментов времени, находим значение температурных полей для этих моментов времени. Таким образом, производим расчёт температур футеровки в процессе её разогрева.

При дальнейших расчётах температурных напряжений необходимы значения среднеинтегральной температуры поля. Среднеинтегральная температура будет отличаться от средней температуры по сечению футеровки. Они будут равны лишь при прямолинейном распределении температур в футеровке. В ином случае среднеинтегральную температуру можно определить методом трапеций [20]:

$$T_{cp} = \int_0^H T(y) dy = \frac{H}{3} \cdot [(T_{n+1} + T_o) + 4 \cdot \sum T_1 + 2 \cdot \sum T_2], \quad (2.42)$$

где H – толщина слоя футеровки, м;

T_{n+1} , T_o – значения температур в правом и левом граничном узле, °C;

$\sum T_1$ – сумма значений температур в нечётных по номеру узлах, °C;

$\sum T_2$ – сумма значений температур в чётных по номеру узлах, °C.

В качестве первоначальных данных для расчёта температурных полей используем следующие значения: начальная температура рабочего слоя футеровки сталковша по всей толщине составляет 25 °C; толщина рабочего слоя – 135 мм.

При вычислении температур футеровки по неявной шеститочечной схеме рабочий слой футеровки разбиваем на двадцать равных частей (двадцать одна узловая точка). Соответственно, шаг по координате Δy составит 0,00675 м.

Весь промежуток времени процесса разогрева футеровки сталеразливочного ковша составляет 24 часа. Для расчёта принимаем шаг по времени Δt , равный 60 секундам.

В приложении А приведены температурные поля футеровки в моменты времени с резким подъёмом температуры и шагом по времени 10 минут.

Выводы:

1) В процессе нагрева футеровка теплоэнергетических агрегатов подвергается интенсивному воздействию высоких температур и тепловых потоков. Это вызывает значительный перепад температур по толщине кладки и появление больших температурных напряжений и деформаций, приводящих к её растрескиванию. Появление трещин уменьшает огнеупорные свойства материалов и ведёт к более интенсивному износу футеровки в целом.

2) Для решения одномерной задачи теплопроводности в качестве расчётной схемы применяем шеститочечную неявную разностную схему, имеющую более высокий порядок сходимости по времени, чем другие схемы.

3 РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАЗОГРЕВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

3.1 Экспериментальное определение предела прочности огнеупорных материалов при сжатии в зависимости от температуры

В рассматриваемом высокотемпературном агрегате рабочий слой футеровки сталеразливочного ковша составляют периклазоуглеродистые огнеупоры. Широкий ассортимент производимых промышленностью огнеупорных изделий на основе периклаза (MgO) создаёт определенные трудности в поиске табличных данных тепломеханических характеристик периклазоуглеродистых изделий состава. Поэтому для дальнейших исследований возникла необходимость в экспериментальном определении предела прочности при комнатной и повышенной температуре.

Повышение точности расчёта термонапряжённого состояния кладки требует получения тепломеханических характеристик огнеупорных материалов при их рабочих температурах. Для этой цели был создан экспериментальный стенд по измерению предела прочности огнеупорных материалов при повышенных температурах.

С каждым видом механизма разрушения связывается определённый критерий прочности — та или иная характеристика физического состояния материала элементов машин и аппаратов, определяемая расчётным или экспериментальным путём. Для каждого из критериев прочности материала конструкции экспериментально устанавливаются его предельные значения. По предельным значениям далее определяются допускаемые значения этих критериев. Последние определяются, как правило, путём деления предельных значений критерия прочности на соответствующий коэффициент запаса прочности. Значения коэффициентов запаса прочности назначаются на основе опыта эксплуатации с учётом степени ответственности проектируемой конструкции, расчётного срока её эксплуатации и возможных последствий её разрушения.

Для повышения точности измерений в экспериментальном стенде реализуется способ термомеханических испытаний материалов, который позволяет определить предел прочности материалов на сжатие при повышенных температурах образца с применением устройства, позволяющего определить температуру материала прямым методом [22].

Техническим результатом изобретения является получение значений предела прочности на сжатие различных материалов при повышенных температурах материала с меньшей погрешностью.

Это достигается тем, что в способе термомеханических испытаний материалов, заключающемся в нагреве контрольного и испытуемого образца из исследуемого материала, выдержке при заданной температуре и нагружению испытуемого образца до разрушения, предлагается процесс

нагрева испытуемого образца контролировать по нагреву контрольного образца.

При этом замер температуры внутри контрольного образца t_1 производить в точке, максимально приближенной к геометрическому центру контрольного образца. Это позволит повысить точность измерения температуры t материала.

На рисунке 3.1 изображено устройство для термомеханических испытаний материалов.

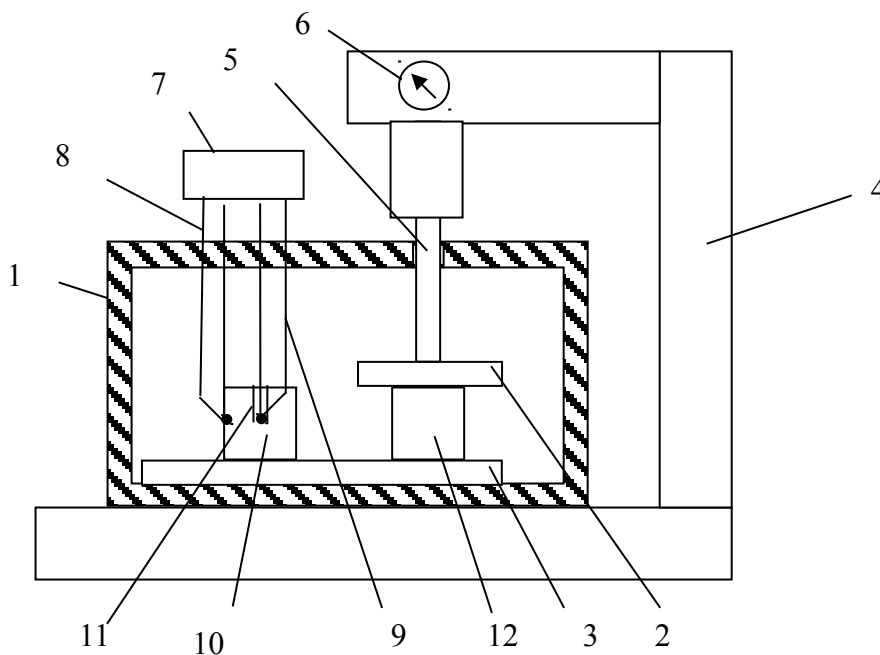


Рисунок 3.1 - Устройство для термомеханических испытаний материалов

Устройство содержит печь 1, в которой находятся верхняя 2 и нижняя 3 плиты. Для нагружения имеется пресс 4, который посредством силовой тяги 5 воздействует на верхнюю плиту 2. Измерение создаваемой нагрузки определяется по силоизмерительному устройству 6. Для вычисления температуры t используется вторичный прибор – сумматор 7.

К сумматору 7 подключены термопары 8 и 9. Термопары 8 и 9 расположены в контрольном образце 10 из исследуемого материала, расположенном на нижней плите 3. Горячий спай термопары 8 максимально приближен к геометрическому центру. Например, это может быть канал 11, просверленный по вертикальной оси симметрии до половины высоты контрольного образца. Термопара 9 расположена на любой боковой поверхности контрольного образца 10. Испытуемый образец 12 располагается в печи 1 между верхней 2 и нижней 3 плитой.

Способ осуществляется следующим образом.

Из исследуемого материала изготавливаются два одинаковых образца в форме цилиндра или прямоугольного параллелепипеда: контрольный 1 и

испытуемый 2. В контрольном образце 1 размещают термопару 4, горячий спай которой максимально приближен к геометрическому центру (по вертикальной оси симметрии высверливают канал 3 до половины высоты контрольного образца). Термопару 5, для измерения температуры на поверхности контрольного образца 1, устанавливают в любой точке на боковой поверхности. Контрольный образец 1 с закреплёнными термопарами и испытуемый образец 2 помещают в печь 6 на нижнюю плиту 7. При этом цилиндрические образцы устанавливают на любое основание, а образцы в виде прямоугольного параллелепипеда – на любую грань.

Термопары подключают к вторичному прибору для измерения температуры – сумматору 8, который показывает значение температуры t , определяемое по формуле:

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (3.1)$$

где t_1 – показания термопары внутри контрольного образца;

t_2 – показания термопары на поверхности контрольного образца.

Затем включают печь и начинают нагрев образцов.

После включения в работу печи 6 следят за величиной значения температуры t , которая определяет достижение заданной температуры испытания. Температура t считается температурой испытания.

После достижения такого температурного состояния испытуемый образец 2 подвергают одноосному нагружению прессом 9 посредством воздействия силовой тяги 10 на верхнюю плиту 11 до разрушения испытуемого образца 2. Нагрузка на образец определяется по силоизмерительному устройству 12. При этом нагрузка должна возрастать непрерывно и равномерно со скоростью, обеспечивающей его разрушение через 20-60 с после начала испытания.

Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ (Н/м²) испытуемого образца вычисляют по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{F}, \quad (3.2)$$

где $\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии, Н/м²;

P — наибольшая нагрузка, при которой произошло разрушение образца, Н;

F — площадь поперечного сечения образца, м².

Предлагаемый способ позволяет получить значение предела прочности на сжатие различных материалов при повышенных температурах материала с меньшей погрешностью.

В соответствии с данным способом был создан экспериментальный стенд (рисунок 3.2) и произведены исследования зависимости предела прочности на сжатие огнеупоров от температуры.

Для измерения давления в цилиндре прессы с рабочей жидкостью используется манометр. Для повышения точности измерений была проведена поверка этого прибора (акт о поверке приведён в приложении А).



Рисунок 3.2 - Стенд для исследования зависимости предела прочности на сжатие от температуры

В качестве исследуемых образцов использовались периклазоуглеродистые огнеупоры состава: $\text{MgO} \geq 80 \%$; $\text{C} \geq 8 \%$. При этом заявляемый предел прочности на сжатие равен 40 МПа (паспортные данные завода-изготовителя).

Характерным для прочности реальных тел является так называемый масштабный фактор — зависимость прочности от размеров тела. При стандартных испытаниях материала на образцах различных размеров для приведения результатов в сопоставимый вид используются переводные коэффициенты. Масштабный фактор объясняется в основном статистической природой процессов разрушения, связанной с влиянием неоднородностей макроструктуры и дефектов материала на процесс возникновения и развития трещин. С увеличением размеров образцов вероятность неоднородностей структуры возрастает и среднее значение предела прочности материала уменьшается.

Можно выделить ряд последовательных стадий разрушения огнеупорных изделий.

Вначале идёт образование локальных микротрещин (посечек) термического происхождения, секущих изделие. Толщина микротрещин колеблется от нескольких микрон до 0,2 мм в малоизменённой и переходной зонах имеются скрытые посечки, заполненные силикатами и ферритами кальция, то есть продуктами затвердевания шлака. Затем стоит упомянуть о процессе химического коррозионного растворения периклаза в шлаковом расплаве. Особенно интенсивно этот процесс протекает на рабочей поверхности футеровки.

Итогом является циклическое скалывание наружных слоёв изделий, вследствие резких колебаний температуры и недостаточной термостойкости огнеупора. Следует отметить, что циклы скалывания зависят от расположения изделий относительно уровня металла.

Таким образом, износ периклазовых изделий происходит за счёт циклического скалывания внешних слоёв изделий и частично вследствие химического разъедания периклаза в рабочей зоне. Износ огнеупоров осуществляется в результате химического взаимодействия между компонентами шлака и огнеупора с образованием легкоплавких соединений. Высокая стойкость периклазоуглеродистых изделий обусловлена образованием плотной рабочей зоны, состоящей из сростка кристаллов шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$, реликтовых обломков периклаза, мервинитамелилита и гексаалюмината кальция. Эта плотная зона предохраняет углерод от выгорания и способствует адгезии шлака, что резко повышает шлакоустойчивость изделий.

Огнеупоры при обыкновенной температуре характеризуются хрупким разрушением, которое обычно наступает после небольшой (упругой) деформации и незначительной по величине пластической (необратимой).

Упругая деформация связана с увеличением расстояния между атомами вещества при приложении нагрузки и зависит от энергии кристаллической решётки. Эта связь выражается зависимостью модуля упругости от температуры плавления.

Хрупкое и вязкое разрушение имеют разные виды разрушенной поверхности. Характер дефектов даёт понятие, какого рода разрушение имеет место. При хрупком разрушении поверхность надломлена. При вязком разрушении поверхность натянута (вяжет разрушение).

Вязкость разрушения – это относительное повышение растягивающих напряжений в устье трещины при переходе её от стабильной к нестабильной стадии роста.

Вязкость разрушения тесно связана с показателями прочности материала. Увеличение прочности сопровождается снижением пластичности и вязкости разрушения. Это объясняется тем, что у высокопрочных материалов мала энергия, поглощаемая при разрушении уровень которой определяется величиной пластической деформации у вершины трещины. Для

высокопрочных материалов эффект увеличения прочности существенно перекрывается снижением пластичности, в результате чего вязкость разрушения уменьшается. Материалы средней и низкой прочности при комнатной температуре обычно имеют более высокие значения, чем высокопрочные. С понижением температуры прочность растет и при определённых условиях поведение материала средней и низкой прочности становится таким же, как у высокопрочного материала при комнатной температуре. При низких температурах испытание вязкости разрушения можно проводить на образцах меньших размеров.

На рисунке 3.3 показано хрупкое разрушение периклазоуглерода при комнатной температуре.



Рисунок 3.3 – Разрушение периклазоуглерода при комнатной температуре

Определение предела прочности проводилось в диапазоне температур 18 – 500 °С. Результаты измерений приведены на рисунке 3.4.

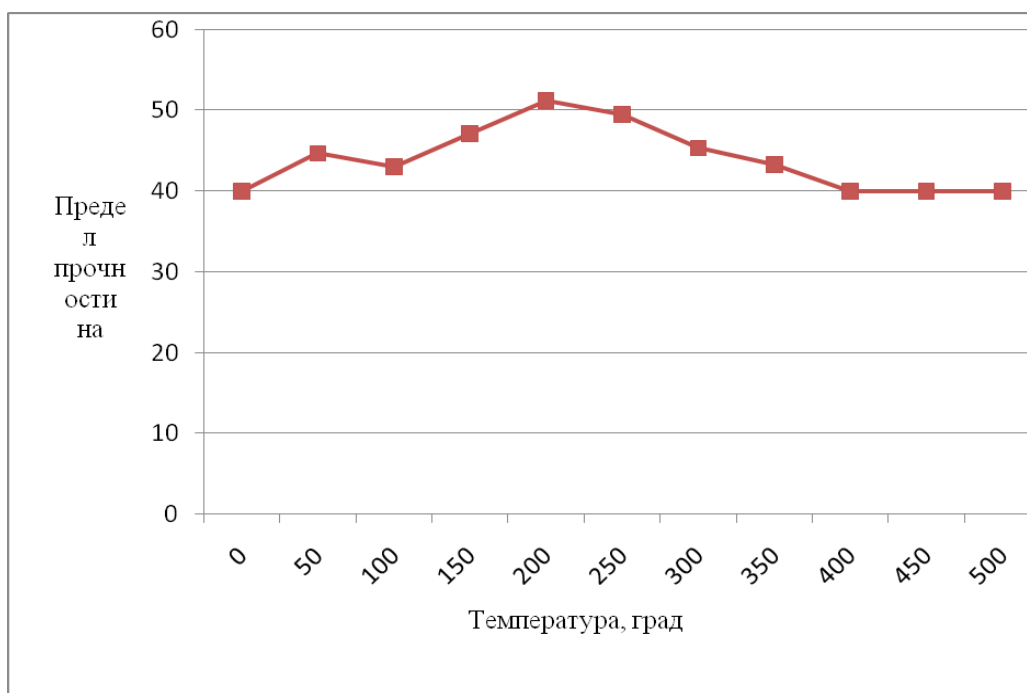


Рисунок 3.4 – Зависимость предела прочности от температуры

Кривая зависимости предела прочности от температуры имеет следующие тенденции: начиная с температуры ~ 90 °С предел прочности огнеупора растёт, доходя до значения 51,2 МПа (при температуре ~ 200 °С), затем значение предела прочности начинает плавно снижаться, доходя до 40 МПа (при ~ 400 °С).

Таким образом, значение предела прочности на сжатие в интервале температур 150 – 300 °С увеличивается на 18 – 28 %, что даёт дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энергоресурсов на разогрев.

3.2 Расчёт термических напряжений в футеровке сталеразливочного ковша

Расчёт температурных напряжений, с учётом рассчитанных ранее значений температурных полей, производится по формуле:

$$\sigma = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \cdot T(y, t). \quad (3.3)$$

При этом принимаем следующие значения параметров для периклазоуглеродистых огнеупоров (постоянные для рассматриваемой области 25-938 °С): E – модуль упругости ($E=0,7 \cdot 10^5$ МПа); α – коэффициент термического расширения ($\alpha=13 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹), ν – коэффициент Пуассона ($\nu=0,15$) [23].

Для периклазоуглеродистых огнеупоров предел прочности на сжатие принимается равным 40 МПа; предел прочности на растяжение: 25 МПа.

Для упрощения процессов расчета температурных полей и напряжений в футеровке теплоэнергетических агрегатов автором была составлена программа для их расчёта. Программа предполагает первоначальный ввод следующих значений:

- 1) толщины слоя футеровки металлургического агрегата;
- 2) числа шагов по координате (толщине);
- 3) шага по времени;
- 4) начальной температуры тела;
- 5) общего времени нагрева футеровки;
- 6) коэффициента упругости используемого материала;
- 7) коэффициента термического расширения;
- 8) коэффициента Пуассона;
- 9) коэффициента температуропроводности (вводится новое значение при следующем шаге по времени, вследствие зависимости его от температуры).

В приложении Б приведены значения температур рабочего слоя футеровки для моментов времени, при которых образующиеся термические напряжения превышают предел прочности.

Анализируя возникающие напряжения и скачки температур можно увидеть чёткая взаимосвязь между ними: скачёрк температур во временном периоде: 0:00 – 01:00 и 05:00 – 07:00 вызывает превышение предела прочности в моменты времени: 00:00 – 01:00 и 05:10 – 07:00. При нагреве в высокотемпературном участке от средней температуры возникает напряжение сжатия (σ_c), а в низкотемпературном участке напряжение растяжения (σ_p). Кроме того, следует отметить, что резкий скачок температур в первую очередь сказывается на напряжениях сжатия (при норме значений напряжений растяжения), а затем плавно переходит в низкотемпературный участок и сказывается на напряжениях растяжения.

Максимальное значение напряжения сжатия в течение всего процесса разогрева больше допустимого в 3,89 раза, а напряжения растяжения – в 3,4 раза.

Стоит отметить также временные области в которых не наблюдается резких скачков температур, но имеются напряжения превышающие предел прочности (от 05:20 до 06:30). Разрушительные напряжения вызваны в данном случае чрезмерными скоростями разогрева (в среднем 19 °C/мин), тогда как, исходя из предела прочности на сжатие 40 МПа скорость должна лимитироваться 8-10 °C/мин.

Анализируя полученные значения, можно сделать следующие выводы:

1. Скачок значений термических напряжений возникает вследствие резкого повышения температур при разогреве.
2. При значении предела прочности на сжатие 40 МПа скорость разогрева футеровки не должна 8-10 °C/мин.

3. При разогреве футеровки определяющим критерием из пределов прочности (на сжатие и растяжение) является предел прочности на сжатие. Именно его величина, в первую очередь, определяет темп разогрева.

Кроме того, можно однозначно считать, что при разогреве футеровки нельзя допускать скачкообразного подъёма и особенно снижения температуры, а также неравномерного нагрева огнеупоров на разных участках (как по высоте, так и по окружности).

Поэтому можно сделать вывод о превышении допустимых скоростей разогрева в соответствующие моменты времени. Кроме того, разогрев ковша осуществляется в течение 24 часов, а из графика (рисунок 1.3) видно, что максимальной температуры внутренняя поверхность футеровки достигает уже после 16 часов нагрева. Тем самым, в последние 8 часов происходит поддержание максимальной температуры футеровки, а не её разогрев.

Существующие скорости нагрева футеровки сталеразливочного ковша являются недопустимыми, так как возникающие при этом термические напряжения превышают допустимый предел в несколько раз. Более того, считается, что разогрев ковша осуществляется в течение 24 часов, а из графиков видно, что максимальной температуры (938 °С) внутренняя поверхность футеровки достигает уже после 16 часов нагрева. Всё сказанное позволяет сделать вывод о необходимости рационализации графика разогрева, который должен быть рассчитан из условия недопущения градиентов температур, вызывающих появление термических напряжений выше допустимых, с учётом найденной зависимости предела прочности на сжатие от температуры.

3.3 Разработка рациональных графиков разогрева

При разработке графиков разогрева кладки необходимо не только избегать превышения допустимых скоростей, но и минимизировать время разогрева. Необходимо также учесть два процесса: испарение гигроскопической влаги (при температуре ~ 100°С) и удаление связанной влаги («полочка» при температуре 350 – 400°С).

Для удаления свободной влаги, содержащейся в рабочем слое футеровки делаем временную выдержку при температуре 130 °С в течение 30 минут.

Удаление связанной влаги в процессе нагрева будем проводить аналогично графику, принятому на предприятии, то есть, при достижении внутренней поверхности футеровки температуры 345 °С дальнейший нагрев до температуры 400 °С проводим в течение четырёх часов. Разогрев осуществляет до температуры 938 °С.

Полученные при расчёте значения предела прочности на сжатие не должны превышать предел прочности полученный эмпирическим путём (для диапазона температур 18-500 °С).

В приложении В приведены значения температур по толщине рабочего слоя футеровки сталеразливочной ванны в диапазоне температур 20 – 500 °С.

Рассмотрим разработанный график разогрева (кривая 2, рисунок 3.5).

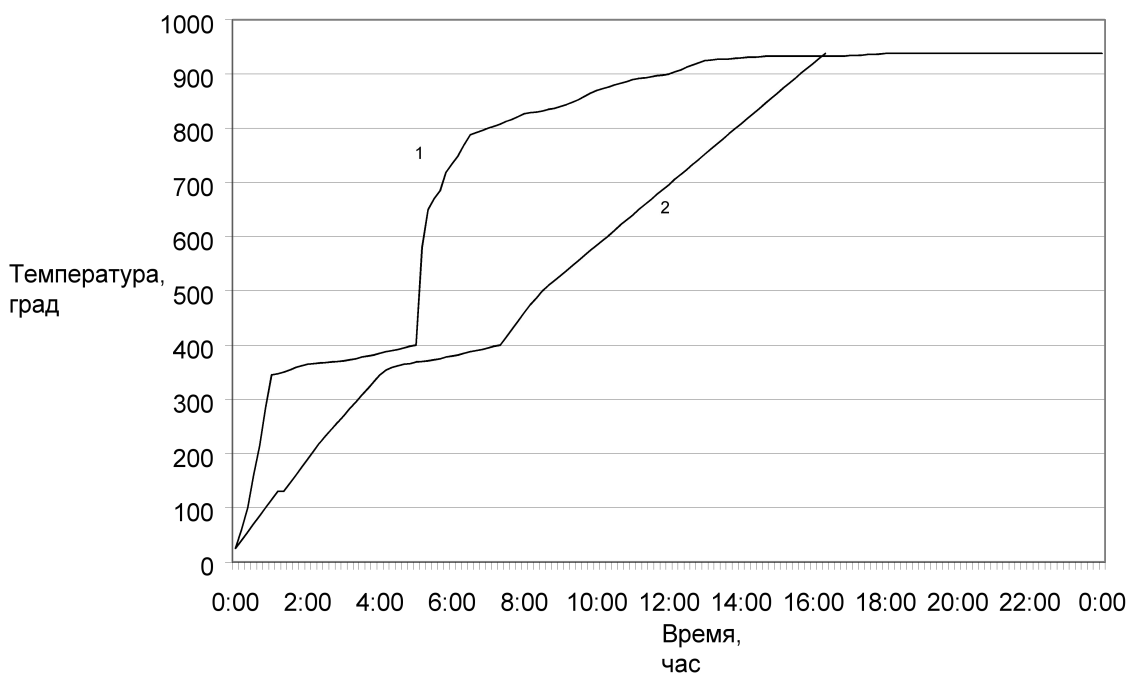


Рисунок 3.5 Разработанный график разогрева

Скорости подъема температуры для каждого участка кривой подбирались индивидуально. Средняя скорость повышения температуры на участках от 18 до 500 °С (не содержащих участки сушки), составила ~ 90 °С/ч. Общее время разогрева до температуры 938 °С составляет 16 часов 20 минут.

Разработанные графики разогрева позволяют, не превышая предел прочности огнеупорных материалов, производить процесс разогрева с максимально возможными скоростями и контролировать его. При этом происходит значительное снижение времени на процесс разогрева.

4.5 Экономическая эффективность

Разогрев сталеразливочных ковшей со скоростями, термические напряжения при которых не превышают предел прочности позволят повысить стойкость футеровки и количество плавов. Ориентируясь на литературные данные [12], можно считать, что внедрение данных разработок позволит повысить стойкость футеровок сталеразливочных ковшей с 40 до 42 плавов, то есть на 5 %. Снижение времени разогрева сталеразливочных ковшей после капитального ремонта с 24 часов до 16 часов 20 минут позволит сократить расход газа на 32 %.

Подсчитаем годовую экономическую эффективность внедрения ($\mathcal{E}_{\Sigma}$). Эффективность будет складываться из двух составляющих: экономии

денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки ($\mathcal{E}_1$) и экономии средств на разогрев ковшей после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева ($\mathcal{E}_2$).

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2. \quad (3.4)$$

В течение одного месяца в среднем производится один капитальный и один промежуточный ремонт футеровки сталеразливочного ковша. Общее число ковшей на предприятии составляет 20 шт. Рабочий слой футеровки полностью меняется лишь при капитальном ремонте, поэтому для подсчёта экономии денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки ($\mathcal{E}_1$) учитываем только капитальные ремонты. Таким образом, годовое количество капитальных ремонтов футеровки при увеличении её стойкости на 5 % составит:

$$N = N' - (N' \cdot 0,05), \quad (3.5)$$

где N , N' – количество капитальных ремонтов до и после повышения стойкости.

$$N = 12 - (12 \cdot 0,05) = 11,4$$

Годовое количество капитальных ремонтов всех ковшей:

$$T = n \cdot N, \quad (3.6)$$

где n – число ковшей.

Годовое количество капитальных ремонтов всех ковшей до повышения стойкости футеровки:

$$T = 20 \cdot 12 = 240$$

Годовое количество капитальных ремонтов всех ковшей после повышения стойкости футеровки:

$$T' = 20 \cdot 11,4 = 228,6$$

Снижение количества капитальных ремонтов всех ковшей вследствие повышения стойкости футеровки:

$$\Delta T = T - T' \quad (3.7)$$

$$\Delta T = 240 - 228,6 = 11,4$$

По данным предприятия, в среднем, стоимость одной тонны огнеупорного материала для футеровки рабочего слоя сталеразливочных ковшей составляет 150000 тнг. С учётом того, что масса рабочего слоя футеровки составляет 5606 кг имеем стоимость рабочего слоя футеровки одного ковша:

$$S = m \cdot s, \quad (3.8)$$

где m – масса рабочего слоя футеровки, кг;
 s – средняя стоимость одной тонны огнеупорного материала, тнг.

$$S = 5,606 \cdot 150000 = 840900 \text{ тнг.}$$

Годовая экономия денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки:

$$\mathcal{E}_1 = S \cdot \Delta T. \quad (3.9)$$

$$\mathcal{E}_1 = 840900 \cdot 11,4 = 9586260 \text{ тнг.}$$

При разогреве сталеразливочных ковшей после капитального (продолжительность 24 часа) и промежуточного (продолжительность 24 часа) ремонтов, с учётом расхода газа (10 м³/ч) полный расход газа на разогрев составит:

$$q = (\tau_1 + \tau_2) \cdot q_1, \quad (3.10)$$

где τ_1, τ_2 – время разогрева стального ковша после капитального и промежуточного ремонта соответственно, ч;
 q_1 – расход газа на разогрев ковшей, м³/ч.

$$q = (24 + 24) \cdot 10 = 480 \text{ м}^3$$

Расход газа, с учётом повышения стойкости футеровки:

$$q = 480 \cdot 0,32 = 153,6 \text{ м}^3.$$

Годовой расход газа на разогрев сталеразливочных ковшей:

$$Q = q \cdot T' \quad (3.11)$$

$$Q = 153,6 \cdot 228,6 = 35112,96 \text{ м}^3.$$

С учётом закупочной стоимости газа для предприятия ($s_2 = 34$ тнг/м³) получаем экономию средств на разогрев ковшей после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева:

$$\mathcal{E}_2 = Q \cdot s_2. \quad (3.12)$$

$$\mathcal{E}_2 = 35112,96 \cdot 34 = 1193840,64 \text{ тнг.}$$

Годовая экономическая эффективность внедрения составила:

$$\mathcal{E}_\Sigma = 9586260 + 1193840,64 = 10780100,64 \text{ тнг.}$$

Разработанные режимы нагрева футеровки сталеразливочных ковшей позволяют производить разогрев оборудования до необходимой температуры. Возникающие при этом термические напряжения не превышают предел прочности, что приводит к увеличению стойкости футеровки на 5 %

Выводы:

1) Повышение точности расчёта термонапряжённого состояния кладки требует получения тепломеханических характеристик огнеупорных материалов при их рабочих температурах, для чего можно использовать стенд по измерению предела прочности огнеупорных материалов при повышенных температурах. Значение предела прочности на сжатие в интервале температур 150 – 300 °С увеличивается на 18 – 28 %, что даёт дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энергоресурсов на разогрев.

2) Расчёт температурных напряжений при существующих на предприятии скоростях показал, что максимальное значение напряжения сжатия в течение процесса разогрева больше допустимого в 3,89 раза, а напряжения растяжения – в 3,4 раза.

3) При разработке рациональных графиков разогрева средняя скорость повышения температуры на участках от 18 до 500 °С (не содержащих участки сушки), составила ~ 90 °С/ч. Общее время разогрева до температуры 938 °С составляет 16 часов 20 минут.

4) Экономическая эффективность при внедрении данных разработок, состоящая из экономии денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки и экономии средств на разогрев ковшей после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева, будет составлять более 10 млн. тнг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В магистерской работе выполнен анализ условий эксплуатации футеровок высокотемпературных агрегатов, а также используемых в промышленности огнеупоров и условий их эксплуатации.

2. По данным значений температур на внутренней поверхности стальной ковша рассчитаны температуры по сечению рабочего слоя и термические напряжения. Показано, что значения термических напряжений превышают предел прочности для используемых огнеупорных материалов.

3. Проведено экспериментальное исследование зависимости предела прочности на сжатие огнеупорных материалов от температуры. Проведённые исследования позволяют сделать вывод, что значение предела прочности на сжатие в интервале температур 150 – 300 °С увеличивается на 18 – 28 %, что даёт дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энергоресурсов на разогрев.

4. Разработаны графики разогрева стальной ковшеи после капитального ремонта при соблюдении условий: возникающие термические напряжения не превышают предел прочности периклазоуглеродистых огнеупоров; затраты времени на разогрев ковшеи минимальны. При разработке рациональных графиков разогрева средняя скорость повышения температуры на участках от 18 до 500 °С (не содержащих участки сушки), составила ~ 90 °С/ч. Общее время разогрева до температуры 938 °С составляет 16 часов 20 минут.

5. Экономическая эффективность при внедрении данных разработок, состоящая из экономии денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки и экономии средств на разогрев ковшеи после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева, будет составлять более 10 млн. тнг.

Список использованных источников

- 1 Антипин В.Г., Чухаль П.А., Вяткин Ю.Ф. Служба огнеупоров в сталеплавильных агрегатах // Сталь. 1991. №8. с. 21 – 27.
- 2 Кузнецов А.Т., Кокушкин И.В., Сенявин Н.К., Шершнёв А.А. Напряжённо – деформированное состояние и разрушение огнеупоров при тепловом воздействии // Огнеупоры. 1987. №2. с. 52 – 56.
- 3 Хорошавин Л.Б. Современные тенденции развития производства и применения огнеупоров. Сайт: <http://urm.ru/ru/186>
- 4 Пат. 3713855 США. Кирпич с высоким содержанием MgO и улучшенными показателями по пределу прочности на разрыв при повышенной температуре /Elta Corp.; Jan. 30, 1973.
- 5 Пат. 3808014 США. Спеченный магнезитовый огнеупор /D. R. F. Spencer and D. C. Wooldridge.; Apr. 30, 1974.
- 6 Сайт:<http://www.magnezit.biz/ru/about/press/news/index.php?from4=2&id4=719>
- 7 Ярушина Т.В., Шатилов О.Ф., Коптелов В.Н. Новые углеродсодержащие огнеупоры ОАО «Комбинат Магнезит» для футеровки сталеразливочных ковшей // Новые огнеупоры. 2003. №1. с. 14 – 19.
- 8 Глинков М.А., Глинков Г.М. Общая теория печей. М.: Металлургия, 1978. – 264с.
- 9 Стрелов К.К., Кашеев И.Д., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. М.: Металлургия, 1988. – 528с.
- 10 Казанцев Е.И. Промышленные печи. М.: Металлургия, 1975. – 366с.
- 11 Волкова О. и Янке Д. Моделирование температурных полей в сталеразливочных ковшах с футеровкой из доломитовых кирпичей или высокоглиноземистой массы // Чёрные металлы. 2003. №2. с. 26 – 31.
- 12 Приходько Е.В. Повышение эффективности работы теплоиспользующих установок за счёт новых технологий сушки и разогрева футеровки. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. / Омский гос. тех. университет, - Омск, 2006.
- 13 Журков С.Н. Изучение разрушения полимеров методом ЭПР. ДАН СССР, 1964. №2. с. 103.
- 14 Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. М.: Металлургия, 1978. – 376 с.
- 15 Гогоци Г.А. К вопросу о термостойкости гетерогенной керамики и огнеупоров // Огнеупоры. 1993. №11. с. 2 – 8.
- 16 Никифоров А.С. Оценка термонапряжённого состояния футеровки металлургических печей // Доклады Национальной Академии наук Республики Казахстан. – 2003, №6. – С.103-107.

- 17 Девятков С.А., Карасёв А.В., Степанова Е.П. Основные физические и математические модели в расчётах на прочность. Омск: Изд – во ОмГТУ, 2004. – 67с.
- 18 Никифоров А.С. Надежность работы футеровок металлургических печей // г. Павлодар 2003. с.16-17
- 19 Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. – 239с.
- 20 Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Физматгиз, 1963. – 660с.
- 21 Кузнецов Г.И., Кортель А.А., Борисов В.Г., Аксерольд Л.М., Пивинский Ю.Е. Новые виды огнеупоров для чёрной металлургии // Огнеупоры. 1992. №1. с. 32 – 36.
- 22 Приходько Е.В., Никифоров А.С., Шанов И.В. Инновационный патент № 21807 РК. Способ термомеханических испытаний материалов и устройство для его осуществления, опубл. 15.10.2009, бюл. № 10. – 4с.: ил.
- 23 Стрелов К.К. Структура и свойства огнеупоров. М.: Металлургия, 1982. – 208с.

1 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФУТЕРОВОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

1.1 Используемые в промышленности огнеупоры и условия их эксплуатации

Высокотемпературные агрегаты (нагревательные, сушильные, обжиговые плавильные устройства и ковши для разливки стали и других металлов), футеруются огнеупорными материалами. Срок службы высокотемпературных агрегатов, во многом, определяется сроком службы футеровки. При термическом воздействии на футеровку печи возникают такие физические явления, как термическое расширение, пластическая деформация и растрескивание, которые определяют возможность осуществления термотехнологического процесса, стойкость футеровки без нарушения геометрических форм рабочей камеры, длительность эксплуатации и технико-экономические показатели процесса получения целевого продукта [1].

Огнеупорные материалы – изделия на основе минерального сырья, отличающиеся способностью сохранять свои свойства в условиях эксплуатации при высоких температурах, и которые служат в качестве конструкционных материалов и защитных покрытий.

Функционально любое огнеупорное изделие может выполнять от одной до четырех основных задач [2]:

- 1) удерживать расплавленный металл или раскалённые газы (а также их потоки) в заданном объёме или пространстве;
- 2) предотвращать вторичное окисление и загрязнение металла неметаллическими включениями;
- 3) служить тепловой изоляцией металлических частей агрегатов;
- 4) поддерживать заданную температуру металла (газов) или заданные минимальные потери из агрегата.

Конструкторы, строители печей, изготовители огнеупоров и инженеры-эксплуатационники это хорошо понимают. Целесообразный выбор футеровки печей только тогда возможен, если с одной стороны, известны как можно точнее особенности характеристик огнеупорных материалов и с другой - нагрузки материалов на реальном производстве. Связь между различными видами термических нагрузок в промышленных печах и важнейшими эксплуатационными характеристиками огнеупоров (таблица 1.1) образуют основу для классификации их свойств и выбора испытательных методов. Эти методы также важны для контроля качества и разработки новых огнеупорных материалов.

Таблица 1.1 - Эксплуатационные характеристики огнеупоров

Вид испытания	Важные для практики свойства
Термическое и термомеханическое	Огнеупорность Температура деформации под нагрузкой Ползучесть под нагрузкой Предел прочности при высоких температурах Термическое расширение Дополнительная усадка / расширение (огнеупоров в процессе службы) Термостойкость
Термотехническое	Теплопроводность Удельная теплоёмкость Плотность сырого материала Температуропроводность

Огнеупорные материалы применяют для изготовления внутреннего облицовочного слоя (футеровки) металлургических печей и ковшей для расплавленного металла. Огнеупорные материалы способны выдержать нагрузки при высоких температурах, противостоять резким изменениям температур, химическому воздействию шлака и печных газов. Огнеупорность материала определяется температурой его размягчения. По химическим свойствам огнеупорные материалы разделяют на кислые, основные, нейтральные.

Высокое качество огнеупорных материалов — основное условие долговечности футеровки. Огнеупорные материалы должны обладать химической инертностью, высокими огнеупорностью и термической стойкостью, малыми теплопроводностью и электропроводностью, постоянством объема при повторных нагревах, допускать простую технологию применения и быть дешевыми.

Огнеупоры имеют очень большое значение в экономике нашей страны. Без огнеупоров невозможно выплавить ни 1 т металла, произвести ни 1 т цемента, стекла, ряда химических соединений, получить ни 1 кВт электроэнергии на ТЭС и много других областей, не мыслимых без огнеупоров.

Современные тенденции развития производства и применения огнеупоров заключаются в следующих моментах:

- повышение качества огнеупоров. Если раньше под повышением качества огнеупоров понимали увеличение показателей их свойств (прочности, плотности, термостойкости и др.), то сейчас фактически повышение качества огнеупоров означает степень их полезности у потребителей, т.е. степень удовлетворения потребностей потребителя комплексом показателей: повышением стойкости огнеупоров, снижением расхода огнеупоров на 1 т продукции, технико-экономическим эффектом и

итоговым показателем - коэффициентом эффективности огнеупоров (суммой производства и применения огнеупоров).

Другой актуальной современной тенденцией производства и применения огнеупоров является разработка технологии новых видов огнеупоров. Так, например, только в области шпинелидных огнеупоров по данным академика А.С. Бережного существует 1,5 тыс. шпинелидов, из которых можно изготовить 84 видов новых огнеупоров. Это без добавки графита, а с добавкой графита и бескислородных соединений можно получить более 200 видов новых высокостойких огнеупоров, изготовленных по электронной технологии. В этой области относительно подробно рассмотрены только шпинелиды системы $\text{MgO-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и начаты работы по шпинелидным наноогнеупорам [3].

Для решения этих задач необходимо создать методологические основы и последовательность проектирования футеровок нового поколения, при следующих параметрах:

входные параметры:

- условия службы и механизм износа огнеупоров;
- расчеты физико-химических моделей огнеупоров нового поколения с помощью компьютерных программ;
- уточнение термофизических и химических свойств огнеупоров нового поколения путем изготовления лабораторных образцов и определение их свойств;
- разработка компьютерной технологии производства и применения огнеупоров нового поколения;

выходные параметры:

- расчеты, проектирования и изготовление теплоизоляционных футеровок нового поколения, полностью удовлетворяющих требованиям металлургов и других потребителей.

Материалы, которые могли бы найти применение в качестве футеровки металлургических печей, можно разделить на следующие группы окислы, карбиды, нитриды, сульфиды, бориды и элементы.

Сырье для *огнеупорных материалов* - простые и сложные оксиды (например, SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , MgO-SiO_2), бескислородные соединения (например, графит, нитриды, карбиды, бориды, силициды), а также оксинитриды, оксикарбиды, сиалоны.

Для изготовления огнеупоров используют разнообразные технологии и процессы. Преобладающей является технология, включающая предварительную, тепловую обработку и измельчение компонентов, приготовление шихт с добавлением пластифицированных составляющих, формование из них изделий прессованием на механических и гидравлических прессах или экструзией с последующей допрессовкой или литьем, обжиг в туннельных, реже в периодических и газокамерных печах для получения заданных свойств материала.

Огнеупорные изделия могут быть формованными и неформованными.

Неформованные огнеупоры - огнеупоры, изготовленные без определенных форм и размеров в виде кусковых, порошковых и волокнистых материалов, а также паст и суспензий. Неформованные огнеупорные материалы обычно упрочняют введением минеральных (например, жидкое стекло) или органических (полимеры) связующих.

К ним относят металлургические заправочные порошки, заполнители и мелкозернистые компоненты для огнеупорных бетонов, огнеупорные цементы, бетонные смеси и готовые к применению массы, мертели, материалы для покрытий (в т.ч. торкрет-массы), некоторые виды волокнистых огнеупоров.

Неформованные огнеупоры могут быть сухими, полусухими, пластичными и жидкотекучими.

Неформованные огнеупоры применяют для выполнения и ремонта футеровок сталеразливочных ковшей (набивные и наливные кремнеземные, высокоглиноземные и магнезиальные массы); конвертеров (торкрет-массы), нагревательных и обжиговых печей (шамот, и высокоглиноземные массы), индукционных печей (корундовые и периклазовые массы), коксовых печей (обмазки), подин мартен, и электродуговых печей (заправочные порошки) и т. д.

Формование огнеупорных материалов проводят методами полусухого и горячего прессования, пластического формования, литья (вибrolитья) из текучих масс или расплава материала, а также распилом предварительно изготовленных блоков или горных пород.

Формованные огнеупоры применяют для изготовления огнеупорных кладок стен, сводов, подов и других конструкций коксовых, мартеновских и доменных печей, печей для выплавки различных сплавов, при футеровке ядерных реакторов, МГД-генераторов, авиационных и ракетных двигателей; неформованные - для заполнения швов при кладке формованных огнеупоров, нанесения защитных покрытий на металлы и огнеупоры.

По характеру термической обработки различают безобжиговые и обожженные огнеупорные материалы.

Безобжиговые огнеупоры - изделия из огнеупорных материалов и связки, приобретают требуемые свойства при сушке с температурой менее 400°C (после нагрева изделий от 400 до 1000°C их называют термообработанными). Связкой могут быть глины, керамические суспензии, растворы фосфатов, щелочные силикаты (жидкое стекло), смолы термопластичные и термореактивные, эластомеры и другие безобжиговые огнеупоры по прочности и пластичности не уступают, а по термостойкости превосходят обожженные огнеупоры.

Наиболее широко применяют следующие безобжиговые огнеупоры: кремнеземистые бетонные блоки (для нагревательных колодцев), шамот и высокоглиноземные (для обжиговых агрегатов), магнезиальноизвестковые на смоляной (пековой) связке (для сталеплавильных конвертеров) периклазовые

и периклазохромитовые (для сталеразливочных стаканов), магнезиальные в стальных каскетах.

Для обожженных огнеупорных материалов температура обжига превышает 600 °С и определяется достижением необходимых физико-химических свойств материала. Обжиг огнеупорных материалов проводят в плазменных или электрических печах периодического или непрерывного действия - камерных, кольцевых, туннельных, шахтных и др.

Другие важные свойства огнеупорных материалов - пористость, термическая стойкость, теплопроводность, температура начала деформации под нагрузкой и химическая стойкость в различных средах.

По пористости (объемной доле пор в %) различают:

- особоплотные огнеупорные материалы (пористость менее 3%),
- высокоплотные (3-10%),
- уплотненные (16-20%),
- материалы повышенной пористости (20-30%),
- легковесные (45-75%) - огнеупоры с высокой (45-85%) пористостью.
- ультралегковесные (75-90%), к которым обычно относят волокнистые огнеупорные материалы.

По химико-минеральному составу огнеупоры делят на типы (кремнеземистые, алюмосиликатные, глиноземистые, глиноземоизвестковые, магнезиальные, известковые, хромистые, цирконистые, оксидные, углеродистые, карбидкремниевые и бескислородные), на типы на группы. При композиционном составе в наименовании огнеупоров на первое место ставится преобладающий компонент (например, периклазохромитовые и хромитопериклазовые).

Графитовые огнеупорные материалы для изготовления форм. С целью уменьшения взаимодействия между расплавом и формой вместо кварцевых песков применяют высокоогнеупорные материалы и материалы высшей огнеупорности.

В качестве наполнителя используют огнеупорные материалы, которые имеют одинаковый коэффициент термического расширения (КТР) с материалом оболочки, так как при различии в КТР возможно возникновение напряжений и трещин в оболочковой форме при ее прокаливании и заливке.

В металлургии используются композиционные огнеупорные материалы для футеровки печей, для кожухов, арматуры печей, наконечников термопар, погружаемых в жидкий металл, и др. В данном случае эффективность применения заключается в увеличении срока службы металлургического оборудования. В горнорудной промышленности из композиционных материалов на основе тугоплавких соединений изготавливают буровой инструмент, коробки буровых машин, детали буровых комбайнов, транспортеров и др. Эффективность применения заключается в высокой абразивной стойкости и износостойкости композиций.

Для изготовления литейных форм применяют различные огнеупорные материалы. Химические свойства формовочных материалов в значительной

степени predeterminedются их минералогическим составом. Для изготовления оболочковых форм используют следующие огнеупорные материалы: кварцевый песок, дистен-силиманит, цирконовый песок, электрокорунд, оксид магния и оксид кальция.

Сталеплавильное производство является крупнейшим потребителем огнеупоров: при выплавке и разливке стали, расходуется 40% общего количества производимых огнеупорных изделий, в том числе наиболее качественных на основе оксидов магния и алюминия. Расход их зависит в значительной степени от структуры сталеплавильного производства [1]. Таким образом, сокращение удельного расхода огнеупоров в металлургии – актуальная задача, решение которой невозможно без изучения механизма термического разрушения.

Шамотные огнеупоры – содержат в своём составе 28-45% Al_2O_3 и 50-70 SiO_2 . Технология производства формованных шамотных огнеупоров включает: обжиг глины (каолина) при 1300-1500 °С во вращающихся или шахтных печах, измельчение полученного шамота, смешивание со связующей глиной и водой (иногда с добавлением других связующих материалов), формование, сушку и обжиг при 1300-1400 °С.

Шамотные огнеупоры применяют для футеровки доменных печей, сталеразливочных ковшей, нагревательных и обжиговых печей, котельных топок и др., а также для изготовления сифонных изделий для разливки стали. Неформованные шамотные огнеупоры изготавливают из измельченного шамота и связующих материалов и применяют в виде мертелей, набивных масс, порошков, заполнителей бетонов при выполнении и ремонте огнеупорных футеровок разных тепловых агрегатов.

Отличительной особенностью высокоглиноземистых огнеупорных изделий является повышенное содержание Al_2O_3 , которое превышает 45 %. Огнеупорность высокоглиноземистых изделий составляет порядка 1750 °С и выше. В сумме с высокой температурой начала размягчения и повышенной химической стойкостью против кислых и щелочных расплавов позволяет использовать их в основных тепловых агрегатах металлургической промышленности.

Наиболее распространенными агрегатами для применения высокоглиноземистых огнеупорных изделий являются: верхняя часть стен и купола воздухонагревателей, кладке лещади и горна в доменных печах, при непрерывной разливке стали; в печах с рабочей температурой 1400-1500 °С, сталеразливочные ковши при обработке стали вакуумированием, как заполнители огнеупорных бетонов, мертелей и т.п.

Эти огнеупорные изделия бывают трех видов:

- Муллитокремнеземистые (Al_2O_3 - 45-62%), МКР, имеют шамотную основу из глины и бокситов; характеризуются содержанием Al_2O_3 до 62 %. Они производятся методом плавки в электрической печи оксидов алюминия и кремния.

- Муллитовые (Al_2O_3 - 62-72 %);

- Муллитокорундовые (Al_2O_3 - 72-90 %) МК, так же, как и МЛ, имеют основу из глиноземов, маложелезистых бокситов и электрокорундов.

Высокоглиноземистые корундовые огнеупоры. К ним относятся огнеупоры, содержание Al_2O_3 в которых >95 %. Для изготовления такого огнеупора используют порошок электроплавкого корунда и технический глинозем. После формировки его обжигают при температуре 1600 – 1750 °С. Огнестойкость получаемого материала позволяет использовать его в процессах с температурой 1750 – 1800 °С, корундовый огнеупор способен устойчиво контактировать с жидким металлом и шлаками, кислотами, щелочами и расплавленным стеклом.

Из корундовых огнеупоров изготавливают корундовые плиты для шиберных затворов сталеразливочных ковшей, изделия для футеровки камер вакууматоров стали, насадки высокотемпературных воздухонагревателей, чехлы термонар, тигли для плавки стекол, металлов и др.

Неформованные корундовые огнеупоры - мертели и бетоны с корундовым заполнителем применяют для футеровки патрубков вакууматоров стали, а массы и обмазки - для изготовления и ремонта огнеупорных футеровок с рабочей температурой более 1700 °С.

Большое внимание уделяется магнезитовым огнеупорам, как одним из наиболее перспективных. Возросло и количество разработанных огнеупорных составов на основе MgO . Новые огнеупоры обладают улучшенными показателями по пределу прочности, пределу применяемых температур и др. [4, 5].

Магнезиальные огнеупоры – огнеупорные изделия, содержащие в основе MgO . Их изготавливают из смеси обожженных и сырых материалов, которые после добавки связки проходят термообработку при температуре 1500-1900 °С.

Такие огнеупоры обладают высокой огнестойкостью, что позволяет применять их в процессах, связанных с расплавом металла и шлаками, а также при футеровке агрегатов металлургии. Магнезиальные огнеупорные изделия имеют высокую стойкость при взаимодействии с расплавами металлов и основных шлаков.

Магнезиальные огнеупорные изделия бывают трех видов:

Магнезиальносиликатные огнеупоры - их основу составляет форстерит Mg_2SiO_4 , к которому добавлены 50-60 % MgO , 25-40 % SiO_2 и связующая добавка. Магнезиальносиликатные огнеупоры формуют со связующей добавкой и обжигают при 1450-1550 °С (или используют без обжига).

Основные свойства магнезиальносиликатных огнеупоров: пористость открытая 22-28%, температура начала размягчения под нагрузкой - до 1610-1620 °С.

Магнезиальносиликатные огнеупоры применяют для футеровки насадок регенераторов мартенов, и стекловарных печей, сталеразливочных ковшей (в т.ч. в виде набивных масс), плавильных агрегатов ЦМ, а также для изготовления сталеразливочных стаканов и др. Неформованные

магнезиальносиликатные огнеупоры могут применяться как добавка в металлургических порошках.

Магнезиальношпинелидные огнеупоры имеют в своем составе периклаз и хромшпинелид MgO . Обжигаемые при температуре 1700-1850 °С, периклазохромитовые огнеупоры имеют в своем составе более 60 % MgO , и от 5 до 20 % Cr_2O_3 . Для получения нужных характеристик огнеупора необходим чистый, более 96 %, MgO , а также концентраты хромита.

К магнезиальношпинелидным огнеупорам (также относят: хромитопериклазовые, изготавливаемые из смеси периклазового порошка с хромитовой рудой и содержащие 40-60 % MgO и 15-35 % Cr_2O_3 ; периклазошпинельные (более 40 % MgO и 5-55 % Al_2O_3), шпинельные, состоящие в основном из шпинели состава MgO и Al_2O_3 и хромитовые огнеупоры (более 30 % Cr_2O_3 и более 40 % MgO).

Такие огнеупоры используют в самых ответственных местах металлургических агрегатов: в сталелитейных печах при футеровке сводов, в горловинах и летках кислородных конвертеров, в сталелитейных ковшах, в высокотемпературных печах.

Стоимость магнезиальношпинелидных огнеупоров более низкая, чем магнезиальношпинелидных периклазохромитовых, поэтому первые применяются на менее ответственных участках металлургических агрегатов.

Магнезитоизвестковые - изготавливаются из прошедшего обжиг доломита или из составов, в которые входят окислы магния и кальция. Такие огнеупоры служат для футеровки конвертеров.

Периклазовые огнеупоры - магнезиальные огнеупоры, содержащие более 85 % MgO . Их изготавливают из периклазового порошка с добавлением клеящей связки обжигом при 1600-1900 °С; для безобжиговых периклазовых огнеупоров используют связки из лигносульфонатового сульфата магния и др.

Периклазовые огнеупорные изделия применяют для футеровки стенок мартеновских печей, миксеров, печей для плавки меди и никеля, высокотемпературных нагревательных печей, леток кислородных конвертеров и др., а также в виде плит шиберных затворов сталеразливочных ковшей, стаканов для разливки сталей, пористых фурм для продувки стали газами и т.п. Неформованные периклазовые огнеупоры используют для изготовления мертеля, металлургических (заправочных) порошков, набивных масс для вакууматоров стали, индукционных печей и др.

Периклазоуглеродистые огнеупоры - огнеупоры, изготовленные из периклазового порошка с добавлением 6-25 % природного или искусственного графита и органической связки (например, фенольной порошкообразной с этиленгликолем или бакелита). производятся из спеченного и плавленого периклаза с добавлением 6-25 % графита (натурального или искусственного) и органической связки (например, фенольной с этиленгликолем или бакелита).

Периклазоуглеродистые огнеупоры используются в промышленности для футеровки агрегатов, подающих газ в конвертерах со смешанной продувкой, а

также участков стен мощных электродуговых печей. Широко применяются периклазоуглеродные огнеупоры и в производстве шиберных затворов, а также шлакового пояса электродуговых печей и сталеразливочных ковшей.

Группа Магнезит в 2011 г модернизирует 4 электропечи и увеличит выпуск плавленного периклаза до 50 тысяч тонн в год.

Плавленный периклаз является основой для всех высококачественных огнеупорных изделий и увеличение объемов его производства входит в число ключевых стратегических задач Группы Магнезит.

Отличительной особенностью плавленных материалов являются их высокая плотность и значительная коррозионная стойкость. В технологии огнеупоров плавленные материалы занимают особое место, поскольку позволяют выпускать продукцию повышенной стойкости и развивать высокоэффективные процессы в металлургии, химической технологии, производстве строительных материалов, энергетике, приборостроении и других отраслях промышленности [6].

Алюмопериклазовые огнеупоры сочетают в себе качества углеродсодержащих и высокоглиноземистых огнеупоров. Хорошая термостойкость последних (более высокая, чем у огнеупоров основного состава) повышена введением углеродного компонента.

Алюмопериклазовые огнеупоры изготавливаются с использованием корунда, плавленного или спеченного периклаза, алюмомагнезиальной шпинели, высококачественных спеченных бокситов и крупночешуйчатого графита с различными функциональными добавками. Содержание Al_2O_3 в них превышает 73 %.

Данный вид огнеупорных изделий предлагается как альтернатива к периклазоуглеродистым и высокоглиноземистым огнеупорам, в случае если их стойкость не удовлетворяет техническим условиям. Они используются при футеровке сталеразливочных ковшей и кислородных конвертеров.

Периклазохромитовые изделия содержат более 60 % MgO и 5-20 % Cr_2O_3 . Периклазохромитовые огнеупоры формуют и обжигают при 1700-1850°C. Для высококачественных периклазохромитовых огнеупорных изделий используют MgO чистотой более 96 % и концентраты хромита.

Данный вид огнеупоров характеризуется высокой термостойкостью и стойкостью к фаялитовому шлаку. Они производятся из спеченного и плавленного периклаза с добавлением хромитовой руды. Содержание магнезита колеблется от 65 до 83 %, хромита – от 17 до 35 %.

Хромитопериклазовые огнеупоры используются в цветной металлургии для кладки высокотемпературных печей, в печах взвешенной плавки и обеднения шлаков, для футеровки отражательных печей, конвертеров. Хромитопериклазовые огнеупорные материалы применяются также в средней части насадок регенераторов, работающих при температурах 700-1100 °C.

1.2 Свойства огнеупоров и их влияние на стойкость футеровки

Основное свойство огнеупорных изделий - огнеупорность, т.е. способность изделия противостоять, не расплавляясь, действию высоких температур. Огнеупорность характеризуется температурой, при которой стандартный образец из материала в форме трехгранной усеченной пирамиды высотой 30 мм и сторонами оснований 8 и 2 мм (конус Зейгера) размягчается и деформируется так, что его вершина касается основания. Определенная таким образом температура обычно выше максимально допустимой температуры эксплуатации огнеупорных материалов.

Различают:

- собственно огнеупорные материалы (огнеупорность 1580-1770 °С);
- высокоогнеупорные (1770-2000 °С);
- материалы высшей огнеупорности (выше 2000 °С).

Огнеупоры могут быть общего назначения и для определения тепловых агрегатов и устройств, например, доменные, для сталеразливных ковшей и т.д., что указывается в нормативно-технической документации.

Термическая стойкость — это способность огнеупорных изделий выдерживать резкие колебания температур, не растрескиваясь и не разрушаясь.

Растрескивание или разрушение огнеупорных изделий при резких изменениях температуры объясняется возникновением в них напряжений при уменьшении или увеличении объема.

При нагревании температура наружных слоев огнеупорных изделий (до наступления теплового равновесия) значительно выше, чем внутренних, причем эта разница тем больше, чем меньше их теплопроводность и чем выше скорость повышения температуры при нагревании.

Под влиянием термического расширения при нагревании, т. е. увеличения объема, наружные слои огнеупорных изделий расширяются значительно больше, чем более холодные внутренние слои, при этом в определенных слоях огнеупорных изделий появляются скалывающие напряжения; если по своей величине они превосходят силы сцепления частиц между собой, то в них появляются трещины и отколы.

При охлаждении наружные слои огнеупорных изделий остывают быстрее, чем внутренние, причем уменьшение объема наружных слоев всегда происходит с опережением изменения объема внутренних, более нагретых слоев. Возникающие при этом растягивающие напряжения, так же как и при нагревании огнеупоров, приводят к их растрескиванию и разрушению.

Термическая стойкость кирпича определяется количеством теплосмен, т. е. количеством попеременных нагревов до 1300° С и охлаждений в проточной воде до потери 20% массы первоначально взятого образца вследствие его растрескивания.

Наибольшей термостойкостью обладают многошамотные, корундовые, углеродистые и карборундовые огнеупорные изделия, а наименьшей термостойкостью — динасовые, обладающие большими изменениями объема при превращении одной кристаллической формы в другую в определенных интервалах температур, и магнезитовые, составляющие которых имеют различные коэффициенты расширения.

Термическая стойкость огнеупорных изделий в основном зависит от их структуры и природы исходного сырья, причем, чем меньше температурное изменение объема огнеупорных изделий при резком их нагревании и охлаждении, тем выше термическая стойкость.

Такие особенности огнеупорных материалов, как малая деформативность, небольшая релаксационная способность и хрупкость способствуют возникновению термических напряжений, которые может привести к разрушению материала.

Механическая прочность огнеупорных изделий характеризуется пределом прочности в кгс/см², которую выдерживает образец при сжатии в обычных температурных условиях,

Предел прочности на сжатие огнеупоров определяется их структурой. Чем плотнее, мелкозернистее и однороднее структура огнеупорных изделий, тем меньше в них трещин и тем выше их механическая прочность.

В связи с тем, что механическая прочность огнеупоров связана с их структурой, обуславливающей пористость, шлакоустойчивость, термическую устойчивость и другие качества, предел прочности на сжатие при нормальных условиях является важным показателем. Чем выше предел прочности при сжатии, тем лучше качество огнеупоров. При обычной температуре предел прочности на сжатие находится в пределах от 80 до 1000 кгс/см².

Огнеупорные изделия в тепловых агрегатах в большинстве случаев подвергаются сжатию, в некоторых случаях – истиранию и очень редко – изгибу. Усилия сжатия весьма незначительны, так как возникают под действием собственной массы огнеупорной кладки и обычно не превышают 1 кгс/см² и только в редких случаях достигают 3-4 кгс/см².

Истирающему действию твердыми и жидкими материалами огнеупорные изделия подвергаются в шахтных (доменных, известеобжигательных вагранках) и вращающихся печах, где твердая шихта, загружаемая в печь, непрерывно перемещается, соприкасаясь при этом с кладкой, и разрушает (истирает) ее. Чем выше газопроницаемость и ниже температура деформации огнеупорных изделий под нагрузкой при высоких температурах, тем быстрее происходит ее истирание.

Сопротивление огнеупорных изделий изгибу примерно в 3-5 раз меньше сопротивления сжатию.

В работе [7] приведены результаты испытаний углеродсодержащих огнеупоров производства ОАО «Комбинат Магнезит». В статье указаны характеристики изделий, их стойкость, а также отмечена повышенная

устойчивость огнеупоров к термическому скалыванию при колебаниях температуры. При этом стоит отметить, что такая характеристика, как предел прочности при сжатии (принимая значения от 19 до 61 МПа – для разного вида огнеупоров) приведена только при температуре 20 °С. Таким образом, в заводских данных не показана динамика изменения этого параметра в зависимости от температуры.

При разработке тепловых режимов разогрева высокотемпературных агрегатов, значения многих параметров принимаются для расчётов постоянными, т.е. не зависящими от температуры. Так, зачастую, для расчётов принимают постоянными значения удельной объёмной теплоёмкости c , коэффициента теплопроводности λ и предела прочности σ . Между тем, значение такого параметра, как предел прочности материала на сжатие сильно зависит от температуры. Так, если при температуре 20 °С предел прочности на сжатие шамотного огнеупора составляет 20 МПа, то при 600 °С предел прочности равен уже 40 МПа [8].

Термомеханические свойства определяют, используя высокотемпературные методы с приложением внешних сил. При этом в испытуемом материале возникают механические напряжения. Взаимозависимость напряжения и деформации у огнеупорных материалов при высоких температурах очень сложная, поскольку имеют место не только обратимые, упругие деформации, но и необратимые, пластические, зависящие от времени деформации.

Термомеханическое поведение огнеупоров вследствие этого может рассматриваться как взаимозависимость параметров:

- напряжения;
- деформации;
- температуры;
- времени.

Для определения термомеханических и термотехнических свойств огнеупоров было разработано много методов, но только немногие из них нашли применение в мировой лабораторной практике и были соответственно стандартизированы:

- ISO 1893; ГОСТ 4070-2000 (EN 993-8; DIN 51053): Determination of Refractoriness Under Load (differential - with rising temperature).
- ISO 3187; ГОСТ 4070-2000 (EN 993-9; DIN 51053): Determination of Compression.
- ISO 5013; ГОСТ Р 50523-93 EN 993-7; DIN 51048): Determination of Modulus of Rupture at Elevated Temperatures.
- ISO 8894-1(EN 993-14; DIN 51046): Determination of Thermal Conductivity; Hot-wire Method (cross array; $X < 1,5 \text{ W/mK}$).
- ISO 8894-2 (EN 993-15): Determination of Thermal Conductivity; Hot-wire Method (parallel; $X < 25 \text{ W/mK}$).

Один из методов определения термомеханических и термотехнических свойств огнеупоров по ГОСТ 4071.1-94 деформации огнеупоров под

нагрузкой - это мера деформационного поведения огнеупорного материала при постоянном приложенном давлении при комнатной температуре. Измерения проводятся в статической атмосфере при комнатной температуре. Для повышения точности измерений дополнительно прилагается установка для продувки измерительной камеры инертным газом.

Для испытания углеродсодержащих материалов (например, магнезитокарбоновые кирпичей) реализована контролируемая испытательная атмосфера с использованием аппаратуры.

Система с плавно меняющейся нагрузкой устройство нагрузки может быть оборудовано по выбору дополнительно механизмом, позволяющим изменять нагрузку непрерывно. При варьируемой преднагрузке до 300 Н может быть дана дополнительная изменяющаяся нагрузка от 0 до 700 Н со скоростью изменения в интервале 0,3 - 3 Н/с.

Сущность этого метода. Образец для испытаний высверливают из изделия, вырезают или отсекают от одного из его прямых углов по направлению прессования. Если у изделия сложной формы (в том числе клинового) нет прямых углов или оно имеет форму тела вращения, образец изготавливают из его средней части по направлению прессования.

Образец высушивают до постоянной массы при температуре не ниже 110 °С или при температуре, на (15 ± 5) °С превышающей температуру кипения охлаждающей жидкости, применяемой при изготовлении или шлифовании образцов.

Образец или вспомогательное устройство с образцом устанавливают одной из нагружаемых поверхностей на нажимную плиту, обеспечивая центрирование образца. При испытании образцов, изготовленных из высокоплотных изделий или изделий из абразивных масс (глиноземистых, карбидкремниевых), рекомендуется применять картонные прокладки, помещаемые между образцом и нажимными плитами.

Размеры прокладок должны быть не менее чем на 5 мм больше размеров нагружаемых поверхностей испытуемого образца. Образец нагружают равномерно и непрерывно со скоростью $(1,0 \pm 0,1)$ Н/(мм² · с) до разрушения. Допускается увеличивать скорость до $(2,0 \pm 0,1)$ Н/(мм² · с). Регистрируют максимальную нагрузку. Недостаток этого метода при испытаниях огнеупорного материала - отсутствие учёта воздействия температуры.

Существует следующий метод ГОСТ 25085-81 определения прочности на деформацию при высоких температурах.

Термическое растрескивание представляет собой явление, возникающее в результате внутренних (термических, температурных) напряжений, превышающих допустимый предел прочности при данной температуре. Они вызваны различием термического расширения зон футеровки при тепловых ударах или при постоянном большом температурном градиенте. Если скорость разогрева будет такой, при которой в футеровке возникнут температурные напряжения превышающие допустимые пределы, то это

может привести к преждевременному её разрушению. Общепринятая скорость разогрева высокотемпературных агрегатов $60\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ [9].

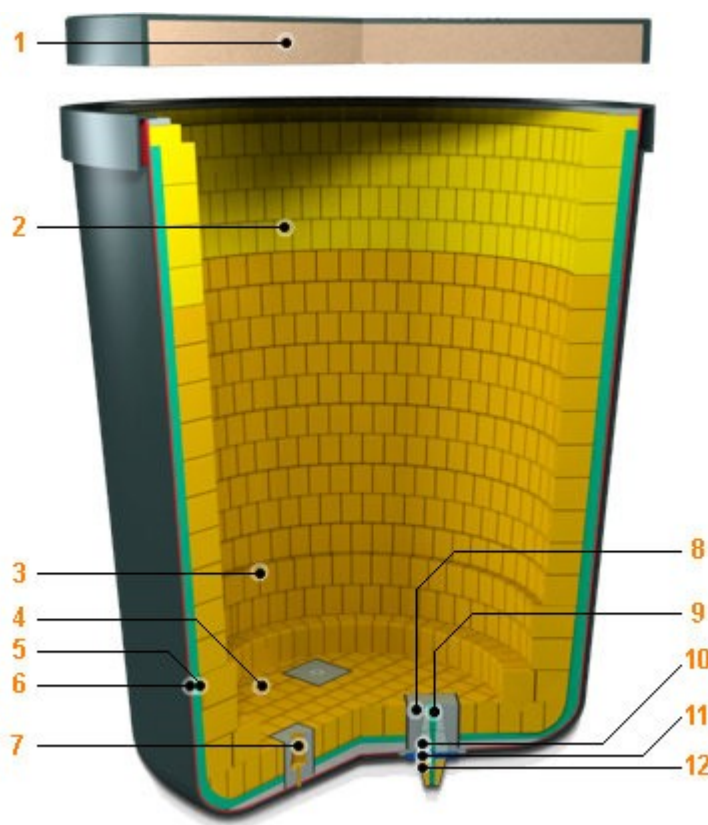
Общие вопросы тепловой работы высокотемпературных агрегатов представлены в литературе достаточно широко. Подробно рассматриваются вопросы термодинамических основ работы печей, радиационных и конвективных режимов работы, тепломассообмена в печах и др. [8, 10].

Волкова О. и Янке Д. в своей работе приводят результаты разработки числовой модели ковша для всестороннего рассмотрения теплового состояния сталеразливочных ковшей с целью оценки остаточной толщины стенки и температурных потерь расплава при различных условиях эксплуатации. Результатом работы является анализ тепловых состояний ковшей с доломитовой и шпинельной футеровкой [11].

1.3 Характеристика объекта исследования

В качестве объекта исследования тепловой работы высокотемпературных агрегатов были выбраны сталеразливочные ковши ёмкостью 25 тонн. Эксплуатация данных ковшей осуществляется на предприятии ПФ ТОО «Кастинг» (г. Павлодар). Ковши предназначены для слива металла из печей, обработки металла на установке печь–ковш до необходимого химического состава и транспортировки металла до машины непрерывного литья заготовок. Среднее время нахождения металла одной плавки в ковше составляет 165 минут. В среднем температура металла в ковше – $1615\text{ }^{\circ}\text{C}$. Общий вид ковша представлен на рисунке 1.1.

Рабочий слой футеровки исследуемого сталеразливочного ковша ёмкостью 25 тонн составляют периклазоуглеродистые огнеупорные материалы. Нижние ряды рабочего слоя футеровки составляют огнеупоры марки PFC – 9806 RA, два верхних ряда и шлаковый пояс – огнеупоры марки PFC – 9812 RA.



Зоны футеровки: 1-крышка фурмы; 2-шлаковый пояс; 3-стены; 4-днище; 5-арматурный слой; 6-теплоизоляционный слой; 7-фурма; 8-гнездовой блок; 9-стартовая смесь; 10-сталеразливочный стакан; 11-шиберная плита; 12-стакан-коллектор

Рисунок 1.1 – Общий вид 25 – тонного сталеразливочного ковша: 1 – разливочный стакан; 2 – продувочная пробка.

В таблице 1.2 приведены состав и некоторые характеристики используемых огнеупоров.

Таблица 1.2 – Состав и характеристики огнеупоров

Маркировка	Состав, %		Кажущаяся плотность, г/см ³	Открытая пористость, %	Предел прочности на сжатие, МПа
	MgO	C			
1	2	3	4	5	6
PFC – 9806 RA	≥ 80	≥ 8	≥ 3,05	≤ 4	≥ 40
PFC – 9812 RA	≥ 78	≥ 12	≥ 2,98	≤ 4	≥ 40

Футеровка ковша состоит из четырёх слоёв. Слой 1, непосредственно соприкасающийся с расплавленным металлом (рабочий слой), выложен

огнеупорными кирпичами толщиной 135 мм (шлаковый пояс – 150 мм). Слой 2 теплоизоляции состоит из набивной муллито – корундовой массы, толщиной 30 мм. Третий слой выложен из шамотного кирпича ШБ – 5 и имеет толщину 65 мм. Последний слой 4, соприкасающийся с кожухом ковша, представляет собой листы асбокартона, толщиной 10 мм (рисунок 1.2).

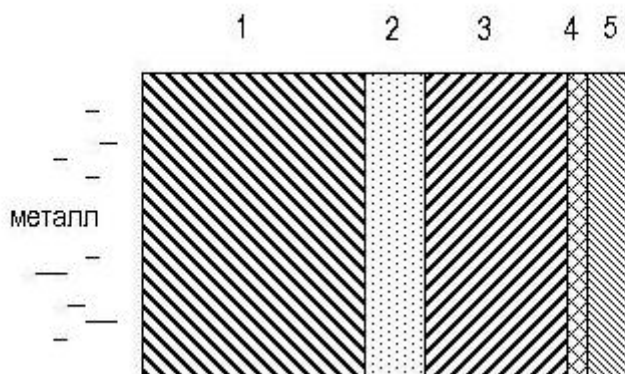
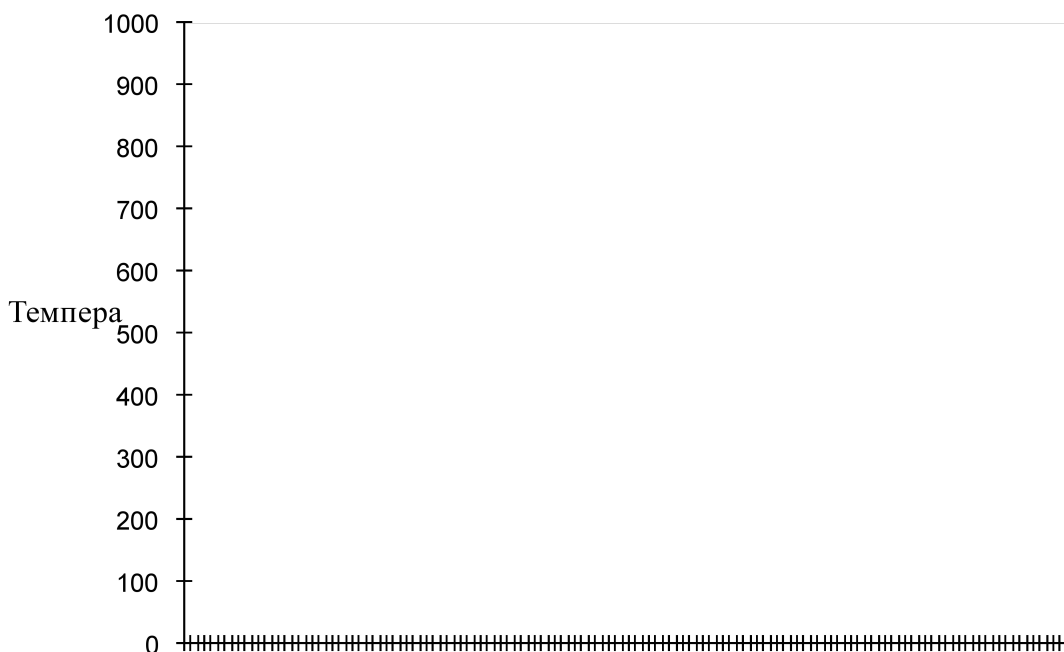


Рисунок 1.2 – Футеровка стен сталеразливочного ковша: 1 – рабочий слой; 2 – теплоизоляция; 3 – арматурный слой; 4 – асбокартон; 5 – металлический кожух.

Сушка и разогрев сталеразливочных ковшей производится газом на специальных стендах. При разогреве ковша не производится контроль температуры, т.к. стационарный контроль температуры технологически затруднён, а установка термопар непосредственно в футеровке может привести к аварийной ситуации, связанной с протечкой металла через футеровку и расплавлению кожуха.

Для исследования процесса нагрева ковша были произведены замеры температур внутренней поверхности футеровки [12]. Графики нагрева представлены на рисунке 1.3. Кривая 1 соответствует измерению температуры на 2/3 высоты ковша, а кривая 2 – на подине.



Графики нагрева являются ступенчатыми. Видна временная выдержка, соответствующая температуре 350 – 400°C (кривая 1) и 150 – 200°C (кривая 2).

Эксплуатация ковшей при использовании данной футеровки показывает, что средняя продолжительность работы ковшей до промежуточного ремонта составляет в среднем 22 плавки. Причины вывода ковшей в промежуточный ремонт: износ огнеупорной кладки шлакового пояса и неудовлетворительное состояние буферной массы над шлаковым поясом. Остаточная толщина огнеупоров шлакового пояса перед выводом ковша в промежуточный ремонт составляет в среднем 97 мм. Средняя продолжительность работы ковшей до капитального ремонта составляет 40 плавок, при одном промежуточном ремонте (замена верхних рядов огнеупоров).

Футеровка ковша в холодном состоянии при выводе его в капитальный ремонт не имеет монолитной структуры. Наблюдаются вертикальные трещины, проходящие через все ряды кладки. Трещины проходят через стыки кирпичей и располагаются по окружности ковша через каждые 5 – 7 кирпичей (50 – 70 см). Средняя толщина трещин составляет 3 мм. Трещины образуются вследствие термического расширения огнеупоров. Кладка рабочего слоя осуществляется без связующего раствора между кирпичами. Кроме того, в кладке не предусмотрены температурные швы.

Выводы:

1) Надежная эксплуатация высокотемпературных агрегатов зависит от качества огнеупорных материалов. Кроме того, основным условием

долговечности футеровки металлургического агрегата является анализ экспериментальных данных различных режимов разогрева футеровок при использовании разнообразных огнеупорных материалов.

2) В настоящее время наблюдается увеличение потребления магнезитовых огнеупорных материалов, как огнеупоров, имеющих высокие термомеханические показатели при относительно невысокой стоимости.

3) Объект исследования – сталеразливочный ковш, ёмкостью 25 тонн, при разогреве и эксплуатации имеет ряд проблем, связанных с температурными режимами; следствием чего является наличие трещин в магнезитовом рабочем слое футеровки.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО АГРЕГАТА

2.1 Теории прочности материалов

При решении вопросов повышения стойкости футеровки различных высокотемпературных агрегатов необходимо провести анализ причин, приводящих к разрушению огнеупорных материалов, а также создать модель тепловой работы футеровки в целом.

Анализ условий работы различных типов промышленных печей показывает, что механизм разрушения футеровок достаточно многообразен, но можно выделить одну общую причину – это наличие значительных градиентов температуры, возникающих в кладке печей.

Существует ряд теорий и гипотез, предложенных для вычисления критериев предельного состояния. Рассмотрим наиболее значимые из них.

Как показывают экспериментальные исследования, прочность материалов существенно зависит от вида напряженного состояния. В общем случае нагруженного тела напряженное состояние в какой-либо точке вполне может быть определено величиной напряжений в трех координатных плоскостях, проходящих через эту точку. При произвольном выборе положения координатных плоскостей, в каждой из них, вообще говоря, имеются и нормальные, и касательные напряжения. Для них вводятся соответствующие обозначения в плоскости xy : s_{zz} , t_{zx} , t_{zy} ; в плоскости xz : s_{yy} , t_{yx} , t_{yz} ; в плоскости yz : s_{xx} , t_{xy} , t_{xz} . Здесь первый индекс показывает ориентацию площадки, в которой действует напряжение, т.е. какой из координатных осей она перпендикулярна. Второй индекс указывает направление напряжения по координатной оси.

В каждой точке тела существуют три взаимно перпендикулярные плоскости, свободные от касательных напряжений, носящие название главных площадок. Нормальные напряжения в этих площадках называются главными напряжениями и обозначаются s_1 , s_2 , s_3 . При этом всегда $s_1 > s_2 > s_3$. Заметим, что более подробно вопросы теории напряженного состояния в точке обсуждены в десятом разделе настоящей книги, и по данному вопросу имеется обширная литература.

Напряженные состояния разделяются на три группы. Напряженное состояние называется:

- а) объемным или трехосным, если все главные напряжения s_1 , s_2 , s_3 не равны нулю;
- б) плоским или двухосным, если одно из трех главных напряжений равно нулю;
- в) одномерным или одноосным, если два из трех главных напряжений равны нулю.

Основной задачей теории прочности является установление критерия прочности, позволяющего сравнить между собой опасность различных напряженных состояний материала.

Выбранный критерий прочности должен быть обоснован на основе экспериментальных данных путем проведения испытаний различных материалов в зависимости от вида напряженного состояния, как функция от соотношений между значениями главных напряжений.

Заметим, что, так как в настоящее время строгой единой теории прочности материалов, в зависимости от вида напряженного состояния, не существует, поэтому при выполнении практических расчетов применяются упрощенные критерии.

В настоящее время при выполнении расчетов конструкций на прочность, при произвольных напряженных состояниях, широко используются теории прочности.

Перечислим наиболее известные в сопротивлении материалов теории прочности.

- Первая теория прочности — Теория наибольших нормальных напряжений.
- Вторая теория прочности — Теория наибольших деформаций.
- Третья теория прочности — Теория наибольших касательных напряжений.
- Четвертая теория прочности (энергетическая) — Теория наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения.
- Теория прочности Мора — [Теория предельных напряжённых состояний](#) (иногда говорят — V теория прочности).

Из всех вышеперечисленных теорий прочности наиболее полной, точной и всеобъемлющей является теория Мора. Все её положения были проверены экспериментально. Она подходит как для проверки прочности хрупких материалов (чугун, бетон, кирпич), так и для проверки на прочность пластичных материалов (низкоуглеродистая сталь). Теория наибольших нормальных напряжений и теория наибольших деформаций подходит только для прочностного анализа хрупких материалов, причём только для каких-то определённых условий нагружения, если требовать повышенную точность расчёта. Вот поэтому первые две теории прочности сегодня применять не рекомендуется. Результаты теории наибольших касательных напряжений и теории наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения можно получить в некоторых частных случаях нагружения при применении теории Мора.

В зависимости от условий нагружения материал может находиться в различных механических состояниях: упругом, пластическом и в состоянии разрушения. Под предельным подразумевают такое напряженное состояние, при котором происходит качественное изменение свойств материала — переход от одного механического состояния к другому. Для пластических материалов предельным считается напряженное состояние, соответствующее заметным остаточным деформациям, а для хрупких — такое, при котором начинается разрушение материала.

При линейном напряженном состоянии предельное значение единственного в этом случае главного напряжения может быть непосредственно определено из опыта (σ_T – для пластических материалов и σ_B – для хрупких). Поэтому оценка прочности в этом частном случае проста. В случае сложного напряженного состояния (объемного или плоского) при оценке прочности необходимо учитывать наличие двух или трех отличных от нуля главных напряжений. При этом опасное состояние материала зависит не только от величины главных напряжений, но и от соотношений между ними.

Из-за невозможности экспериментального определения критериев опасного состояния материала при сложном напряженном состоянии пользуются гипотезами, формулирующими условия перехода материала в опасное состояние. На основании таких гипотез построены теории прочности. Эти теории исходят из предпосылок о том, что сложное и линейное напряженные состояния считаются эквивалентными (по прочности), если они при пропорциональном увеличении главных напряжений в одно и то же число раз одновременно становятся опасными. Поэтому оценка прочности материала при любом напряженном состоянии основывается на результатах опытов при простом растяжении (сжатии), и исследуемое напряженное состояние сравнивается с линейным. Для материалов с выраженной пластичностью за опасное (предельное) состояние принимается такое, при котором начинают развиваться остаточные деформации. Для материалов, находящихся в хрупком состоянии, опасным считается такое состояние, которое предшествует началу появления трещин.

Общая запись условия прочности при сложном напряженном состоянии имеет вид:

$$\sigma_{\text{пр}} \leq [R], \text{ или } \sigma_{\text{пр}} \leq [\sigma],$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ — расчетное или приведенное напряжение при сложном напряженном состоянии.

Формулы приведенных напряжений устанавливаются теориями прочности в зависимости от принимаемых гипотез.

О применимости той или иной теории прочности для практических расчетов можно сказать следующее.

Разрушение материалов происходит путем отрыва за счет растягивающих напряжений или удлинений и путем среза за счет наибольших касательных напряжений. При этом разрушение отрывом может происходить при весьма малых остаточных деформациях или вовсе без них (хрупкое разрушение). Разрушение путем среза имеет место лишь после некоторой остаточной деформации (вязкое разрушение). Таким образом, первую и вторую теории прочности, отражающие разрушение отрывом, можно применять лишь для материалов, находящихся в хрупком состоянии. Третью и четвертую теории прочности, хорошо отражающие наступление текучести и разрушение путем

среза, надлежит применять для материалов, находящихся в пластическом состоянии.

Так как первая и вторая теории прочности обладают существенными недостатками, то в настоящее время утверждается мнение о нежелательности их применения. Таким образом, для практических расчетов следует рекомендовать четвертую (или третью) теорию прочности для материалов, одинаково сопротивляющихся растяжению и сжатию, и теорию Мора — для материалов, различно ее проявляющихся растяжению и сжатию, т. е. для хрупких материалов (для них в настоящее время пока еще применяют и вторую теорию прочности).

Следует подчеркнуть, что состояние материала (хрупкое или пластическое) определяется не только его свойствами, но и видом напряженного состояния, температурой и скоростью нагружения. Как показывают опыты, пластичные материалы при определенных условиях нагружения и температуре ведут себя, как хрупкие, в то же время хрупкие материалы в определенных напряженных состояниях могут вести себя, как пластичные. Так, например, при напряженных состояниях, близких к всестороннему равномерному растяжению, пластичные материалы разрушаются, как хрупкие. Такие напряженные состояния принято называть «жесткими». Весьма «мягкими» являются напряженные состояния, близкие к всестороннему сжатию. В этих случаях хрупкие материалы могут вести себя, как пластичные. При всестороннем равномерном сжатии материалы могут выдержать, не разрушаясь, очень большие давления.

Кинетическая теория прочности подчеркивает необходимость учета влияния теплового движения (флуктуации тепловой энергии) на процессы деформирования и разрушения, особенно в их начальной стадии [13]. Процесс разрушения при нагрузках ниже критической не может происходить при отсутствии теплового движения атомов и молекул, которое является фактором, принципиально обуславливающим разрыв материала при нагрузках, меньших критической. Можно сделать вывод, что разрушение следует рассматривать как процесс, в котором вследствие тепловых флуктуации преодолевается энергетический барьер U_0 , сниженный в результате действия напряжений на величину $-U_a$. При этом процесс разрушения представляет собой ряд элементарных актов, связанных с тепловым движением атомов и молекул.

По кинетической теории прочности следует, что время, в течение которого объект может эксплуатироваться при максимальной нагрузке, должно совпадать с величиной, обратной частоте тепловых колебаний атомов. Резерв прочности материалов, таким образом, огромен, а степень его освоения зависит от уровня развития технологии и от уровня развития науки о прочности.

Согласно развиваемой С. Н. Журковым кинетической теории прочности твердых тел, нагруженный образец разрушается за счет хаотического теплового движения. Непрерывно возникающие дефекты кристаллической

решетки уже не рассасываются, а начинают скапливаться, образуя микроскопические, а затем и макроскопические разрывы в образце. Чем выше температура и больше приложенная нагрузка, тем быстрее накапливаются эти нарушения и тем раньше разрушается образец.

В соответствии с этой теорией, основанной на экспериментальных данных, разрушение различных материалов рассматривается как процесс, развивающийся во времени при приложении внешней силы.

Структура ряда широко используемых критериев кинетической теории прочности применительно к процессам динамического нагружения аналогична критерию С. Н. Журкова, в основу которого положен принцип температурно - временной суперпозиции.

Такой механизм разрушения объясняет смысл термина кинетическая теория прочности: разрушения в напряженном полимере как результат постепенной термомеханодеструкции макромолекул накапливаются до тех пор, пока не создадутся условия, обеспечивающие разрушение всего образца.

Теория Гриффитса. Разница между теоретической и практической прочностями по Гриффитсу заключается в том, что в реальных телах имеются многочисленные трещины (трещины Гриффитса), концентрирующие напряжения так, что на участках, свободных от трещин, напряжения достигают критических значений, равных и превышающих теоретическую прочность. Напряжение материала у трещины неодинаково, на остром конце трещины оно больше и равно:

$$\sigma_{\max} = 2\sigma_{cp} \sqrt{\frac{l}{r}} \quad (2.1)$$

где σ_{cp} — среднее напряжение в материале;

l — длина трещины около 10^{-4} см;

r — радиус кривизны кончика трещины равен приблизительно межатомному расстоянию $\approx (1-4)A^0$; $\left(\frac{l}{r}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 10^2$, т.е. $\sigma_{\max}$ на два порядка больше σ_{cp} .

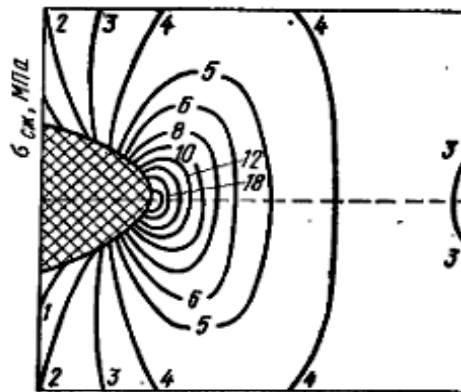


Рисунок 2.1 - Концентрация напряжений вблизи концевой части эллиптической трещины

Таким образом, при сравнительно небольшой величине среднего напряжения в материале на кончике трещины возникает большое локальное напряжение, приводящее к росту трещины. Растягивающие напряжения направлены перпендикулярно к трещине. Заштрихованная область представляет собой трещину. Цифры на кривых постоянного напряжения показывают, во сколько раз местное напряжение больше среднего.

Поры не только концентрируют напряжения, но и экранируют часть материала от напряжений. В самом деле материал, непосредственно расположенный над порой или под порой, испытывает гораздо меньшее напряжение, чем остальной материал, а материал между порами при этом будет испытывать еще большее напряжение. Экранизация напряжений в большей степени проявляется крупными порами.

Теория «двух стадий». По этой теории разрушение материалов под влиянием термических напряжений происходит в две стадии: зарождения трещин и их роста. Критерии термостойкости R , R^I и R^{II} относятся к стадии зарождения трещин.

Теория двух стадий не опровергает теорию максимальных напряжений, а развивает ее. Зародившаяся трещина в гетерогенных материалах, какими являются большинство огнеупоров, развивается медленно, а может и вообще не развиваться. По теории Гриффитса, трещины будут расти в том случае, если упругая энергия, освободившаяся из напряженной области, будет больше энергии, необходимой для создания двух новых поверхностей раздела.

По Хассельману, критерии распространения трещин выражаются следующими формулами [14]:

$$R^{II} = \frac{E}{[\sigma_{пч}^2 (1-\mu)]}; \quad (2.2)$$

$$R^{IV} = R^{III} \cdot \nu_{эф} \quad (2.3)$$

где $\nu_{эф}$ — эффективная энергия, необходимая для создания двух новых поверхностей раздела.

Чтобы трещины не развивались, материал должен обладать высоким значением модуля упругости и низкой прочностью, а чтобы трещины не зарождались, модуль упругости должен быть низким, прочность высокой.

Кажущееся противоречие, в самом деле, не является противоречием. В гетерогенном материале трещины зарождаются в твердых фазах, и, чтобы трещины в них не зарождались, эти фазы должны иметь высокую прочность, а распространяются трещины во всем объеме многофазного материала: по твердым фазам и порам. Напряжения в порах гасятся. Для того чтобы трещины не развивались, материал должен иметь поры, а следовательно, в целом быть менее прочным.

Трещины, зарождающиеся при термоударах в магнезите и хромите, гасятся в порах определенного строения.

Критерий R^{IV} удовлетворительно описывает термостойкость огнеупоров микротрещиноватой текстуры и не подходит или не всегда подходит к оценке термостойкости зернистых материалов, хотя оба вида текстур относятся к гетерогенным.

Гогоци Г.А. предложил классифицировать огнеупоры по их отношению к термостойкости не степени гетерогенности, а по мере хрупкости [15]. Термостойкость с учетом меры хрупкости выражается формулой:

$$R^* = R(3 + \chi) / 4\chi . \quad (2.4)$$

2.2 Постановка задачи

Срок безаварийной работы любого теплоэнергетического агрегата во многом определяется прочностью футеровки, поэтому, несмотря на многочисленные исследования, вопрос о повышении её стойкости остаётся одним из наиболее важных. Обеспечение рациональных с точки зрения напряжённо–деформированного состояния условий эксплуатации составляющих её конструктивных элементов – один из путей повышения стойкости футеровки в целом.

Анализ проведённых исследований показывает, что существует множество причин, вызывающих разрушение футеровок теплоэнергетических агрегатов. Несмотря на это, можно выделить одну общую причину – наличие значительных градиентов температуры, возникающих при работе оборудования [16].

Наиболее напряжённым периодом в работе футеровки является разогрев. Именно в этот период возникают максимальные температурные перепады и изменяется температурный коэффициент расширения.

В процессе нагрева футеровка теплоэнергетических агрегатов подвергается интенсивному воздействию высоких температур и тепловых потоков. Это вызывает значительный перепад температур по толщине кладки и появление больших температурных напряжений и деформаций, приводящих к её растрескиванию. Глубина проникновения трещин определяется конструкцией агрегата, его размерами и материалом футеровки. Появление трещин уменьшает огнеупорные свойства материалов и ведёт к более интенсивному износу футеровки в целом.

Огнеупорные материалы в сталеразливочных ковшах используются в качестве высокотемпературной тепловой изоляции без существенных механических нагрузок. Это означает, что при анализе их разрушений можно пренебречь действием механических нагрузок и ограничиться рассмотрением тепловых воздействий.

В процессе эксплуатации сталеразливочных ковшей футеровка периодически нагревается в условиях наполнения жидкой сталью при высокой температуре и охлаждается при её разливе. Разность температур между сталью и подогретой футеровкой может достигать до 800 °С и более. Большая скорость изменения температуры футеровки при нагреве и охлаждении приводит к растрескиванию или отслаиванию поверхностного слоя.

Другими словами, если огнеупорная кирпичная стенка подвергается одностороннему нагреву, то с повышением температуры нагреваемой поверхности возрастает её расширение. Участок поверхности нагрева, испытывающий наибольшее расширение, разрушается под действием возникающего напряжения, поскольку максимальное давление, порождаемое расширением, превышает предел прочности этого участка при сжатии.

В общем случае термонапряжённое состояние рабочего слоя футеровки теплоэнергетического агрегата математически описывается следующими системами уравнений [17]:

1) Уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho \cdot c}, \quad (2.5)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 q_v – мощность внутренних источников тепла, Вт/м³;
 ρ – плотность вещества, кг/м³;
 c – теплоёмкость вещества, Дж/(кг·К).

2) Уравнениями равновесия

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} - \rho \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

3) Зависимостями между напряжениями и деформациями

$$\begin{aligned} E_{xx} &= \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha T, \\ E_{yy} &= \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha T, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$E_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})] + \alpha T,$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2G} \sigma_{xy}; \quad E_{yz} = \frac{1}{2G} \sigma_{yz}; \quad E_{zx} = \frac{1}{2G} \sigma_{zx}.$$

4) Зависимостями между деформациями и перемещениями

$$E_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x}; \quad E_{yy} = \frac{\partial V}{\partial y}; \quad E_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z},$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right),$$

(2.8)

$$E_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right),$$

$$E_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} \right)$$

Наибольшее практическое значение имеет задача в квазистатической постановке, когда не учитываются инерционные эффекты, так как динамические эффекты, обусловленные нестационарным нагревом, и тепловые потоки, образующиеся вследствие деформации, настолько малы, что ими можно пренебречь.

При таких допущениях исходные уравнения и зависимости (2.5 – 2.8) распадаются на уравнение теплопроводности и задачу о термоупругих напряжениях при заданном температурном поле. Таким образом, необходимо определить компоненты напряжений при известном распределении температур по толщине футеровки. Эти функции в каждой точке тела удовлетворяют исходным уравнениям (2.5 – 2.8) и граничным условиям. При этом тело считается идеально упругим и изначально однородным.

Напряжения, возникающие в слое футеровки, определим, рассмотрев зависимость между термоупругими напряжениями и деформациями.

$$E_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] + \alpha T(x, y, z, t),$$

$$E_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] + \alpha T(x, y, z, t),$$

(2.9)

$$E_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})] + \alpha T(x, y, z, t),$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2G} \sigma_{xy}; \quad E_{yz} = \frac{1}{2G} \sigma_{yz}; \quad E_{zx} = \frac{1}{2G} \sigma_{zx}.$$

При этом температура по толщине рабочего слоя изменяется по закону $T = f(y)$. В данном случае компоненты напряжения будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma; \\ \sigma_{zz} &= \sigma_{xz} = \sigma_{yx} = \sigma_{zy} = 0.\end{aligned}\tag{2.10}$$

С учётом того, что $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$; $\sigma_{zy} = \sigma_{yz}$; $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$ [15] система уравнений (2.5 – 2.9) примет вид:

$$\begin{aligned}E_{xx} &= \frac{1}{E}(\sigma - \nu \cdot \sigma) + \alpha T(y, t), \\ E_{yy} &= \frac{1}{E}(\sigma - \nu \cdot \sigma) + \alpha T(y, t), \\ E_{zz} &= -\frac{1}{E}(2 \cdot \nu \cdot \sigma) + \alpha T(y, t).\end{aligned}\tag{2.11}$$

При рассмотрении каждого слоя футеровки в отдельности деформацию этого слоя принимаем равной нулю ($E_{xx} = E_{yy} = E_{zz} = 0$). Таким образом, в качестве основной расчётной формулы для определения температурных напряжений будем использовать равенство [18]:

$$\sigma = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \cdot T(y, t)\tag{2.12}$$

Функция распределения температуры в рабочем слое футеровки будет иметь вид:

$$T(y, t) = T_{cp} - T_i,\tag{2.13}$$

где T_{cp} – среднеинтегральная температура, °C,
 T_i – температура в рассматриваемой точке, °C.

2.3 Выбор схемы расчёта температурных полей

Расчёт термонапряжённого состояния тела разбивается на две задачи: расчёт температурного поля тела во времени и расчёт непосредственно температурных напряжений. При расчёте температурных напряжений первым этапом необходимо подсчитать распределение температур по сечению футеровки в данный момент времени. Для этого используется математическое моделирование тепловых процессов, происходящих в теплоэнергетических агрегатах, основанное на их математическом описании.

Применение высококачественных математических моделей приносит значительный эффект. Они позволяют проводить исследования процессов, происходящих в агрегатах, при меньших затратах, чем практические исследования на реальных агрегатах или физических моделях. С помощью математических моделей можно ещё на стадии проектирования найти оптимальное конструктивное оформление агрегата и выбрать оптимальные режимные параметры его работы.

Процесс распространения тепла в футеровке ковша является нестационарным, поэтому для решения задачи нестационарной теплопроводности применим метод конечных разностей [19].

Запишем дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho \cdot c}, \quad (2.14)$$

При этом уравнение теплопроводности будет иметь бесчисленное множество решений. Чтобы из этого множества выделить одно решение, соответствующее единичному явлению данного класса, необходимо знать условия однозначности. В условия однозначности входят геометрические условия, определяющие форму и размер тела; начальные условия, то есть распределение температуры в объёме тела в некоторый момент времени $\tau=0$, принимаемый за начало отсчёта; граничные условия, характеризующие тепловое взаимодействие окружающей среды с поверхностью тела.

В данном случае, с учётом известных температур, на внутренней поверхности футеровки будем иметь граничные условия 1 рода:

$$T|_{y=0} = T_i. \quad (2.15)$$

На внешней поверхности футеровки будем иметь граничные условия 3 рода:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=H} = \alpha (T_o - T|_{y=H}) \quad (2.16)$$

Начальные условия будут представлены заданным начальным распределением температур в футеровке:

$$T(y) = T_n, \quad 0 \leq y \leq H \quad (2.17)$$

Для решения задачи внутреннего теплообмена в рабочем слое футеровки примем некоторые допущения. В случае нагрева сталеразливочного ковша будем считать размеры в направлении осей x и z неограниченными, а толщину в направлении оси y конечной. Температура изменяется только по толщине, внутренних источников тепла нет. С учётом того, что $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$,

математическая формулировка одномерной задачи теплопроводности будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad 0 < y < H, \quad (2.18)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$.

Разобьём всю толщину футеровки H на n конечных элементарных слоёв, толщина каждого из которых равна Δy , то есть:

$$H = n \cdot \Delta y. \quad (2.19)$$

Отсчёт времени будем вести конечными интервалами $\Delta \tau$. Тогда производную температуры по времени в левой части уравнения (2.18) можно приближённо выразить через конечные приращения температуры и времени следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} \approx \frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta \tau}, \quad (2.20)$$

где T_{i+1}^k – температура некоторого k – го элементарного слоя в момент времени $i+1$, то есть по прошествии времени $\tau = (i+1) \cdot \Delta \tau$ с начала процесса;

T_i^k – температура того же k – го слоя в предыдущий, то есть в k – тый момент времени.

Точно также первую производную температуры по координате y можно представить как:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_1 \approx \frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\Delta y}, \quad (2.21)$$

то есть как приращение температуры по координате, отнесённое к приращению координаты. Здесь T_i^k – температура k – го элементарного слоя в i – тый момент времени, а T_i^{k-1} – температура предыдущего $(k-1)$ – го слоя в тот же момент времени.

Очевидно, что соседнее, то есть взятое через отрезок Δy , значение этой производной будет иметь вид:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_2 \approx \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta y}. \quad (2.22)$$

Разность между двумя этими величинами, отнесённая к отрезку Δy , даст конечно-разностное выражение для второй производной температуры по координате:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_2 - \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_1}{\Delta y}, \quad (2.23)$$

или

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \approx \frac{T_i^{k+1} - 2 \cdot T_i^k + T_i^{k-1}}{\Delta y^2}. \quad (2.24)$$

Подставляя выражения (2.20) и (2.24) вместо соответствующих производных в уравнение (2.18), получим это уравнение в конечно-разностном виде:

$$\frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta \tau} = a \cdot \frac{T_i^{k+1} - 2 \cdot T_i^k + T_i^{k-1}}{\Delta y^2}. \quad (2.25)$$

Так как в задачах нестационарной теплопроводности всегда известно начальное распределение температуры, цель расчётов методом конечных разностей заключается в том, чтобы зная распределение температуры в данный, например i – тый, момент времени, найти это распределение в последующий, то есть в $(i+1)$ – й момент. Таким образом, искомой величиной в уравнении (2.25) является температура k – того элементарного слоя в $(i+1)$ – й момент времени, которую можно выразить через температуры любых слоёв, но обязательно в предыдущий (то есть в i – тый) момент времени.

Основная идея метода конечных разностей (метода сеток) заключается в том, что непрерывная область изменения пространственной переменной $0 \leq y \leq H$ заменяется конечной совокупностью дискретно расположенных узловых точек $y_1, y_2, \dots, y_n, y_{n+1}$. При равномерном расположении этих точек на отрезке $[0, H]$ их координаты равны $y_i = (i-1)\Delta y$ при $i = 1, \dots, n+1$, где расстояние между соседними точками (шаг по координате) $\Delta y = H / n$. Аналогичным образом, вместо непрерывного изменения температурного поля во времени рассматриваются значения температуры в фиксированные моменты времени $\tau_k = k\Delta \tau$, $k = 1, 2, \dots$, где $\Delta \tau$ – интервал между двумя последовательными моментами времени (шаг по времени).

В плоскости (y, τ) совокупность узловых точек с координатами (y_i, τ_k) образует прямоугольную сетку, и расчёт температурного поля $T(y, \tau)$ сводится к отысканию сеточной функции T_i^k , приближённо характеризующей температуру тела в узловых точках. При замене непрерывной функции $T(y, \tau)$ дискретной сеточной функцией T_i^k необходимо заменить дифференциальное уравнение теплопроводности с соответствующими краевыми условиями

системой алгебраических (разностных) уравнений, связывающих значения сеточной функции в соседних узловых точках. Такая система алгебраических уравнений, являющаяся приближённой математической моделью процесса теплопроводности, называется разностной схемой решения исходной краевой задачи.

Таким образом, уравнение (2.25) является разностным аналогом дифференциального уравнения теплопроводности. Решение уравнения (2.25) может быть произведено различными путями. Получающиеся при этом разностные схемы могут значительно отличаться друг от друга в отношении точности и эффективности. Рассмотрим эффективность некоторых из них [19]:

а) Явная разностная схема.

Из уравнения (2.25) после ряда преобразований получаем ряд уравнений, характеризующих явную разностную схему:

$$T_{n+1}^{k+1} = 2fT_n^k + [1 - 2f(1+b)]T_{n+1}^k + 2fbT_0 \quad (2.26)$$

$$T_i^{k+1} = fT_{i-1}^k + (1-2f)T_i^k + fT_{i+1}^k \quad (2.27)$$

где:

$$b = \frac{\alpha \Delta y}{\lambda}, \quad f = \frac{a \Delta \tau}{\Delta y^2} \quad (2.28)$$

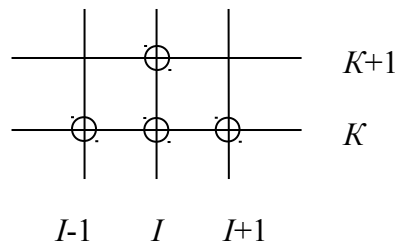


Рисунок 2.2 – Четырёхточечный шаблон, соответствующей явной разностной схеме.

То есть в каждый $(k+1)$ – й момент времени новые значения температуры T_i^{k+1} определяется тремя её значениями: T_{i-1}^k ; T_i^k ; T_{i+1}^k в предыдущий k – тый момент времени. Таким образом, используя приведённые разностные уравнения, можно, последовательно переходя от k – го к $(k+1)$ – му моменту времени, произвести расчёт дискретного температурного поля. Особенностью явной разностной схемы является то, что она распадается на отдельные уравнения, решение которых производится независимо друг от друга, причём вычисление новых значений температур в каждый момент времени производится по явным формулам.

Погрешность аппроксимации явной разностной схемы (сходимость) равна [19]:

$$\nu = O(\Delta y^2 + \Delta \tau), \quad (2.29)$$

то есть, имеет второй порядок точности по координате и первый порядок по времени.

Недостатком явной разностной схемы является ограничение выражения:

$$f \leq 1/[2 \cdot (1+b)] \quad (2.30)$$

на величину параметра:

$$f = a \cdot \Delta \tau / \Delta y^2. \quad (2.31)$$

Что требует выбора достаточно малого шага Δy , обусловленного необходимостью детального описания температурного поля. Кроме того, поскольку максимально допустимая величина шага $\Delta \tau$ уменьшается при возрастании параметра:

$$b = \alpha \cdot \Delta y / \lambda, \quad (2.32)$$

Ограничение (2.32) становится особенно обременительным при описании процессов, характеризующихся высокой интенсивностью внешней теплоотдачи.

б) Неявная четырёхточечная разностная схема.

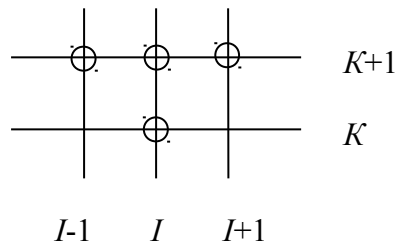


Рисунок 2.3 – Четырёхточечный шаблон, соответствующей неявной разностной схеме.

Решение системы неявных разностных уравнений производится в следующей последовательности. Сначала, перемещаясь по сетке, слева направо вычисляем значения коэффициентов α_i и β_i (прямая прогонка), по формулам:

$$\alpha_1 = \frac{2 \cdot f}{1 + 2 \cdot f}, \quad \beta_1 = \frac{T_1^k}{1 + 2 \cdot f}, \quad (2.33)$$

$$\alpha_i = \frac{f}{1 + f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}, \quad \beta_i = \frac{T_i^k + f \cdot \beta_{i-1}}{1 + f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}. \quad (2.34)$$

Затем, после нахождения температуры в правом граничном узле, перемещаясь по сетке справа налево, определяем искомые значения температур (обратная прогонка) по формуле:

$$T_i^{k+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{k+1} + \beta_i \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.35)$$

После этого производится переход к очередному шагу по времени, и вся описанная процедура повторяется. При реализации метода прогонки значение коэффициентов β_i необходимо пересчитывать на каждом шаге по времени в соответствии с изменением температур T_i^k , а коэффициенты α_i , остающиеся неизменными в течение всего расчёта, могут быть вычислены заранее.

Поскольку неявная разностная схема аппроксимирует исходную задачу теплопроводности и является устойчивой, она сходится, причём скорость её сходимости равна:

$$\nu = O(\Delta y^2 + \Delta \tau). \quad (2.36)$$

В безусловной устойчивости неявных разностных схем заключается весьма существенное их преимущество перед явной схемой. Поскольку при заданном шаге по координате выбор шага по времени в этих схемах определяется только соображениями допустимой погрешности расчёта, при решении многих практических задач его величина может иметь гораздо большее значение, чем при использовании явной разностной схемы.

в) Неявная шеститочечная разностная схема.

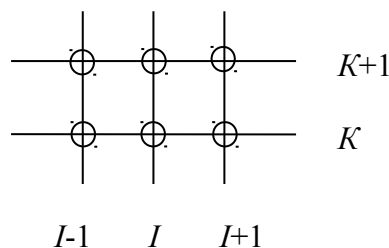


Рисунок 2.4 – Шеститочечный шаблон, соответствующей неявной разностной схеме.

Система линейных алгебраических уравнений, соответствующих неявной шеститочечной схеме решается также методом прогонки. Формулы для расчета прогоночных коэффициентов следующие:

$$\alpha_1 = \frac{f}{1+f}, \quad \beta_1 = \frac{(1+f) \cdot T_1^k + f \cdot T_2^k}{1+f} \quad (2.37)$$

$$\alpha_i = \frac{0,5 \cdot f}{f + 0,5 \cdot f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}, \quad \beta_i = \frac{0,5 \cdot f \cdot T_{i-1}^k + (1-f)T_i^k + 0,5 \cdot f \cdot T_{i+1}^k + 0,5 \cdot f \cdot \beta_{i-1}}{1 + 0,5 \cdot f \cdot (2 - \alpha_{i-1})}. \quad (2.38)$$

Температура правого граничного узла находится по формуле:

$$T_{n+1}^{k+1} = \frac{[1 - f \cdot (1+b)] \cdot T_{n+1}^k + f \cdot (T_n^k + 2 \cdot b \cdot T_0 + \beta_n)}{1 + f \cdot (1+b - \alpha_n)}. \quad (2.39)$$

После нахождения температуры в правом граничном узле, перемещаясь по сетке справа налево, определяем значения температур по формуле:

$$T_i^{k+1} = \alpha_i \cdot T_{i+1}^{k+1} + \beta_i \quad i = 1, \dots, n. \quad (2.40)$$

Неявная шеститочечная разностная схема аппроксимирует исходную задачу теплопроводности и является безусловно устойчивой. Эта схема сходится, причём скорость её сходимости равна:

$$v = O(\Delta y^2 + \Delta \tau^2). \quad (2.41)$$

Таким образом, для решения исходной одномерной задачи теплопроводности (2.18) возможно применение всех трёх методов расчёта температурных полей. При использовании явной разностной схемы необходим выбор достаточно малого шага Δy , что значительно увеличивает объём расчётов при рассмотрении достаточно продолжительных процессов разогрева металлургических агрегатов. Неявная четырёхточечная схема не накладывает каких-либо ограничений на выбор шага по координате и времени, но она не обладает такой точностью как шеститочечная разностная схема. Поэтому в качестве расчётной схемы применяем шеститочечную неявную разностную схему, имеющую более высокий порядок сходимости по времени, чем другие схемы.

2.4 Методика и результаты расчёта температурных полей

Футеровка сталеразливочного ковша состоит из четырёх слоёв. Первоначально рассмотрим рабочий слой футеровки.

В ходе расчёта будем использовать значения температуры внутренней поверхности футеровки, полученные экспериментальным путём.

Зависимость температуры внутренней поверхности футеровки от времени показана на рисунке 1.3. Использование этих данных позволяет несколько сократить процесс расчёта, то есть не рассчитывать температуру внутренней поверхности футеровки по формуле (2.35), а использовать эмпирические данные замеров. Кроме сокращения временных затрат, использование значений температур правого граничного узла приводит к уменьшению погрешности, связанной с вычислением температур этой точки.

Таким образом, алгоритм расчёта температурных полей футеровки состоит в следующем:

1. Находим значение коэффициента f по формуле (2.31).
2. Вычисляем прогоночные коэффициенты α_l и β_l а также α_i и β_i для k -го момента времени по формулам (2.37) и (2.38).
3. Находим значение температурных полей для k -го момента времени по формуле (2.40).
4. Вычисляем прогоночный коэффициент β_i для $(k+1)$ -го момента времени.
5. Находим значение температурных полей для $(k+1)$ -го момента времени.
6. Вычисляя прогоночные коэффициенты β_i для последующих моментов времени, находим значение температурных полей для этих моментов времени. Таким образом, производим расчёт температур футеровки в процессе её разогрева.

При дальнейших расчётах температурных напряжений необходимы значения среднеинтегральной температуры поля. Среднеинтегральная температура будет отличаться от средней температуры по сечению футеровки. Они будут равны лишь при прямолинейном распределении температур в футеровке. В ином случае среднеинтегральную температуру можно определить методом трапеций [20]:

$$T_{cp} = \int_0^H T(y) dy = \frac{H}{3} \cdot [(T_{n+1} + T_o) + 4 \cdot \sum T_1 + 2 \cdot \sum T_2], \quad (2.42)$$

где H – толщина слоя футеровки, м;

T_{n+1} , T_o – значения температур в правом и левом граничном узле, °C;

$\sum T_1$ – сумма значений температур в нечётных по номеру узлах, °C;

$\sum T_2$ – сумма значений температур в чётных по номеру узлах, °C.

В качестве первоначальных данных для расчёта температурных полей используем следующие значения: начальная температура рабочего слоя футеровки сталковша по всей толщине составляет 25 °C; толщина рабочего слоя – 135 мм.

При вычислении температур футеровки по неявной шеститочечной схеме рабочий слой футеровки разбиваем на двадцать равных частей (двадцать одна узловая точка). Соответственно, шаг по координате Δy составит 0,00675 м.

Весь промежуток времени процесса разогрева футеровки сталеразливочного ковша составляет 24 часа. Для расчёта принимаем шаг по времени Δt , равный 60 секундам.

В приложении А приведены температурные поля футеровки в моменты времени с резким подъёмом температуры и шагом по времени 10 минут.

Выводы:

1) В процессе нагрева футеровка теплоэнергетических агрегатов подвергается интенсивному воздействию высоких температур и тепловых потоков. Это вызывает значительный перепад температур по толщине кладки и появление больших температурных напряжений и деформаций, приводящих к её растрескиванию. Появление трещин уменьшает огнеупорные свойства материалов и ведёт к более интенсивному износу футеровки в целом.

2) Для решения одномерной задачи теплопроводности в качестве расчётной схемы применяем шеститочечную неявную разностную схему, имеющую более высокий порядок сходимости по времени, чем другие схемы.

3 РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАЗОГРЕВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

3.1 Экспериментальное определение предела прочности огнеупорных материалов при сжатии в зависимости от температуры

В рассматриваемом высокотемпературном агрегате рабочий слой футеровки сталеразливочного ковша составляют периклазоуглеродистые огнеупоры. Широкий ассортимент производимых промышленностью огнеупорных изделий на основе периклаза (MgO) создаёт определенные трудности в поиске табличных данных тепломеханических характеристик периклазоуглеродистых изделий состава. Поэтому для дальнейших исследований возникла необходимость в экспериментальном определении предела прочности при комнатной и повышенной температуре.

Повышение точности расчёта термонапряжённого состояния кладки требует получения тепломеханических характеристик огнеупорных материалов при их рабочих температурах. Для этой цели был создан экспериментальный стенд по измерению предела прочности огнеупорных материалов при повышенных температурах.

С каждым видом механизма разрушения связывается определённый критерий прочности — та или иная характеристика физического состояния материала элементов машин и аппаратов, определяемая расчётным или экспериментальным путём. Для каждого из критериев прочности материала конструкции экспериментально устанавливаются его предельные значения. По предельным значениям далее определяются допускаемые значения этих критериев. Последние определяются, как правило, путём деления предельных значений критерия прочности на соответствующий коэффициент запаса прочности. Значения коэффициентов запаса прочности назначаются на основе опыта эксплуатации с учётом степени ответственности проектируемой конструкции, расчётного срока её эксплуатации и возможных последствий её разрушения.

Для повышения точности измерений в экспериментальном стенде реализуется способ термомеханических испытаний материалов, который позволяет определить предел прочности материалов на сжатие при повышенных температурах образца с применением устройства, позволяющего определить температуру материала прямым методом [22].

Техническим результатом изобретения является получение значений предела прочности на сжатие различных материалов при повышенных температурах материала с меньшей погрешностью.

Это достигается тем, что в способе термомеханических испытаний материалов, заключающемся в нагреве контрольного и испытуемого образца из исследуемого материала, выдержке при заданной температуре и нагружению испытуемого образца до разрушения, предлагается процесс

нагрева испытуемого образца контролировать по нагреву контрольного образца.

При этом замер температуры внутри контрольного образца t_1 производить в точке, максимально приближенной к геометрическому центру контрольного образца. Это позволит повысить точность измерения температуры t материала.

На рисунке 3.1 изображено устройство для термомеханических испытаний материалов.

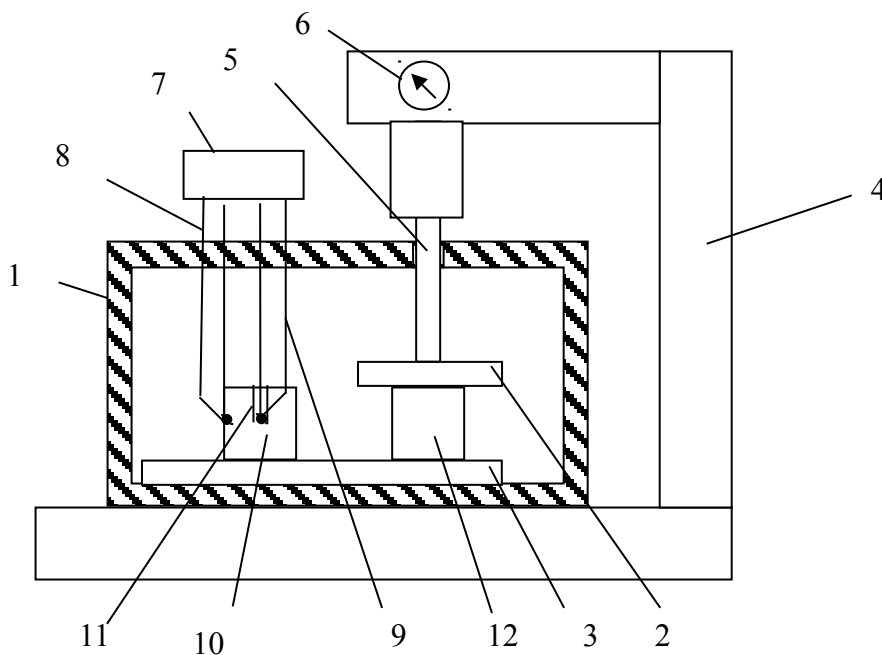


Рисунок 3.1 - Устройство для термомеханических испытаний материалов

Устройство содержит печь 1, в которой находятся верхняя 2 и нижняя 3 плиты. Для нагружения имеется пресс 4, который посредством силовой тяги 5 воздействует на верхнюю плиту 2. Измерение создаваемой нагрузки определяется по силоизмерительному устройству 6. Для вычисления температуры t используется вторичный прибор – сумматор 7.

К сумматору 7 подключены термопары 8 и 9. Термопары 8 и 9 расположены в контрольном образце 10 из исследуемого материала, расположенном на нижней плите 3. Горячий спай термопары 8 максимально приближен к геометрическому центру. Например, это может быть канал 11, просверленный по вертикальной оси симметрии до половины высоты контрольного образца. Термопара 9 расположена на любой боковой поверхности контрольного образца 10. Испытуемый образец 12 располагается в печи 1 между верхней 2 и нижней 3 плитой.

Способ осуществляется следующим образом.

Из исследуемого материала изготавливаются два одинаковых образца в форме цилиндра или прямоугольного параллелепипеда: контрольный 1 и

испытуемый 2. В контрольном образце 1 размещают термопару 4, горячий спай которой максимально приближен к геометрическому центру (по вертикальной оси симметрии высверливают канал 3 до половины высоты контрольного образца). Термопару 5, для измерения температуры на поверхности контрольного образца 1, устанавливают в любой точке на боковой поверхности. Контрольный образец 1 с закреплёнными термопарами и испытуемый образец 2 помещают в печь 6 на нижнюю плиту 7. При этом цилиндрические образцы устанавливают на любое основание, а образцы в виде прямоугольного параллелепипеда – на любую грань.

Термопары подключают к вторичному прибору для измерения температуры – сумматору 8, который показывает значение температуры t , определяемое по формуле:

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (3.1)$$

где t_1 – показания термопары внутри контрольного образца;

t_2 – показания термопары на поверхности контрольного образца.

Затем включают печь и начинают нагрев образцов.

После включения в работу печи 6 следят за величиной значения температуры t , которая определяет достижение заданной температуры испытания. Температура t считается температурой испытания.

После достижения такого температурного состояния испытуемый образец 2 подвергают одноосному нагружению прессом 9 посредством воздействия силовой тяги 10 на верхнюю плиту 11 до разрушения испытуемого образца 2. Нагрузка на образец определяется по силоизмерительному устройству 12. При этом нагрузка должна возрастать непрерывно и равномерно со скоростью, обеспечивающей его разрушение через 20-60 с после начала испытания.

Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ (Н/м²) испытуемого образца вычисляют по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P}{F}, \quad (3.2)$$

где $\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии, Н/м²;

P — наибольшая нагрузка, при которой произошло разрушение образца, Н;

F — площадь поперечного сечения образца, м².

Предлагаемый способ позволяет получить значение предела прочности на сжатие различных материалов при повышенных температурах материала с меньшей погрешностью.

В соответствии с данным способом был создан экспериментальный стенд (рисунок 3.2) и произведены исследования зависимости предела прочности на сжатие огнеупоров от температуры.

Для измерения давления в цилиндре прессы с рабочей жидкостью используется манометр. Для повышения точности измерений была проведена поверка этого прибора (акт о поверке приведён в приложении А).



Рисунок 3.2 - Стенд для исследования зависимости предела прочности на сжатие от температуры

В качестве исследуемых образцов использовались периклазоуглеродистые огнеупоры состава: $\text{MgO} \geq 80 \%$; $\text{C} \geq 8 \%$. При этом заявляемый предел прочности на сжатие равен 40 МПа (паспортные данные завода-изготовителя).

Характерным для прочности реальных тел является так называемый масштабный фактор — зависимость прочности от размеров тела. При стандартных испытаниях материала на образцах различных размеров для приведения результатов в сопоставимый вид используются переводные коэффициенты. Масштабный фактор объясняется в основном статистической природой процессов разрушения, связанной с влиянием неоднородностей макроструктуры и дефектов материала на процесс возникновения и развития трещин. С увеличением размеров образцов вероятность неоднородностей структуры возрастает и среднее значение предела прочности материала уменьшается.

Можно выделить ряд последовательных стадий разрушения огнеупорных изделий.

Вначале идёт образование локальных микротрещин (посечек) термического происхождения, секущих изделие. Толщина микротрещин колеблется от нескольких микрон до 0,2 мм в малоизменённой и переходной зонах имеются скрытые посечки, заполненные силикатами и ферритами кальция, то есть продуктами затвердевания шлака. Затем стоит упомянуть о процессе химического коррозионного растворения периклаза в шлаковом расплаве. Особенно интенсивно этот процесс протекает на рабочей поверхности футеровки.

Итогом является циклическое скалывание наружных слоёв изделий, вследствие резких колебаний температуры и недостаточной термостойкости огнеупора. Следует отметить, что циклы скалывания зависят от расположения изделий относительно уровня металла.

Таким образом, износ периклазовых изделий происходит за счёт циклического скалывания внешних слоёв изделий и частично вследствие химического разъедания периклаза в рабочей зоне. Износ огнеупоров осуществляется в результате химического взаимодействия между компонентами шлака и огнеупора с образованием легкоплавких соединений. Высокая стойкость периклазоуглеродистых изделий обусловлена образованием плотной рабочей зоны, состоящей из сростка кристаллов шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$, реликтовых обломков периклаза, мервинитамелилита и гексаалюмината кальция. Эта плотная зона предохраняет углерод от выгорания и способствует адгезии шлака, что резко повышает шлакоустойчивость изделий.

Огнеупоры при обыкновенной температуре характеризуются хрупким разрушением, которое обычно наступает после небольшой (упругой) деформации и незначительной по величине пластической (необратимой).

Упругая деформация связана с увеличением расстояния между атомами вещества при приложении нагрузки и зависит от энергии кристаллической решётки. Эта связь выражается зависимостью модуля упругости от температуры плавления.

Хрупкое и вязкое разрушение имеют разные виды разрушенной поверхности. Характер дефектов даёт понятие, какого рода разрушение имеет место. При хрупком разрушении поверхность надломлена. При вязком разрушении поверхность натянута (вяжет разрушение).

Вязкость разрушения – это относительное повышение растягивающих напряжений в устье трещины при переходе её от стабильной к нестабильной стадии роста.

Вязкость разрушения тесно связана с показателями прочности материала. Увеличение прочности сопровождается снижением пластичности и вязкости разрушения. Это объясняется тем, что у высокопрочных материалов мала энергия, поглощаемая при разрушении уровень которой определяется величиной пластической деформации у вершины трещины. Для

высокопрочных материалов эффект увеличения прочности существенно перекрывается снижением пластичности, в результате чего вязкость разрушения уменьшается. Материалы средней и низкой прочности при комнатной температуре обычно имеют более высокие значения, чем высокопрочные. С понижением температуры прочность растет и при определённых условиях поведение материала средней и низкой прочности становится таким же, как у высокопрочного материала при комнатной температуре. При низких температурах испытание вязкости разрушения можно проводить на образцах меньших размеров.

На рисунке 3.3 показано хрупкое разрушение периклазоуглерода при комнатной температуре.



Рисунок 3.3 – Разрушение периклазоуглерода при комнатной температуре

Определение предела прочности проводилось в диапазоне температур 18 – 500 °С. Результаты измерений приведены на рисунке 3.4.

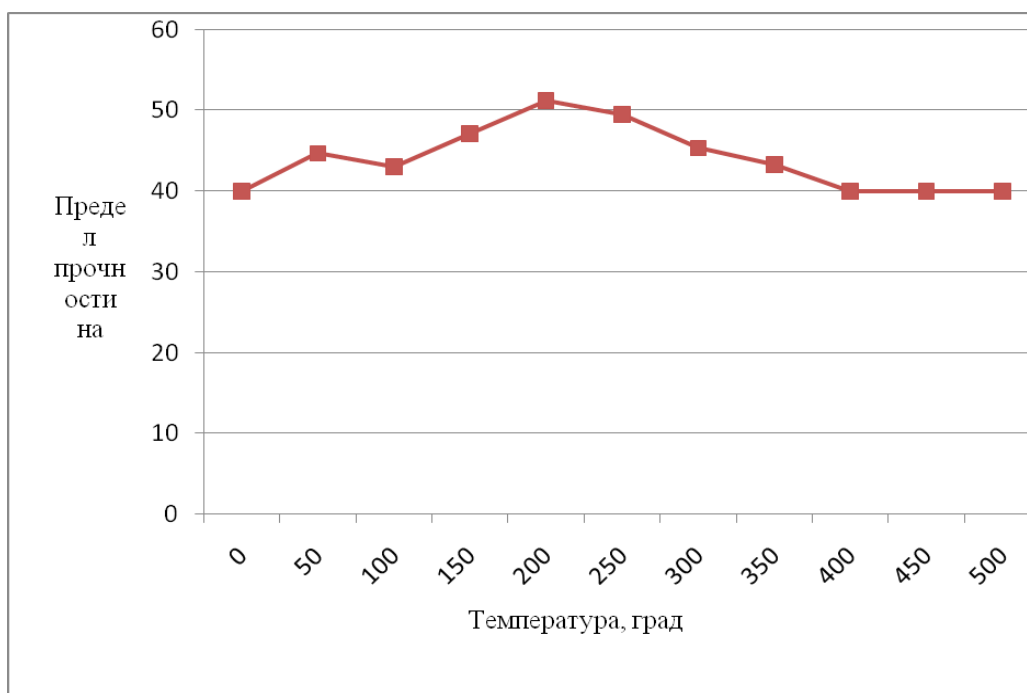


Рисунок 3.4 – Зависимость предела прочности от температуры

Кривая зависимости предела прочности от температуры имеет следующие тенденции: начиная с температуры ~ 90 °С предел прочности огнеупора растёт, доходя до значения 51,2 МПа (при температуре ~ 200 °С), затем значение предела прочности начинает плавно снижаться, доходя до 40 МПа (при ~ 400 °С).

Таким образом, значение предела прочности на сжатие в интервале температур 150 – 300 °С увеличивается на 18 – 28 %, что даёт дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энергоресурсов на разогрев.

3.2 Расчёт термических напряжений в футеровке сталеразливочного ковша

Расчёт температурных напряжений, с учётом рассчитанных ранее значений температурных полей, производится по формуле:

$$\sigma = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \nu} \cdot T(y, t). \quad (3.3)$$

При этом принимаем следующие значения параметров для периклазоуглеродистых огнеупоров (постоянные для рассматриваемой области 25-938 °С): E – модуль упругости ($E=0,7 \cdot 10^5$ МПа); α – коэффициент термического расширения ($\alpha=13 \cdot 10^{-6}$ °С⁻¹), ν – коэффициент Пуассона ($\nu=0,15$) [23].

Для периклазоуглеродистых огнеупоров предел прочности на сжатие принимается равным 40 МПа; предел прочности на растяжение: 25 МПа.

Для упрощения процессов расчета температурных полей и напряжений в футеровке теплоэнергетических агрегатов автором была составлена программа для их расчёта. Программа предполагает первоначальный ввод следующих значений:

- 1) толщины слоя футеровки металлургического агрегата;
- 2) числа шагов по координате (толщине);
- 3) шага по времени;
- 4) начальной температуры тела;
- 5) общего времени нагрева футеровки;
- 6) коэффициента упругости используемого материала;
- 7) коэффициента термического расширения;
- 8) коэффициента Пуассона;
- 9) коэффициента температуропроводности (вводится новое значение при следующем шаге по времени, вследствие зависимости его от температуры).

В приложении Б приведены значения температур рабочего слоя футеровки для моментов времени, при которых образующиеся термические напряжения превышают предел прочности.

Анализируя возникающие напряжения и скачки температур можно увидеть чёткая взаимосвязь между ними: скачк температур во временном периоде: 0:00 – 01:00 и 05:00 – 07:00 вызывает превышение предела прочности в моменты времени: 00:00 – 01:00 и 05:10 – 07:00. При нагреве в высокотемпературном участке от средней температуры возникает напряжение сжатия (σ_c), а в низкотемпературном участке напряжение растяжения (σ_p). Кроме того, следует отметить, что резкий скачок температур в первую очередь сказывается на напряжениях сжатия (при норме значений напряжений растяжения), а затем плавно переходит в низкотемпературный участок и сказывается на напряжениях растяжения.

Максимальное значение напряжения сжатия в течение всего процесса разогрева больше допустимого в 3,89 раза, а напряжения растяжения – в 3,4 раза.

Стоит отметить также временные области в которых не наблюдается резких скачков температур, но имеются напряжения превышающие предел прочности (от 05:20 до 06:30). Разрушительные напряжения вызваны в данном случае чрезмерными скоростями разогрева (в среднем 19 °C/мин), тогда как, исходя из предела прочности на сжатие 40 МПа скорость должна лимитироваться 8-10 °C/мин.

Анализируя полученные значения, можно сделать следующие выводы:

1. Скачок значений термических напряжений возникает вследствие резкого повышения температур при разогреве.
2. При значении предела прочности на сжатие 40 МПа скорость разогрева футеровки не должна 8-10 °C/мин.

3. При разогреве футеровки определяющим критерием из пределов прочности (на сжатие и растяжение) является предел прочности на сжатие. Именно его величина, в первую очередь, определяет темп разогрева.

Кроме того, можно однозначно считать, что при разогреве футеровки нельзя допускать скачкообразного подъёма и особенно снижения температуры, а также неравномерного нагрева огнеупоров на разных участках (как по высоте, так и по окружности).

Поэтому можно сделать вывод о превышении допустимых скоростей разогрева в соответствующие моменты времени. Кроме того, разогрев ковша осуществляется в течение 24 часов, а из графика (рисунок 1.3) видно, что максимальной температуры внутренняя поверхность футеровки достигает уже после 16 часов нагрева. Тем самым, в последние 8 часов происходит поддержание максимальной температуры футеровки, а не её разогрев.

Существующие скорости нагрева футеровки сталеразливочного ковша являются недопустимыми, так как возникающие при этом термические напряжения превышают допустимый предел в несколько раз. Более того, считается, что разогрев ковша осуществляется в течение 24 часов, а из графиков видно, что максимальной температуры (938 °С) внутренняя поверхность футеровки достигает уже после 16 часов нагрева. Всё сказанное позволяет сделать вывод о необходимости рационализации графика разогрева, который должен быть рассчитан из условия недопущения градиентов температур, вызывающих появление термических напряжений выше допустимых, с учётом найденной зависимости предела прочности на сжатие от температуры.

3.3 Разработка рациональных графиков разогрева

При разработке графиков разогрева кладки необходимо не только избегать превышения допустимых скоростей, но и минимизировать время разогрева. Необходимо также учесть два процесса: испарение гигроскопической влаги (при температуре ~ 100°С) и удаление связанной влаги («полочка» при температуре 350 – 400°С).

Для удаления свободной влаги, содержащейся в рабочем слое футеровки делаем временную выдержку при температуре 130 °С в течение 30 минут.

Удаление связанной влаги в процессе нагрева будем проводить аналогично графику, принятому на предприятии, то есть, при достижении внутренней поверхности футеровки температуры 345 °С дальнейший нагрев до температуры 400 °С проводим в течение четырёх часов. Разогрев осуществляет до температуры 938 °С.

Полученные при расчёте значения предела прочности на сжатие не должны превышать предел прочности полученный эмпирическим путём (для диапазона температур 18-500 °С).

В приложении В приведены значения температур по толщине рабочего слоя футеровки сталеразливочной в диапазоне температур 20 – 500 °С.

Рассмотрим разработанный график разогрева (кривая 2, рисунок 3.5).

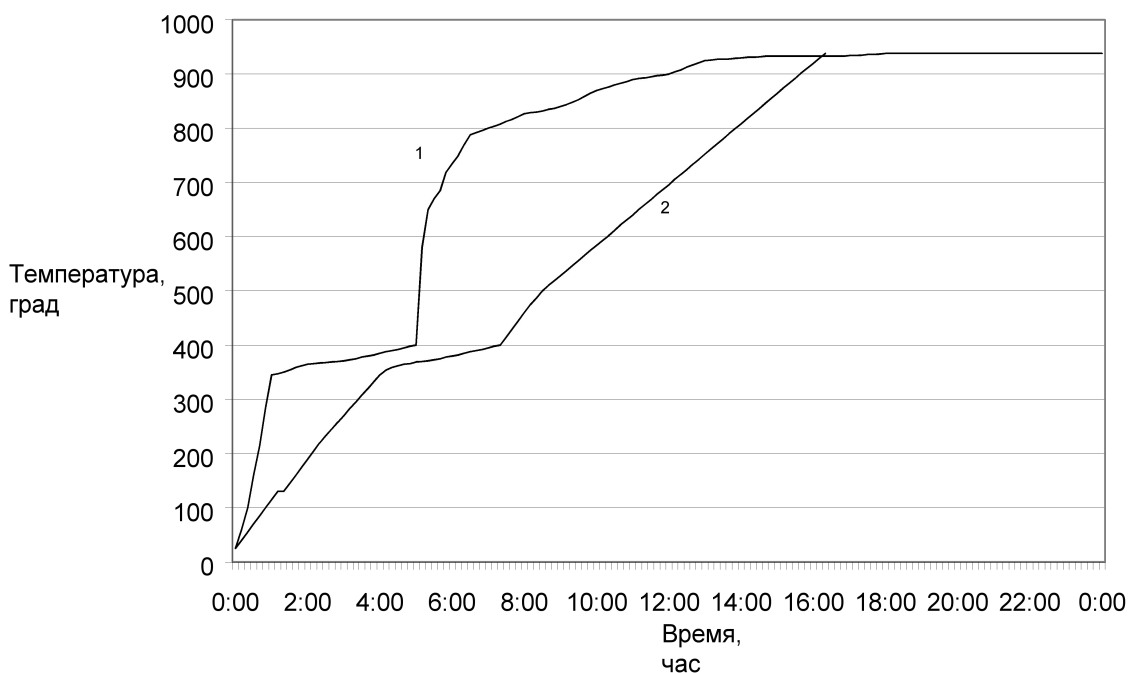


Рисунок 3.5 Разработанный график разогрева

Скорости подъема температуры для каждого участка кривой подбирались индивидуально. Средняя скорость повышения температуры на участках от 18 до 500 °С (не содержащих участки сушки), составила ~ 90 °С/ч. Общее время разогрева до температуры 938 °С составляет 16 часов 20 минут.

Разработанные графики разогрева позволяют, не превышая предел прочности огнеупорных материалов, производить процесс разогрева с максимально возможными скоростями и контролировать его. При этом происходит значительное снижение времени на процесс разогрева.

4.5 Экономическая эффективность

Разогрев сталеразливочных ковшей со скоростями, термические напряжения при которых не превышают предел прочности позволят повысить стойкость футеровки и количество плавов. Ориентируясь на литературные данные [12], можно считать, что внедрение данных разработок позволит повысить стойкость футеровок сталеразливочных ковшей с 40 до 42 плавов, то есть на 5 %. Снижение времени разогрева сталеразливочных ковшей после капитального ремонта с 24 часов до 16 часов 20 минут позволит сократить расход газа на 32 %.

Подсчитаем годовую экономическую эффективность внедрения ($\mathcal{E}_{\Sigma}$). Эффективность будет складываться из двух составляющих: экономии

денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки ($\mathcal{E}_1$) и экономии средств на разогрев ковшей после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева ($\mathcal{E}_2$).

$$\mathcal{E}_{\Sigma} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2. \quad (3.4)$$

В течение одного месяца в среднем производится один капитальный и один промежуточный ремонт футеровки сталеразливочного ковша. Общее число ковшей на предприятии составляет 20 шт. Рабочий слой футеровки полностью меняется лишь при капитальном ремонте, поэтому для подсчёта экономии денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки ($\mathcal{E}_1$) учитываем только капитальные ремонты. Таким образом, годовое количество капитальных ремонтов футеровки при увеличении её стойкости на 5 % составит:

$$N = N' - (N' \cdot 0,05), \quad (3.5)$$

где N , N' – количество капитальных ремонтов до и после повышения стойкости.

$$N = 12 - (12 \cdot 0,05) = 11,4$$

Годовое количество капитальных ремонтов всех ковшей:

$$T = n \cdot N, \quad (3.6)$$

где n – число ковшей.

Годовое количество капитальных ремонтов всех ковшей до повышения стойкости футеровки:

$$T = 20 \cdot 12 = 240$$

Годовое количество капитальных ремонтов всех ковшей после повышения стойкости футеровки:

$$T' = 20 \cdot 11,4 = 228,6$$

Снижение количества капитальных ремонтов всех ковшей вследствие повышения стойкости футеровки:

$$\Delta T = T - T' \quad (3.7)$$

$$\Delta T = 240 - 228,6 = 11,4$$

По данным предприятия, в среднем, стоимость одной тонны огнеупорного материала для футеровки рабочего слоя сталеразливочных ковшей составляет 150000 тнг. С учётом того, что масса рабочего слоя футеровки составляет 5606 кг имеем стоимость рабочего слоя футеровки одного ковша:

$$S = m \cdot s, \quad (3.8)$$

где m – масса рабочего слоя футеровки, кг;

s – средняя стоимость одной тонны огнеупорного материала, тнг.

$$S = 5,606 \cdot 150000 = 840900 \text{ тнг.}$$

Годовая экономия денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки:

$$\mathcal{E}_1 = S \cdot \Delta T. \quad (3.9)$$

$$\mathcal{E}_1 = 840900 \cdot 11,4 = 9586260 \text{ тнг.}$$

При разогреве сталеразливочных ковшей после капитального (продолжительность 24 часа) и промежуточного (продолжительность 24 часа) ремонтов, с учётом расхода газа ($10 \text{ м}^3/\text{ч}$) полный расход газа на разогрев составит:

$$q = (\tau_1 + \tau_2) \cdot q_1, \quad (3.10)$$

где τ_1, τ_2 – время разогрева стальной ковша после капитального и промежуточного ремонта соответственно, ч;

q_1 – расход газа на разогрев ковшей, $\text{м}^3/\text{ч}$.

$$q = (24 + 24) \cdot 10 = 480 \text{ м}^3$$

Расход газа, с учётом повышения стойкости футеровки:

$$q = 480 \cdot 0,32 = 153,6 \text{ м}^3.$$

Годовой расход газа на разогрев сталеразливочных ковшей:

$$Q = q \cdot T' \quad (3.11)$$

$$Q = 153,6 \cdot 228,6 = 35112,96 \text{ м}^3.$$

С учётом закупочной стоимости газа для предприятия ($s_2 = 34$ тнг/м³) получаем экономию средств на разогрев ковшей после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева:

$$\mathcal{E}_2 = Q \cdot s_2. \quad (3.12)$$

$$\mathcal{E}_2 = 35112,96 \cdot 34 = 1193840,64 \text{ тнг.}$$

Годовая экономическая эффективность внедрения составила:

$$\mathcal{E}_\Sigma = 9586260 + 1193840,64 = 10780100,64 \text{ тнг.}$$

Разработанные режимы нагрева футеровки сталеразливочных ковшей позволяют производить разогрев оборудования до необходимой температуры. Возникающие при этом термические напряжения не превышают предел прочности, что приводит к увеличению стойкости футеровки на 5 %

Выводы:

1) Повышение точности расчёта термонапряжённого состояния кладки требует получения тепломеханических характеристик огнеупорных материалов при их рабочих температурах, для чего можно использовать стенд по измерению предела прочности огнеупорных материалов при повышенных температурах. Значение предела прочности на сжатие в интервале температур 150 – 300 °С увеличивается на 18 – 28 %, что даёт дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энергоресурсов на разогрев.

2) Расчёт температурных напряжений при существующих на предприятии скоростях показал, что максимальное значение напряжения сжатия в течение процесса разогрева больше допустимого в 3,89 раза, а напряжения растяжения – в 3,4 раза.

3) При разработке рациональных графиков разогрева средняя скорость повышения температуры на участках от 18 до 500 °С (не содержащих участки сушки), составила ~ 90 °С/ч. Общее время разогрева до температуры 938 °С составляет 16 часов 20 минут.

4) Экономическая эффективность при внедрении данных разработок, состоящая из экономии денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки и экономии средств на разогрев ковшей после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева, будет составлять более 10 млн. тнг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В магистерской работе выполнен анализ условий эксплуатации футеровок высокотемпературных агрегатов, а также используемых в промышленности огнеупоров и условий их эксплуатации.

2. По данным значений температур на внутренней поверхности стальной ковша рассчитаны температуры по сечению рабочего слоя и термические напряжения. Показано, что значения термических напряжений превышают предел прочности для используемых огнеупорных материалов.

3. Проведено экспериментальное исследование зависимости предела прочности на сжатие огнеупорных материалов от температуры. Проведённые исследования позволяют сделать вывод, что значение предела прочности на сжатие в интервале температур 150 – 300 °С увеличивается на 18 – 28 %, что даёт дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энергоресурсов на разогрев.

4. Разработаны графики разогрева стальной ковшеи после капитального ремонта при соблюдении условий: возникающие термические напряжения не превышают предел прочности периклазоуглеродистых огнеупоров; затраты времени на разогрев ковшеи минимальны. При разработке рациональных графиков разогрева средняя скорость повышения температуры на участках от 18 до 500 °С (не содержащих участки сушки), составила ~ 90 °С/ч. Общее время разогрева до температуры 938 °С составляет 16 часов 20 минут.

5. Экономическая эффективность при внедрении данных разработок, состоящая из экономии денежных средств на закупку огнеупорного материала в связи с увеличением стойкости футеровки и экономии средств на разогрев ковшеи после ремонтов, в связи с уменьшением времени разогрева, будет составлять более 10 млн. тнг.

Список использованных источников

- 1 Антипин В.Г., Чухаль П.А., Вяткин Ю.Ф. Служба огнеупоров в сталеплавильных агрегатах // Сталь. 1991. №8. с. 21 – 27.
- 2 Кузнецов А.Т., Кокушкин И.В., Сенявин Н.К., Шершнёв А.А. Напряжённо – деформированное состояние и разрушение огнеупоров при тепловом воздействии // Огнеупоры. 1987. №2. с. 52 – 56.
- 3 Хорошавин Л.Б. Современные тенденции развития производства и применения огнеупоров. Сайт: <http://urm.ru/ru/186>
- 4 Пат. 3713855 США. Кирпич с высоким содержанием MgO и улучшенными показателями по пределу прочности на разрыв при повышенной температуре /Elta Corp.; Jan. 30, 1973.
- 5 Пат. 3808014 США. Спеченный магнезитовый огнеупор /D. R. F. Spencer and D. C. Wooldridge.; Apr. 30, 1974.
- 6 Сайт:<http://www.magnezit.biz/ru/about/press/news/index.php?from4=2&id4=719>
- 7 Ярушина Т.В., Шатилов О.Ф., Коптелов В.Н. Новые углеродсодержащие огнеупоры ОАО «Комбинат Магнезит» для футеровки сталеразливочных ковшей // Новые огнеупоры. 2003. №1. с. 14 – 19.
- 8 Глинков М.А., Глинков Г.М. Общая теория печей. М.: Металлургия, 1978. – 264с.
- 9 Стрелов К.К., Кашеев И.Д., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. М.: Металлургия, 1988. – 528с.
- 10 Казанцев Е.И. Промышленные печи. М.: Металлургия, 1975. – 366с.
- 11 Волкова О. и Янке Д. Моделирование температурных полей в сталеразливочных ковшах с футеровкой из доломитовых кирпичей или высокоглиноземистой массы // Чёрные металлы. 2003. №2. с. 26 – 31.
- 12 Приходько Е.В. Повышение эффективности работы теплоиспользующих установок за счёт новых технологий сушки и разогрева футеровки. Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. / Омский гос. тех. университет, - Омск, 2006.
- 13 Журков С.Н. Изучение разрушения полимеров методом ЭПР. ДАН СССР, 1964. №2. с. 103.
- 14 Стрелов К.К., Мамыкин П.С. Технология огнеупоров. М.: Металлургия, 1978. – 376 с.
- 15 Гогоци Г.А. К вопросу о термостойкости гетерогенной керамики и огнеупоров // Огнеупоры. 1993. №11. с. 2 – 8.
- 16 Никифоров А.С. Оценка термонапряжённого состояния футеровки металлургических печей // Доклады Национальной Академии наук Республики Казахстан. – 2003, №6. – С.103-107.

- 17 Девятков С.А., Карасёв А.В., Степанова Е.П. Основные физические и математические модели в расчётах на прочность. Омск: Изд – во ОмГТУ, 2004. – 67с.
- 18 Никифоров А.С. Надежность работы футеровок металлургических печей // г. Павлодар 2003. с.16-17
- 19 Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. – 239с.
- 20 Демидович Б.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Физматгиз, 1963. – 660с.
- 21 Кузнецов Г.И., Кортель А.А., Борисов В.Г., Аксерольд Л.М., Пивинский Ю.Е. Новые виды огнеупоров для чёрной металлургии // Огнеупоры. 1992. №1. с. 32 – 36.
- 22 Приходько Е.В., Никифоров А.С., Шанов И.В. Инновационный патент № 21807 РК. Способ термомеханических испытаний материалов и устройство для его осуществления, опубл. 15.10.2009, бюл. № 10. – 4с.: ил.
- 23 Стрелов К.К. Структура и свойства огнеупоров. М.: Металлургия, 1982. – 208с.

Приложение Б

	Тсг7	Тсг6	Тсг5	Тсг4	Тсг3	Тсг2	Тсг1	тсг i
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0:00	25	25	25	25	25	25	25	25
0:10	60	57.37	39.99	31.98	28.34	26.79	26.36	38.20
0:20	100	85.89	64.36	48.69	39.09	34.11	32.59	56.35
0:30	160	138.93	98.44	73.40	57.72.	49.07	46.30	86.90
1:00	345	394.84	236.19	189.67	157.66	139.04	132.93	208.88
1:10	347	299.09	260.33	224.52	196.00	178.04	171.95	235.46
1:20	350	314.90	277.55	248.00	225.85	211.78	206.9	259.03
2:00	365	347.37	329.36	314.91	303.84	296.99	294.53	320.14
2:10	366	350.86	337.29	325.13	315.96	310.25	308.31	329.21
2:20	367	355.03	343.12	333.43	325.95	321.24	319.65	336.87
3:00	371	365.25	359.54	354.85	351.26	349.04	348.28	356.53
3:10	373	368.03	362.76	358.47	355.36	353.43	352.78	360.10
3:20	375	370.46	365.74	361.91	359.05	357.31	356.73	363.9
4:00	385	381.45	377.27	374.03	371.74	370.38	369.92	375.35
4:10	388	384.38	380.24	377.01	374.70	373.31	372.85	378.31
4:20	390	386.47	382.78	379.77	377.56	376.22	375.77	380.90
5:00	400	396.69	393.20	390.36	388.29	387.03	386.61	391.44
5:10	580	563.61	471.75	428.31	407.84	398.77	396.20	461.01
5:20	650	585.40	539.91	488.58	451.97	431.54	425.05	504.50
6:00	735	692.59	656.86	621.75	596.85	581.76	576.66	633.53
6:10	750	716.60	676.53	648.13	626.1	612.31	607.71	659.50
6:20	770	736.63	702.47	672.84	652.39	640.00	635.82	684.08
7:00	800	780.44	762.31	746.09	734.28	726.91	724.41	751.74
7:10	804	787.93	771.12	757.91	747.68	741.37	739.24	762.76
7:20	808	793.75	779.89	767.91	759.21	753.79	751.95	772.22
8:00	827	817.69	807.95	798.90	794.11	790.56	789.37	802.95
8:10	829	820.69	812.71	806.01	800.86	797.69	796.61	808.35
8:20	830	823.11	816.31	810.77	800.86	797.69	796.61	808.35
9:00	840	835,55	830,34	826,35	823,49	821,74	821,16	827,97
9:10	844	839,48	834,19	830,08	827,17	825,44	824,87	831,75
9:20	848	843,40	838,04	833,90	830,95	829,18	828,59	835,58
10:00	870	864,14	857,46	852,22	848,45	846,24	845,50	854,32
10:10	873	867,32	861,45	856,64	853,10	850,93	850,21	858,44
10:20	876	870,86	865,12	860,63	857,35	855,35	854,68	862,39
11:00	890	885,46	880,06	875,92	872,99	871,24	870,66	877,62
11:10	892	887,49	883,11	879,38	876,61	874,91	874,34	880,72
11:20	893	889,18	885,31	882,12	879,77	878,28	877,78	883,30
12:00	900	897,34	894,09	891,66	889,93	888,88	888,53	892,67
12:10	904	901,10	897,14	894,27	892,33	891,20	890,83	895,56

12:20	908	904,60	900,45	897,29	895,09	893,90	893,37	898,67
13:00	925	920,58	915,49	911,48	908,66	906,98	906,42	913,10
13:10	926	921,77	917,96	914,62	912,05	910,46	909,92	915,74
13:20	927	923,60	919,94	917,05	914,90	913,56	913,10	918,15
14:00	930	928,01	925,77	924,07	922,79	922,01	921,74	924,73
14:10	931	929,10	927,14	925,50	924,32	923,60	923,36	926,11
14:20	931	929,35	927,92	926,65	925,65	925,02	924,81	927,06

Продолжение Приложения Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15:00	933	934,99	930,46	929,46	928,76	928,32	928,18	929,93
15:10	933	931,84	931,11	930,25	929,60	929,20	929,07	930,48
15:20	933	932,26	931,37	930,76	930,28	929,96	929,85	931,01
16:00								
17:00	934	933,85	933,28	932,99	932,85	932,77	932,75	933,19
17:10	934	933,62	933,52	933,28	933,09	932,98	932,94	933,31
17:20	935	934,76	933,97	933,59	933,37	933,24	933,20	934,85
18:00	938	937,26	936,41	935,73	935,26	934,99	934,91	936,01
18:10	938	937,30	936,75	936,23	935,82	935,86	935,47	936,39
18:20	938	937,49	936,97	936,56	936,24	936,04	935,97	936,71
19:00								

Приложение В

	Тст7	Тст6	Тст5	Тст4	Тст3	Тст2	Тст1	тст i
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0:00	25	25	25	25	25	25	25	25
0:10	40	38,87	31,42	27,99	26,43	25,76	25,58	30,65
0:20	55	49,11	40,95	34,72	30,83	28,79	28,17	37,62
0:30	70	62,45	50,52	42,64	37,37	34,33	33,34	46,49
0:40	85	74,88	61,93	52,05	45,45	41,68	40,45	56,37
0:50	100	88,55	73,50	62,59	54,99	50,54	49,07	67,38
1:00	115	102,04	86,12	73,94	65,55	60,61	58,98	79,09
1:10	130	116,10	98,95	86,08	77,01	71,65	69,87	91,50
1:20	130	116,29	105,96	95,72	87,72	82,70	80,99	98,73
1:30	130	120,42	110,05	102,15	96,11	92,11	90,76	105,09
1:40	145	135,37	120,88	110,70	104,08	100,29	99,05	115,52
1:50	160	147,75	133,12	121,82	113,91	109,32	107,82	126,53
2:00	175	162,06	145,45	133,22	124,72	119,67	117,99	138,31
2:10	190	175,73	158,68	145,51	136,30	130,88	129,09	150,97
2:20	205	190,10	171,98	158,28	148,61	142,85	140,94	164,00
2:30	220	204,34	185,81	171,50	161,41	155,42	153,43	177,38
2:40	233	217,03	198,88	184,67	174,78	168,35	166,32	190,35
2:50	258	242,43	224,24	210,19	200,18	194,18	192,18	215,90
3:00	270	254,35	236,78	222,91	212,95	206,96	204,97	228,41
3:10	283	367,63	249,48	235,56	225,65	219,70	217,71	241,25
3:20	295	279,43	262,02	248,21	238,32	232,38	230,40	253,68
3:30	308	292,73	274,63	260,81	250,95	245,03	243,05	266,47
3:40	320	304,49	287,17	273,41	263,56	257,65	255,68	278,85
3:50	333	317,80	299,74	285,97	276,14	270,24	268,28	291,62
4:00	345	329,53	312,27	298,53	288,71	282,82	280,86	303,96
4:10	354	339,14	323,09	310,28	300,89	295,18	293,26	315,20
4:20	359	345,35	331,79	320,42	311,97	306,77	305,01	324,54
4:30	362	350,28	338,57	328,89	321,60	317,07	315,54	332,38
4:40	365	354,88	344,65	336,18	329,88	325,98	324,66	339,27
4:50	366	357,30	349,23	342,27	336,94	333,61	332,49	344,64
5:00	369	361,80	353,80	347,55	342,96	340,12	339,16	349,98
5:10	370	363,36	357,51	352,23	348,22	345,75	344,91	353,99
5:20	371	365,77	360,27	355,93	352,63	350,56	349,85	357,54

5:30	373	369,39	364,95	361,72	359,35	357,89	357,39	363,06
5:40	375	371,31	367,67	364,52	362,25	360,89	360,41	365,67
5:50	378	374,66	370,38	367,31	365,10	363,76	363,32	368,62
6:00	380	376,47	373,03	370,63	367,87	366,57	366,14	371,12
6:10	382	378,90	375,24	372,51	370,50	369,27	368,85	373,61
6:20	385	382,67	378,94	376,55	374,89	373,90	373,57	377,71
6:30	388	384,98	381,80	379,08	377,21	376,13	375,77	380,14
6:40	390	387,17	383,88	381,43	379,60	378,48	378,11	382,41
6:50	392	389,19	386,13	383,62	381,86	380,80	380,45	384,60
7:00	395	392,23	388,63	386,03	384,18	383,10	382,73	387,15
7:10	398	394,94	391,40	388,60	386,66	385,50	385,12	389,74
7:20	400	396,96	393,67	391,06	389,14	387,97	387,59	392,07
7:30	415	411,16	401,45	395,92	392,74	391,06	390,53	399,25
7:40	430	422,09	411,88	404,01	398,85	396,01	395,11	407,50
7:50	445	435,74	422,31	413,06	406,75	403,07	401,86	417,36

Продолжение Приложения В

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8:00	460	448,56	434,31	423,38	415,95	411,65	410,24	428,06
8:10	475	462,46	446,42	434,63	426,37	421,50	419,89	439,71
8:20	487	473,40	458,15	445,97	437,35	432,21	430,50	450,82
8:30	500	486,5	469,84	457,42	448,60	443,33	441,58	462,64