

На правах рукописи

ВЕРНИГОРА АНТОН СЕРГЕЕВИЧ

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ
ПЛАВКИ МЕДНОГО СУЛЬФИДНОГО СЫРЬЯ В ПЕЧИ ВАНЮКОВА
НА ИЗНОС ОГНЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ КЕССОНОВ

Специальность: 05.16.02 - «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов»

Научный руководитель:

кандидат технических наук,
доцент

Комков
Алексей Александрович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук

Парецкий Валерий Михайлович

Кандидат технических наук

Баласанов Андрей Владимирович

Ведущая организация:

ОАО «ГМК «Норильский Никель»

Защита диссертации состоится «14» октября 2009 г. в 16¹⁵, в аудитории К-212 на заседании диссертационного совета Д.212.132.05 при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов» по адресу: 119991, г. Москва, Крымский вал, д.3.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке МИСиС.

Автореферат разослан «___» сентября 2009г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Лобова Т.А.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время, в металлургии меди и никеля при переработке сульфидных концентратов наибольшее распространение получили автогенные процессы плавки, использующие тепло от окисления сульфидов. Применение автогенных процессов позволяет снизить расходы топлива, повысить комплексность использования сырья, в значительной мере сократить количество вредных выбросов.

Среди автогенных процессов наиболее производительными являются процессы барботажного типа, в которых окислительное дутье подается непосредственно в расплав. Однако, в условиях интенсивного перемешивания расплава в значительной мере интенсифицируются процессы химического, теплового и механического воздействия внутрипечной среды на стены плавильной печи.

Одним из эффективных способов увеличения сроков службы агрегатов для барботажных процессов является применение в ограждающей конструкции печи охлаждаемых элементов - кессонов. Наиболее широко кессоны применяют в печах Ванюкова (ПВ). Во многом поэтому, срок службы печей Ванюкова между капитальными ремонтами, при прочих равных условиях, выше, чем печей, футерованных огнеупорным кирпичом.

Длительность кампании барботажного автогенного агрегата определяется, прежде всего, сроком службы кессонов, огневая поверхность которых в процессе работы печи постепенно изнашивается. При этом, степень износа поверхности кессонов существенно различается в зависимости от условий работы печи, месторасположения кессона в печи и ряда других факторов.

Однако до сих пор не проводилось комплексных, систематизированных исследований процессов взаимодействия поверхности медных водоохлаждаемых элементов, контактирующих с расплавом при плавке сульфидного сырья. В связи с этим, задача исследования механизма и закономерностей физико-химического воздействия внутрипечной высокотемпературной газо-жидкостной среды на огневую поверхность медных кессонов в печи Ванюкова является весьма актуальной.

Цель работы

Цель работы заключается в определении типов воздействия активно перемешиваемого шлакового расплава на водоохлаждаемые элементы, ведущие к их разрушению. Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

- провести исследования по анализу основных показателей и условий работы промышленной печи Ванюкова;
- исследовать распределение тепловых нагрузок на элементы боковых стен печи Ванюкова;
- определить основные типы разрушения водоохлаждаемых элементов печи Ванюкова;
- разработать математическую модель распределения температур внутри тела кессона при различных режимах плавки и исследовать влияние дефектов изготовления на эффективность охлаждения кессона;
- провести исследования состава и структуры рабочей поверхности водоохлаждаемого элемента, различных отложений, присутствующих на рабочей поверхности, и шлакового гарнисажа;
- исследовать термодинамическую вероятность протекания взаимодействия газовой среды с рабочей поверхностью кессона;
- провести лабораторные исследования по образованию соединений меди в атмосферах, близких к внутрипечной атмосфере печи Ванюкова.

Методы исследования

В работе использованы следующие методы исследования: электронная микроскопия (электронный микроскоп “JEOL” JSM-6480LV с приставкой для энергодисперсионного рентгеновского микроанализа фирмы Inca); спектральный эмиссионный метод (масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) SPECTRO CI ROS V ISION); термогравиметрия, приборы неразрушающего промышленного контроля (оптический пирометр Raytek Ranger 3i, ультразвуковой расходомер жидкости GE Panametrics PT878), а также методы математического моделирования.

Научная новизна работы

Установлены закономерности распределения тепловых нагрузок на водоохлаждаемые элементы печи Ванюкова, в зависимости от режимов плавки и местоположения элемента в печи, позволяющие усовершенствовать ее конструкцию и увеличить срок эксплуатации

Разработана математическая модель тепловой работы кессона, позволяющая спрогнозировать распределение температур внутри тела кессона при различных режимах плавки.

Разработана модель теплового удара, позволяющая прогнозировать динамику изменения температур в теле кессона и скорость образования гарнисажа при наплескивании жидкого горячего шлака на огневую поверхность водоохлаждаемого медного кессона.

Установлено, что при качественном исполнении кессона чисто тепловое разрушение огневой поверхности кессона в ПВ условиях плавки на штейн маловероятно.

Установлено, что прилегающие к огневой поверхности кессонов слои твердых отложений значительно обогащены медью, серой и кислородом, что принципиально важно для понимания механизмов образования отложений и разрушения огневой поверхности кессонов в ПВ при плавке медного сульфидного сырья.

Впервые установлено, что одним из наиболее вероятных механизмов разрушения огневой поверхности медных кессонов ПВ при плавке медного сульфидного сырья является химическая коррозия.

Получены данные по термодинамике и скорости взаимодействия газовой серосодержащей атмосферы с медью при низких температурах, характерных для огневой поверхности кессонов.

Практическая значимость работы

В работе впервые предпринята попытка комплексного исследования причин разрушения кессонов, начиная с изучения стабильности технологических режимов плавки и причин их нарушения, и заканчивая тепловым и химическим воздействием внутрипечной серы на поверхность кессона.

По результатам проведенной работы были выданы практические рекомендации по стабилизации режимов плавки, необходимости реконструкции системы загрузки шихты с перераспределением дутья по длине печи и др. Рекомендации были использованы на ОАО «СУМЗ» в планах реконструкции отделения подготовки сырья и шихты с целью ее совершенствования, необходимой для стабилизации режимов плавки. Данные по распределению тепловых потоков по боковым стенам ПВ-1 ОАО «СУМЗ» были приняты

к сведению специалистами завода и использованы для совершенствования режимов плавки печи Ванюкова.

По результатам исследования была разработана методика по оценке эффективности охлаждения водоохлаждаемых элементов печи Ванюкова во время предпускового разогрева, позволяющая увеличить надежность и продлить срок службы агрегата. Методика зарегистрирована в виде ноу-хау

Апробация работы

Основные положения и результаты доложены на российских и международных конференциях: Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи "НТТМ – 2007", г. Москва (2007 г.); 61, 62, 63 научная конференция студентов МИСиС, г. Москва (2006 – 2008 гг.); Международная научно-практическая конференция "Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы", г. Москва (2009 г.).

Публикации

По результатам работы опубликованы две статьи в рецензируемом журналах, три тезиса докладов в материалах научных конференций.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов и списка литературы. Диссертация изложена на 157 страницах, содержит 24 таблицы, 70 рисунков, список литературы из 63 наименований.

Основное содержание работы

Во введении отмечена актуальность исследования причин и механизмов разрушения водоохлаждаемых элементов барботажных пирометаллургических агрегатов.

В первой главе представлен аналитический обзор по теме исследований, в котором рассмотрено развитие применения водоохлаждаемых элементов в конструкциях металлургических агрегатов; конструкции кессонов, используемых на различных предприятиях; обзор исследований тепловой работы печей Ванюкова; обзор исследований, связанных с возможностью химической коррозии меди в окислительно-сульфидирующей атмосфере; а также обзор общих методов и конкретных работ по математическому моделированию физико-химического воздействия расплава на элементы конструкций металлургических печей.

Проведенный обзор показал, что проблема стойкости водоохлаждаемых элементов печей встала перед конструкторами металлургических агрегатов с повышением интенсивности процессов, протекающих в металлургических агрегатах. Впервые водоохлаждаемые кессоны, в качестве элементов конструкции металлургических печей, стали применяться в шахтных печах еще во второй половине XIX века. Позже, водоохлаждаемые элементы стали применять и в конструкции агрегатов других плавильных процессов, в частности, во фьюминговых печах, при электроплавке, кислородно-факельной и взвешенной плавках, в качестве закладных и прикладных

кессонов. Основной задачей таких кессонов является принудительное охлаждение футеровки для предотвращения ее преждевременного выхода из строя.

В современных высокоинтенсивных процессах плавки в расплаве (печь Ванюкова, процесс Ausmelt) также применяются водоохлаждаемые элементы. Однако, если в процессе Ausmelt кессоны являются закладными и расположены между огнеупорной футеровкой и внешним кожухом, в печи Ванюкова кессоны непосредственно контактируют с интенсивно перемешиваемым высокотемпературным расплавом.

Изучения взаимодействия материала кессонов в подобных напряженных условиях, а также причин их выхода из строя практически не проводилось. Исследования, были направлены на изучение тепловой работы печи Ванюкова. Были проведены замеры тепловых потоков на водоохлаждаемые элементы, и по ним построены регрессионные зависимости по распределению температуры расплава и газовой фазы по высоте шахты печи. Однако из этих расчетов не делалось никаких выводов о влиянии теплового воздействия со стороны расплава на разрушение материала кессонов.

Исследования возможности химической коррозии меди в окислительной атмосфере относятся, в основном, к коррозии меди в кислороде. Изучение взаимодействия меди с компонентами газовой среды в атмосфере SO_2 относится, в основном, к атмосферной коррозии, условия которой, конечно же, существенно отличаются от условий, устанавливаемых в печи.

В результате проведенного аналитического обзора было выявлено, что исследований влияния условий плавки сульфидного сырья в печи Ванюкова на износ водоохлаждаемых элементов не проводилось и имеющихся в литературе данных для систематизированного изучения типов взаимодействия внутрипечной среды с материалом водоохлаждаемых элементов не достаточно.

На основе проведенного анализа сформулированы основные задачи исследований настоящей работы.

Во второй главе проведен анализ конструкции, условий работы и результатов взаимодействия внутрипечной среды с материалом кессонов, а также основных режимов работы печи и их стабильности.

Стандартной для печи Ванюкова конструкцией кессона является плита размерами 1300x600x115 (ВхШхГ) с проложенным внутри змеевиком, конфигурация которого различается на разных предприятиях.

На сегодняшний день кессоны подобного типа изготавливаются методом литья – заполнением расплава меди формы изложницы с заранее установленной там трубкой змеевика. В качестве добавок, повышающей литейные свойства меди может использоваться несколько процентов фосфора, что может существенно сказаться на теплопроводности кессона. Так, содержание фосфора, равное 1% уменьшает коэффициент теплопроводности меди с, приблизительно 400 Вт/(м×К) до 100 Вт/(м×К).

Анализ результатов осмотра печей Ванюкова во время остановок, проведения капитальных ремонтов, а также фотоснимков кессонов показали, что все виды воздействия внутрипечной среды на рабочую поверхность кессонов можно разделить на следующие основные типы:

1. "Плавный размыв" поверхности кессона

Для данного типа износа характерно постепенное "сглаживание" резких неровностей на поверхности кессона, например, границ фрезеровочных проточек (канавок), наносимых на огневую поверхность кессонов при их изготовлении для удержания гарнисажа. К этому типу износа можно отнести также наблюдаемое иногда плавное уменьшение толщины некоторых кессонов к одному из краев или локальное (на некоторой ограниченной площади) плавное снижение толщины кессона. Виды износа данного типа схематично представлены на рисунке (Рисунок 1).

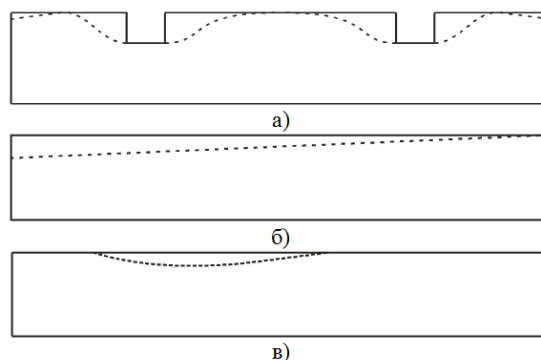


Рисунок 1. Схемы износа огневой поверхности кессонов по первому типу

2. Раковинообразный точечный разрыв меди

Данный тип износа связан с образованием на поверхности некоторых кессонов множества относительно небольших локальных углублений, похожих на раковины, в плоскости поверхности кессона имеющих сечение близкое к форме круга диаметром до 5-7 мм. Отличительной чертой данного типа износа является достаточно “случайный” и “массовый” характер расположения раковин, то есть, раковины встречаются на любых кессонах, вне зависимости от их места расположения в печи, а также времени работы кессона. Как правило, они образуются не в виде единичных, а множества, образующих поле раковин на поверхности кессона. Фотографии кессонов с износом по данному типу представлены на рисунке (Рисунок 2)

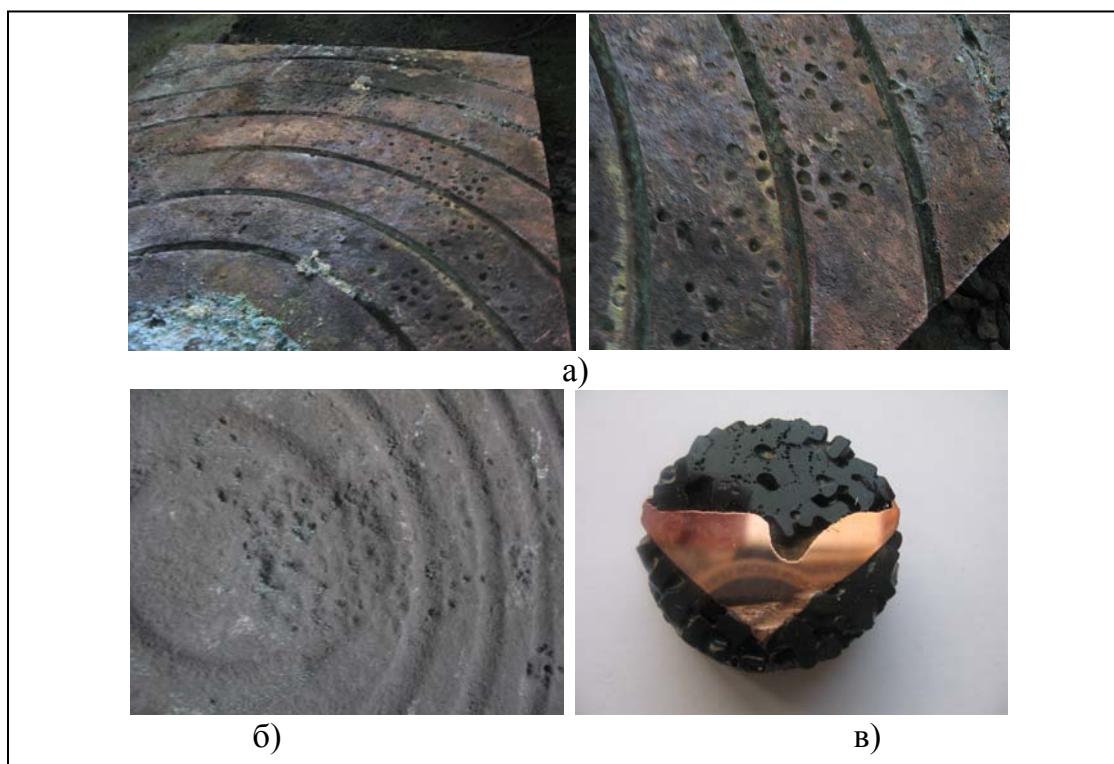


Рисунок 2. Раковинообразный износ поверхности кессонов:

а) кессон с малым сроком службы (около 2,5 месяцев) и относительно четкими краями раковин; б) кессон второго ряда после 2-х лет службы со сглаженными краями раковин; в) форма раковины (один из вариантов) в разрезе по оси (образец вырезан из тела кессона третьего ряда)

3. "Искривление" тела кессона

Наиболее часто данный дефект связан с загибанием краев кессона внутрь печи.

Основные режимы работы печи Ванюкова были исследованы на примере печи Ванюкова ОАО "СУМЗ". Печь имеет традиционную, для переработки медного сульфидного сырья конструкцию. Длина печи составляет 15 метров, ширина в области фурм - 2,4 метра, ширина печи под аптейком - 4 метра. В таблице приведены усредненные показатели основных режимов работы печи (Таблица 1):

Таблица 1. Показатели основных режимов работы печи Ванюкова на ОАО "СУМЗ"

Расход шихты		85-90 т/час				
Расход кислородно-воздушной смеси		15900 – 16000 м ³ /час				
Содержание кислорода в дутье		85%				
Расход природного газа		~1350 м ³ /час				
Энергия теплосъема (со всей печи)		~33,5 ГДж				
Температура штейна:		1170-1200 °С				
Температура шлака:		1250-1270 °С				
Состав шихты и продуктов плавки, % масс.	Компонент	Cu	S	Fe	SiO ₂	CaO
	Шихта	14	32,8	28,5	9,33	0,2
	Шлак	0,6	0,6	40,3	33,3	0,8
	Штейн	50	23,8	17	-	-
Состав отходящих газов	Компонент:	SO ₂		CO ₂		O ₂
	% объемн	42,3		7,9		2,77

Для изучения влияния параметров работы печи, были проведены исследования стабильности различных режимов плавки.

1. Тепловой режим.

Стабильность теплового режима плавки определяется качеством управления температурой расплава в печи. В настоящее время прямых измерений температуры расплава в печи Ванюкова ОАО СУМЗ не проводится. Управление тепловым режимом плавки производится по косвенному показателю – общему теплосъему с печи, а при стабильном расходе воды на охлаждение – по разности температур напорной и сливной воды (Δt). Надо отметить, что данный способ позволяет отслеживать динамику тепловой работы печи, но не дает абсолютной оценки температуры расплава, которая проводится практически визуально. Тем не менее, на сегодняшний день это единственный реально используемый способ поддержания стабильной тепловой работы печи. Пример по динамике общего теплосъема с печи в сентябре 2005 г. по данным рапортов системы контроля «Алконт» приведены на рисунке (Рисунок 3):

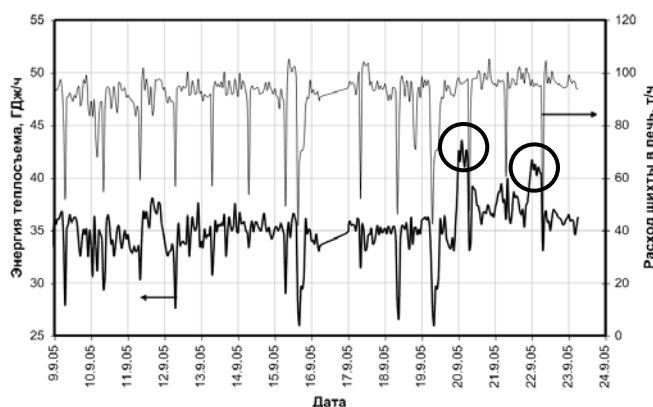
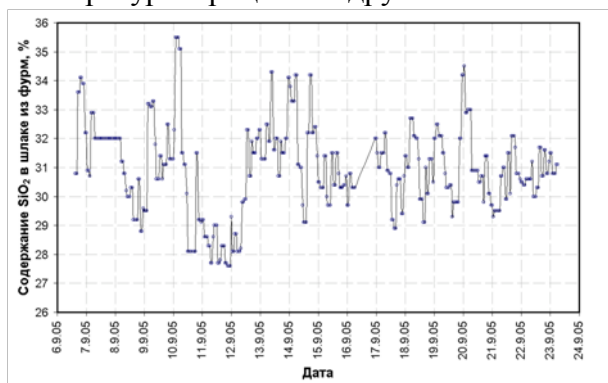


Рисунок 3. Изменение общего теплосъема и производительности печи в сентябре 2005 г.

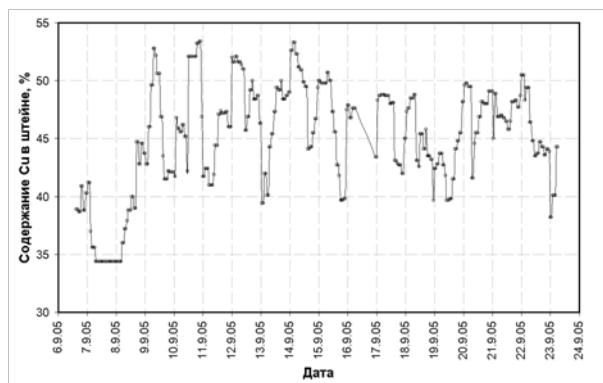
Из приведенных данных видно, что при среднем за рассматриваемый период значении теплосъема 35,08 ГДж/ч, в отдельные периоды наблюдаются как его падение, так и резкое повышение. Как видно из диаграммы, снижения теплосъема чаще всего связаны с понижением производительности печи во время ежедневных профилактических чисток узких мест котла-утилизатора. Однако, резкие возрастания теплосъема до 40-43 ГДж /ч (Δt поднималась до 9-9,7 градусов при среднем значении за весь период -7,8 °) 20 и 22 сентября не связаны с изменением производительности и очевидно обусловлены перегревом печи. Расчеты показывают, что изменение теплосъема с 35 до 43 ГДж/ч означает, что температура в печи в эти периоды поднималась более чем на 50 градусов, то есть до ~1330 °С (в усредненных режимах средняя расчетная температура составляет ~1275 °С), что довольно значительно. Как видно из представленных данных, подъемы теплосъема не были кратковременными – высокие значения теплосъема держались около смены. Перегрев печи ведет к ускоренному износу конструктивных элементов и, соответственно, к сокращению межремонтного срока эксплуатации агрегата.

2. Состав шлака и штейна

На рисунке, приведенном ниже, представлены данные по динамике изменения содержания кремнезема в шлаке и меди в штейне в сентябре 2005 г., показывающие, что составы расплавов по основным компонентам также колеблются в широких интервалах (Рисунок 4). Так, содержание меди в штейне изменяется от ~35% до 53%, а концентрация SiO_2 в шлаке от ~29% до 35,5%, причем изменения происходят достаточно резко. Подобная нестабильность составов продуктов плавки ведет к изменениям их физико-химических свойств. Колебания состава шлака ведут к изменению его вязкости, способности растворять ценные компоненты, а также к изменению состава гарнисажа, его физических и теплофизических свойств. Нестабильность состава штейна свидетельствует об изменениях материального и теплового балансов плавки, что ведет к колебаниям температуры процесса и другим изменениям.



а)



б)

Рисунок 4. Изменение содержания некоторых компонентов в конденсированных продуктах плавки в сентябре 2005 г. а) изменение содержание SiO_2 в шлаке (по пробам, взятым из фурм); б) Изменение содержание Cu в штейне

Проведенный анализ показывал, что используемая на ПВ СУМЗ система оперативного управления составами штейна и шлака даже при грамотных действиях операторов не обеспечит необходимой стабильности состав продуктов при резких и значительных изменениях входных параметров – состава и расхода отдельных компонентов шихты. Предварительный анализ показал, что расходы окислительного дутья и шихты в печь измеряются надежно и редко изменяются более чем на 5 %. Расчеты показывают, что подобные изменения приводят к изменению содержания меди в штейне не более чем на 3%. Расход природного газа измеряется достаточно надежно и самопроизвольные колебания его расхода также невелики. Важнейшей проблемой является надежность информации и стабильность состава шихты, загружаемой в печь.

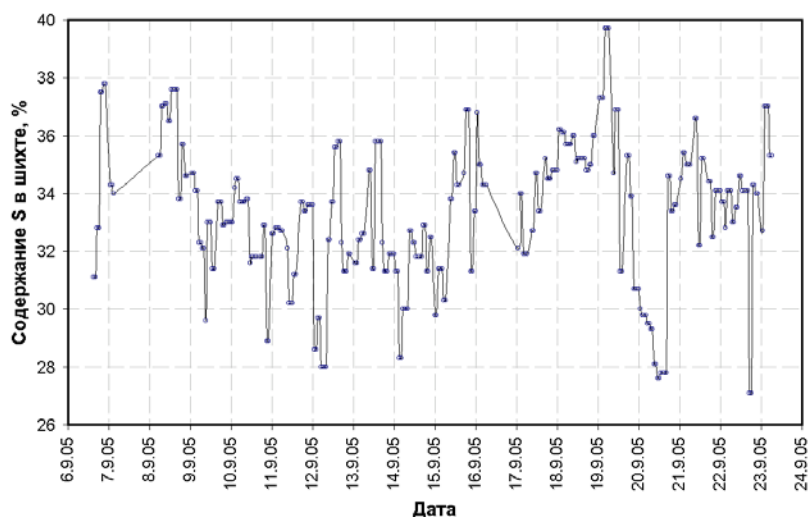


Рисунок 5. Изменение содержания серы в шихте в сентябре 2005 г.

На графике (Рисунок 5) приведены данные по динамике изменения содержания серы шихте, в значительной степени определяющее при прочих равных условиях содержание меди в штейне. Видно, что концентрация серы в шихте постоянно меняется, причём в течение 4-5 часов оно может измениться на 4-5 %, что приводит к значительным колебаниям содержания меди в штейне. Расчеты показывают, что при снижении концентрации серы в шихте на 4-5 %, при неизменности других входных параметров, содержание меди в штейне может увеличиться более чем на 15 %. Анализ также показал, что и содержание других важнейших для режимов плавки компонентов (Cu, Fe, SiO₂), часто изменялось на несколько процентов всего за 1-3 часа. Это практически сводит к нулю (при существующей системе управления составом штейна) усилия операторов по регулированию составов штейна и шлака и в значительной степени снижает качество регулирования теплового режима плавки.

Расчеты, проведенные с использованием компьютерной модели ПВ СУМЗ, показали, что изменения долей сульфидных концентратов и кварца в шихте ОПСиШ при постоянстве расходов дутья, кварцевого флюса из бункеров и топлива, приводят к колебаниям содержания меди в штейне в пределах ~12 % и содержания SiO₂ в шлаке в пределах ~8 %. Приведенные данные показывают, что, за небольшим исключением, основная часть анализируемых практических данных по составу штейна укладывается в 15–процентный диапазон от 39 до 54 %. Это в целом согласуется с полученной оценкой диапазона колебаний по составу штейна. Содержание кремнезема в шлаке, в основном, укладывается в 4–процентный диапазон от 30 до 34 %, что в 2 раза меньше расчетной оценки диапазона изменения данного параметра. Последнее свидетельствует о том, что в отличие от состава штейна, составом шлака операторы реально управляют (с использованием отбора проб из фурм), снижая возможные колебания содержания в нем кремнезема из-за нестабильности состава шихты. Требование стабильности состава исходных материалов является общим и естественным (для обеспечения стабильности технологических режимов) для всех современных металлургических процессов. Для повышения ТЭП процесса Ванюкова и всего металлургического передела это требование должно выполняться и для ПВ.

В третьей главе проанализированы тепловые нагрузки на водоохлаждаемые элементы печи Ванюкова, их зависимость от места расположения кессона в печи и режимов плавки, а также исследовано влияние тепловых нагрузок и условий охлаждения на распределение температур в теле кессона.

Величина теплосъема кессонами полностью определяется количеством тепла, которое передается от расплава поверхности гарнисажа. Величина теплосъема кессонами

зависит не только от температуры расплава, но и от температуры плавления гарнисажа (состава гарнисажа), условий теплообмена на границе расплав – гарнисаж (последние зависят от свойств расплава и условий обтекания им поверхности гарнисажа, то есть, от интенсивности перемешивания расплава в печи, свойств жидкого шлака) и не зависит от режимов охлаждения кессона.

Одной из возможных причин разрушения огневой поверхности кессонов в ПВ является тепловое воздействие со стороны жидкого шлака. Определение конкретных параметров этого воздействия в различных зонах печи весьма важно для понимания механизма и причин разрушения кессонов, а значит, и для выработки мер, снижающих скорость разрушения поверхности кессонов, увеличения сроков их службы. С этой целью были проведены серии измерений значений тепловых нагрузок на кессоны печи Ванюкова ОАО "СУМЗ". Особенностью условий эксплуатации ПВ СУМЗ является неравномерность распределения дутья по длине печи. В постоянной работе лишь часть фурм, расположенных ближе к штейновому сифону.

Ниже (Рисунок 6) приведена принципиальная схема расположения кессонов и фурм боковой стены ПВ СУМЗ с указанием уровня расплава во время работы печи, указание нахождения загрузочных течек, а также фурм, постоянно находящихся в работе (серым цветом). Овалами обозначены наклонные фурмы, включаемые только во время остановок и разогрева.

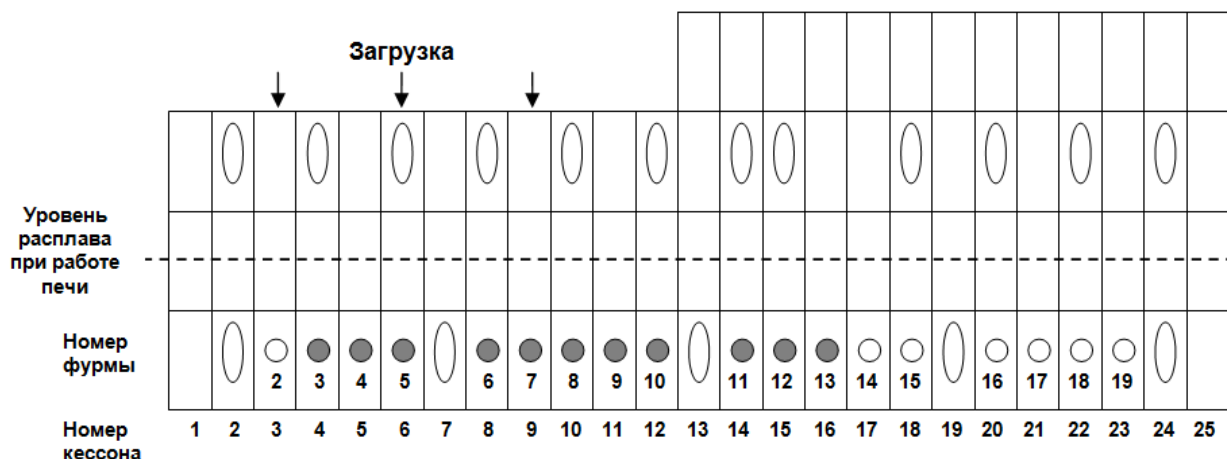


Рисунок 6. Схема расположения кессонов боковой стены ПВ «СУМЗ»

Основными показателями тепловой работы кессона являются тепловой поток на кессон и температура внешней стенки. Удельный тепловой поток на кессон или группу кессонов рассчитывался из расхода воды, подаваемой на охлаждение элемента (замеры проводились ультразвуковым расходомером жидкости GE Panametrics PT878), а также разности температур воды на входе и выходе с него (измерялась термометром). Температура внешней стенки кессонов измерялась с помощью инфракрасного пирометра Raytek Ranger 3i.

Полученные результаты позволили судить о распределении тепловых нагрузок по длине печи. На графике (Рисунок 7), показано изменение среднего теплового потока приходящегося на группу кессонов, расположенных в одном вертикальном ряду.

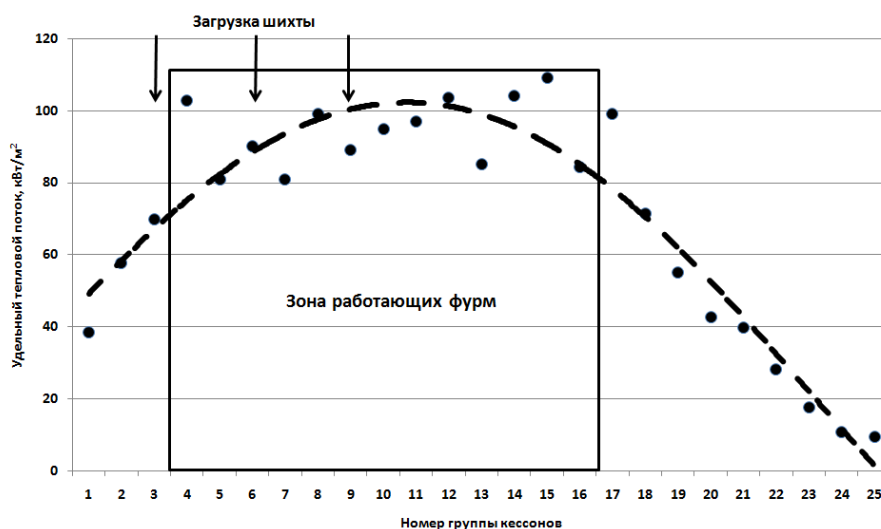


Рисунок 7. Изменение удельного теплового потока по длине ПВ СУМЗ

Как видно из рисунка, кессоны разных групп испытывают существенно разные тепловые нагрузки. Средние тепловые нагрузки, приходящиеся на группу кессонов повышаются от 40-70 кВт/м², для кессонов с первой по третью группу, до 80-110 кВт/м², для кессонов групп 4-17, а затем, начиная с кессонов 18-й группы постепенно снижаются до уровня 10-15 кВт/м², приходящего на самые последние группы кессонов. Причины такого распределения тепловых нагрузок понятны – это неравномерное распределение дутья по длине печи. Дутье подается, примерно, только в первые 2/3 части печи, в область загрузки шихты. В этой области отмечаются наиболее высокие тепловые потоки на кессоны. Неравномерность распределения дутья по длине печи ведет к неравным условиям эксплуатации кессонов – более жесткие условия в области большей интенсивности дутья, т.е. под загрузкой. Расчеты показывают, что при относительно невысокой средней по печи газовой нагрузке 550-650 м³/(м²·ч), интенсивность дутья в области загрузки составляет примерно 800-1000 м³/(м²·ч), что соответствует уровню плавки с более высокой производительностью (печи Ванюкова Медного завода Заполярного филиала ОАО «ГМК «Норильский никель» при интенсивности дутья 800-1000 м³/(м²·ч) плавят на ~30 % больше). Именно здесь следует ожидать и наиболее быстрого износа кессонов.

Также были проведены исследования распределения тепловых нагрузок по длине печи, по каждому из рядов кессонов. Результаты измерений и аппроксимирующие кривые приведены на графике (Рисунок 8)

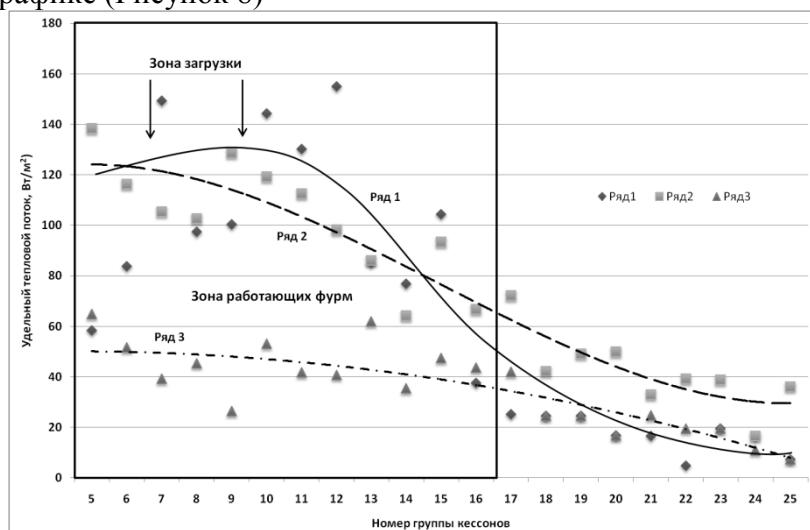


Рисунок 8. Удельные тепловые нагрузки на различные ряды кессонов ПВ СУМЗ

Из проведенных измерений следует, что наименьшие тепловые нагрузки приходятся на кессоны третьего ряда ($10 - 45 \text{ кВт/м}^2$) и, среди все рядов, они наиболее равномерно распределены по длине печи, постепенно уменьшаясь от первого кессона до двадцать пятого. Удельные тепловые нагрузки на кессоны первого и второго рядов приблизительно равны в зоне работающих фурм и составляют $100 - 140 \text{ кВт/м}^2$. При этом, уменьшение тепловых нагрузок на кессоны первого ряда к концу печи происходит быстрее, и уменьшаются они до более низких значений ($20-25 \text{ кВт/м}^2$), по сравнению с третьим рядом (40 кВт/м^2).

Для комплексного изучения тепловой работы кессонов боковых стен были проведены измерения температур внешних стенок для обеих сторон печи. Таким образом, можно определить неравномерность тепловой нагрузки по телу отдельного элемента. Измерения проводились в трех областях: снизу, посередине и сверху каждого кессона. Результаты измерений для кессонов приведены на графике (Рисунок 9).

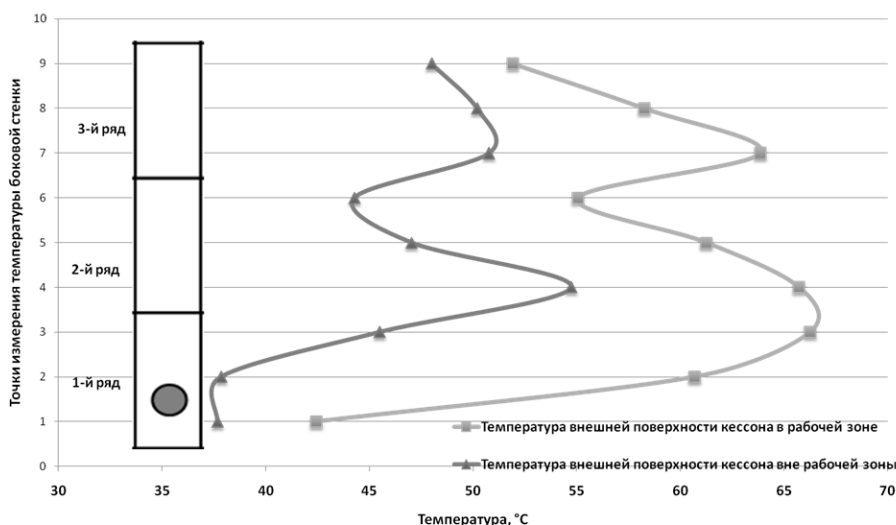


Рисунок 9. Изменение температуры внешней поверхности кессона по высоте стенки печи.

Рассматривая различие температур внешней стенки по длине, как и в случае с тепловыми нагрузками, наблюдается некоторое уменьшение температуры в зоне от 18 до 25 кессона. Средняя температура поверхности кессона в группах 1-18 составляет, примерно 58°C , в группах 19-25 — 46°C . Уменьшение температуры внешней стенки к шлаковой части печи выражено не так сильно, как изменение теплового потока на кессоны и приблизительно одинакова для всех трех рядов.

На рисунке (Рисунок 9) приведен график, на котором показано изменение температуры внешней поверхности кессона по высоте печи. Пунктирной линией показана усредненная температура по всем группам обеих сторон печи. Графики усредненной зависимости температуры всех групп и групп кессонов с первого по восемнадцатый имеют следующий одинаковый характер: наиболее низкая температура находится в нижней части кессона первого ряда (около 42°C) и начинает расти при увеличении высоты до своего максимума на верхней части нижнего кессона ($\approx 63^\circ\text{C}$). В этой области, а также в нижней части кессона второго ряда температуры по всей высоте стенки максимальны. С ростом высоты, температура по внешней поверхности кессона второго ряда постепенно снижается до $53-55^\circ\text{C}$. Затем, с началом кессона третьего ряда происходит резкий скачок до $61-65^\circ\text{C}$, после чего, с увеличением высоты температура снижается до, приблизительно, 53°C .

Наиболее низкая температура в нижней части кессона первого ряда, что, очевидно, обусловлено тем, что она расположена ниже уровня фурм, и в этой зоне интенсивность движения расплава вблизи поверхности гарнисажа и, соответственно, эффективная

теплоотдача от расплава к гарнисажу резко снижаются. Область верхней части кессона первого ряда и нижней части второго ряда, наоборот, находится в зоне с наиболее интенсивным движением расплава. Также в этой же зоне максимальное локальное тепловыделение за счет протекания экзотермических окислительных реакций. Середина кессона второго ряда, которая находится на границе расплава и газовой фазы, подвергается интенсивному омыванию расплавом также имеет высокую температуру внешней поверхности. Температура внешней поверхности кессонов третьего ряда в среднем ниже, чем второго, но отличия не столь заметные, как различия в тепловых потоках. Наблюдается резкий скачок температуры от верхней части кессона второго ряда к кессону третьего ряда с последующим ее снижением. Следует отметить, что на температуре внешней поверхности кессона отражаются не только величина теплового потока на огневую поверхность кессона, но температура охлаждающей воды в змеевике в рассматриваемой зоне. Учитывая это, а также то, что в третий ряд холодная вода поступает в верхнюю часть кессона при этом, уже после того, как она прошла первый ряд, увеличение температуры внешней поверхности в нижней части кессонов третьего ряда качественно объяснимо. Для более детального количественного анализа влияния различных факторов на распределение температуры в теле кессона необходима разработка соответствующей математической модели.

Несколько иной характер имеет зависимость температуры от высоты стенки для внешней поверхности кессонов групп с 19 по 25. Средняя часть кессона первого ряда имеет практически такую же температуру (низшую для всей стенки), как и нижняя часть кессона первого ряда. Причиной этого, безусловно, является отсутствие подачи дутья в эту зону печи, а, следовательно, интенсивного перемешивания расплава и тепловыделения. Разница температур между верхней и нижней частью первого ряда также гораздо ниже ($\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$ для 19-25 группы, $\Delta T \approx 20^\circ\text{C}$ для 1-18 групп). Абсолютные значения температур для внешней поверхности второго ряда упали (с $57-67^\circ\text{C}$ до $44-54^\circ\text{C}$), но изменение температуры по высоте осталось примерно на том же уровне ($\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$). Для третьего ряда уменьшились как абсолютные значения (с $52-64^\circ\text{C}$ до $48-51^\circ\text{C}$), так и изменение температуры (с $\Delta T \approx 12^\circ\text{C}$ до $\Delta T \approx 3-4^\circ\text{C}$).

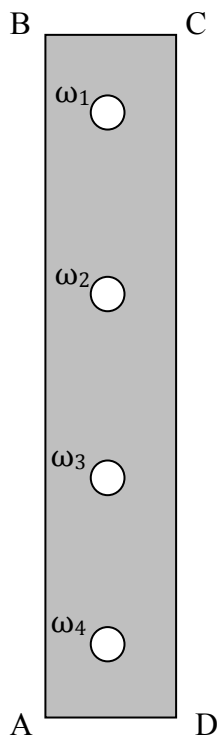


Рисунок 10. Схема расчетной области.

Вероятной причиной, по которой возможен выход кессона из строя, может являться тепловое воздействие расплава. Следовательно, является актуальным проведение исследований по определению температур поверхностей и тела кессона. В качестве метода исследований было выбрано построение математической модели кессона. В качестве расчетной области был выбран двумерный разрез кессона, устанавливаемых на ПВ-1 ОАО "СУМЗ" в зоне с пересечением змеевика в четырех местах.

Расчетная область Ω (Рисунок 10) представляет собой прямоугольник, имеющий размеры 115×600 мм с четырьмя отверстиями диаметром 30 мм, центры которых расположены на расстоянии 60 мм от левой границы и, соответственно, 52 мм, 222 мм, 378 мм, 548 мм от нижней границы. Модель является стационарной. Коэффициент теплопроводности меди был выбран равным $100 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{K})$ (с учетом возможных добавок при литье, ухудшающими теплопроводность). Граничные условия задаются следующими:

- сторона AB (находится на границе кессон - гарнисаж): задается тепловой поток $76646 \text{ КВт}/\text{м}^2$.
- сторона CD (внешняя стенка): свободная конвекция, с учетом температуры среды - 15°C . Коэффициент теплопередачи при этом составит $-26,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{K})$.

- Стороны BC и AD (границы контакта с соседними кессонами): являются теплоизолированными, тепловой поток на данной границе равен нулю.
- Стороны ω_i (границы змеевика): теплоотдача при вынужденном течении жидкости. Температура охлаждающей воды - 30°C. Коэффициент теплопередачи - 7496 Вт/(м²×K).

Тогда, с учетом полученных результатов, математическую постановку задачи можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = 0; \quad (x, y) \in \Omega \\ \frac{\partial T(x, y)}{\partial n} = 76646; \text{ при } (x, y) \in AB \\ \frac{\partial T(x, y)}{\partial n} + 26,6 \times T(x, y) = 399; \text{ при } x, y \in CD \\ \frac{\partial T(x, y)}{\partial n} = 0; \text{ при } (x, y) \in BC, AD \\ \frac{\partial T(x, y)}{\partial n} + 7496 \times T(x, y) = 224880; \text{ при } x, y \in \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4 \end{array} \right. \quad (1)$$

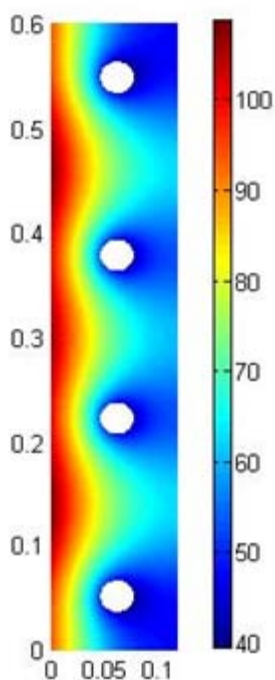


Рисунок 11. Распределение температур в теле кессона

Математическая модель (1) была решена методом конечных элементов на триангулярной сетке и визуализированный результат представлен на графике (Рисунок 11). Значения температур в конкретных точках или областях указаны в таблице (Таблица 2).

Таблица 2. Характеристики распределения температур по кессону

Характеристика	$T_{\text{ср}}^{\text{Раб.}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}^{\text{Раб.}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}^{\text{Зм.}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{ср}}^{\text{Внеш.}}, ^\circ\text{C}$
Температура	100,97	107,9	52,7	54,02

Также были рассчитаны влияния различных условий работы печи (тепловой поток по поверхность кессона), свойств материала кессона (теплопроводность меди), а также условий охлаждения кессонов (температура и расход охлаждающей воды) на распределение температур в теле кессона. Графики влияния различных условий представлены на рисунках (Рисунок 12, Рисунок 13, Рисунок 14).

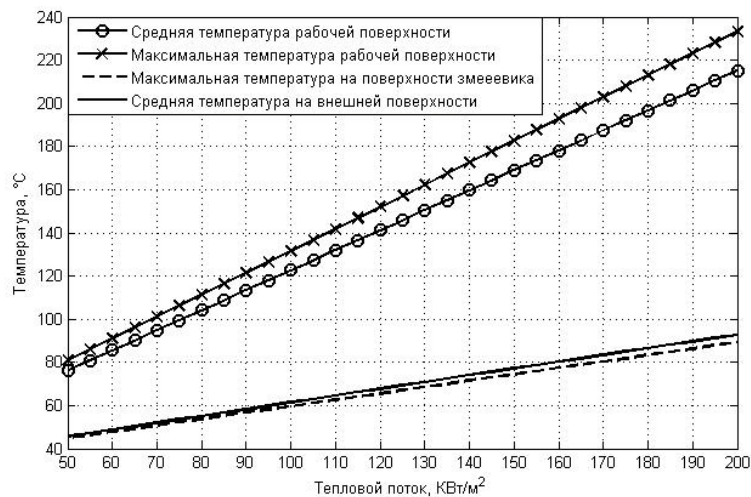


Рисунок 12. Изменение характерных температур расчетной области при изменении теплового потока.

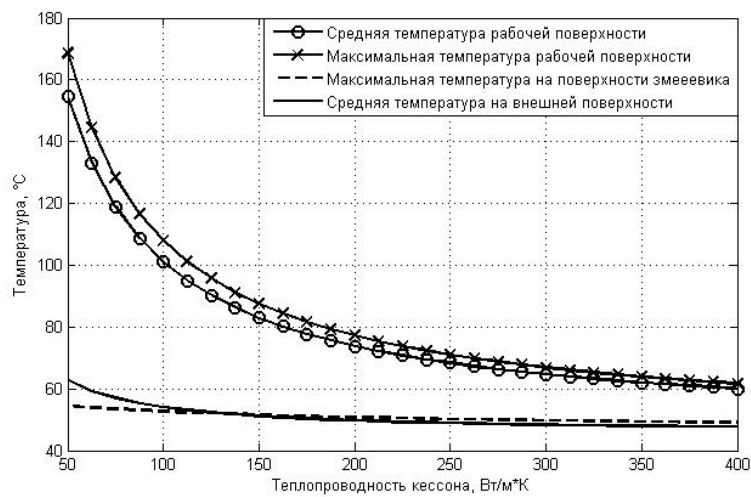


Рисунок 13. Изменение характерных температур расчетной области при изменении теплопроводности кессона.

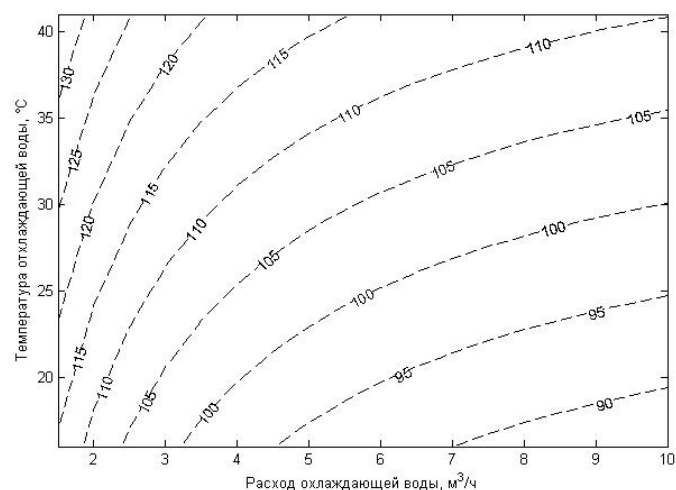


Рисунок 14. Изменение максимальной температуры рабочей поверхности кессона при изменении расхода и температуры охлаждающей воды

Кроме моделирования распределения температур при различных условиях работы были промоделированы возможные дефекты конструкции кессона, возникающие при

литье: отслоение змеевика, наличие пор под огневой поверхностью. Результаты моделирования отслоения змеевика представлен на рисунке (Рисунок 15).

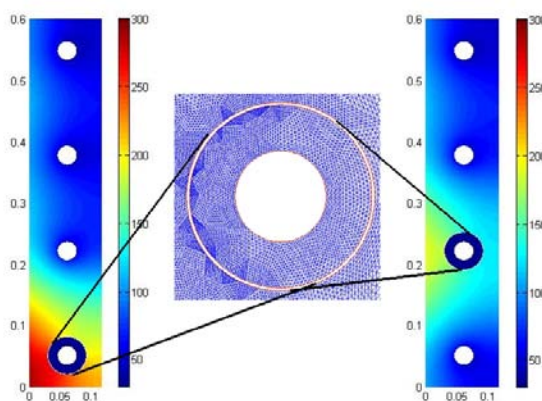


Рисунок 15. Распределение температур в теле кессона при отслаивании одного змеевика.

Периодически, в результате изменения режимов плавки (состав и температура шлака), при изменении газовой нагрузки (переключение фурм, изменение объема подаваемого дутья), или в случае интенсивного механического или ударного воздействия со стороны шлакового расплава, гарнисаж, защищающий рабочую поверхность кессона, может обрушиться. При этом, на некоторое время, до образования нового слоя гарнисажа, рабочая поверхность кессона будет непосредственно соприкасаться с барботирующей шлаковой ванной, в результате чего, тепловые нагрузки на кессон могут достигать значений существенно превышающих стационарные.

Были смоделированы условия работы кессона при обрушении гарнисажа от его разрушения и до восстановления до толщины стационарного режима. Основным показателем расчета является максимальная температура на поверхности кессона, зафиксированная за время расчета. Результаты расчета приведены на графике (Рисунок 16).

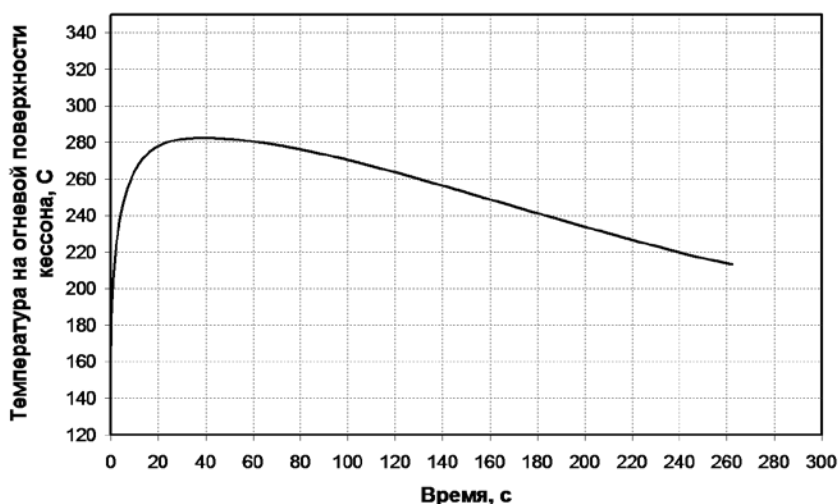


Рисунок 16. Изменение температуры рабочей поверхности кессона после обрушения гарнисажа.

Исходя из рассчитанных значений температур построенных моделей, можно сделать вывод о невысокой температуре нагрева рабочей поверхности кессона. Температура плавления меди (с примесями) составляет около 1083°C. Такие температуры на рабочей поверхности кессона, исходя из результатов расчета, достижимы только при наличии дефектов в теле кессона (неплотное прилегание змеевика). В остальных случаях,

даже в наиболее жестких условиях (тепловой поток на поверхность меди $Q = 200000 \text{ Вт/м}^2$; расход охлаждающей воды $2 \text{ м}^3/\text{ч}$; температура охлаждающей воды 40°C), температура рабочей поверхности не превышает 300°C . Конечно, такие условия крайне нежелательны для работы охлаждающего элемента, по причине того, что температура на поверхности змеевика при этом составляет 140°C , при этой температуре вода может начать закипать, и, как следствие, образовавшиеся пузырьки газа могут снизить эффективность охлаждения. Для предотвращения подобного явления, давление воды, подаваемой на охлаждение, поддерживается на уровне 5-7 атм. Конструкционные свойства меди при данных температурах также не должны существенно ухудшиться.

По результатам расчетов становится очевидно, что фактором, сильнее всего влияющим на величину нагрева кессона, является тепловой поток на рабочую поверхность. Условия охлаждения – температура и расход охлаждающей воды, в тех пределах, которые устанавливаются на заводе, позволяют эффективно отводить тепло даже при невысоком расходе воды и повышенной температуре. Следовательно, именно режимы плавки и условия, создаваемые внутри печи, играют определяющую роль в разрушении водоохлаждаемых элементов.

В четвертой главе рассмотрена возможность химического взаимодействия рабочей поверхности кессонов с внутripечной средой. Рассмотрены гарнисаж и химические отложения, образующиеся на кессоне при работе печи, их структура и химический состав. Проведен термодинамический анализ возможности образования различных соединений меди в атмосфере серы и кислорода при различных парциальных давлениях и температуре. Проведены лабораторные эксперименты по разрушению поверхности меди в различных окислительных атмосферах.

Возможным механизмом разрушения кессонов может являться химическая коррозия. В печи, даже под слоем гарнисажа, кессон находится в постоянном контакте с агрессивной внутripечной атмосферой, состоящей, в основном, из сернистого ангидрида SO_2 , паров воды, диоксида углерода и азота. Также, в условиях длительного контакта с твердым гарнисажем, возможно взаимодействие рабочей поверхности кессона и гарнисажа с образованием различных соединений, в данных условиях менее стойких, чем медь.

Анализируя состояние рабочей поверхности кессонов печи Ванюкова, необходимо отметить наличие на поверхности кессонов различных химических отложений, которые остаются на ней и после отслоения гарнисажа. Часто отложения остаются на внутренней поверхности шлакового гарнисажа после его обрушения. Отложения имеют достаточно разнообразные цвета и оттенки – от светлых, желтовато-сероватых и зелено-голубых до темно-красных, и разные прочностные характеристики – от рыхлых и непрочных до достаточно плотных и твердых. На ряде приведенных ниже фотографий поверхности кессонов хорошо видны некоторые виды этих отложений (Рисунок 17).



а)



б)

Рисунок 17. Образующиеся отложения: а) на кессоне; б) на гарнисаже.

Вид отложений и состояние рабочей поверхности свидетельствуют о том, что возможным вариантом разрушения кессонов может являться химическая газовая коррозия в зазоре между телом кессона и гарнисажем. Так как шлак плохо смачивает медь, то между гарнисажем, который образуется при наплескивании шлака на кессон и его рабочей поверхностью могут оставаться зазоры или щели. Они также могут образовываться в условиях активного барботажа, когда на стены печи передаётся некоторая часть вибрации, вызванной дутьём. Получается, что у газов находящихся в печи есть возможность попасть в эти зазоры, где они могут проконтактировать с поверхностью медного кессона.

Был проведен химический анализ рабочих поверхностей кессонов в различных местах печи. В качестве анализатора использовался электронный микроскоп “JEOL” JSM-6480LV с приставкой для энергодисперсионного рентгеновского микроанализа фирмы Inca, а также спектральным эмиссионным методом на масс-спектрометре и индуктивно-связанной плазмой (метод ICP-MS) SPE CTRO CIROS VISION. Результаты химического анализа отложений приведены в таблице (Таблица 3).

Таблица 3. Результаты химического анализа отложений, полученных с кессонов ПВ-2 ОАО "СУМЗ"

Место отбора (позиция кессона и место отбора на кессоне)	%Cu, масс	%S, масс	%Fe, масс
Правая сторона, 3-я группа, рабочая поверхность	22,5	12,80	5,39
Левая сторона, 6-я группа, рабочая поверхность	21,0	12,10	5,48
Левая сторона, 6-я группа, рабочая поверхность	22,0	11,20	1,43
Левая сторона, 9-я группа, рабочая поверхность	20,9	12,20	3,92
Правая сторона, 4-я группа, фрезеровочная канавка	3,9	2,76	35,60
Левая сторона, 8-я группа, фрезеровочная канавка на фурме	12,5	10,00	17,60

Как видно из представленных данных, в отложениях присутствует значительное количество меди, серы и кислорода, что принципиально свидетельствует о присутствии в отложениях таких соединений как сульфаты, сульфиды, оксиды, главным образом меди и железа. Качественный фазовый анализ подтвердил наличие данных соединений, корректный количественный фазовый анализ отложений из-за сложности спектра провести не удалось. Отметим, что проведенный анализ показал незначительное содержание других шлакообразующих. Отсутствие в составе отложений кремнезема может свидетельствовать о том, что данные отложения могут формироваться не из шлакового гарнисажа, а самостоятельно. Кроме того, отсутствие кремнезема в сочетании с высокой концентрацией кислорода свидетельствует также, что сами отложения не являются просто механически захваченными порциями шихты (вероятность такого процесса ненулевая), а являются продуктом некоторого химического процесса.

Схожесть состава отложений, отобранных в различных печах и с различно расположенных кессонов, свидетельствуют о “неслучайности” обнаруженных высоких значений концентраций серы и меди (очевидно и кислорода) в отложениях, непосредственно прилегающих к огневой поверхности кессонов.

Химический анализ гарнисажа было решено проводить послойно, так как на его поперечном разрезе можно качественно выделить различные по виду и по свойствам слои, располагающиеся от непосредственно границы контакта с кессоном до шлака. Фотографии кусков гарнисажа с обозначенными слоями приведены на рисунке (Рисунок 18).

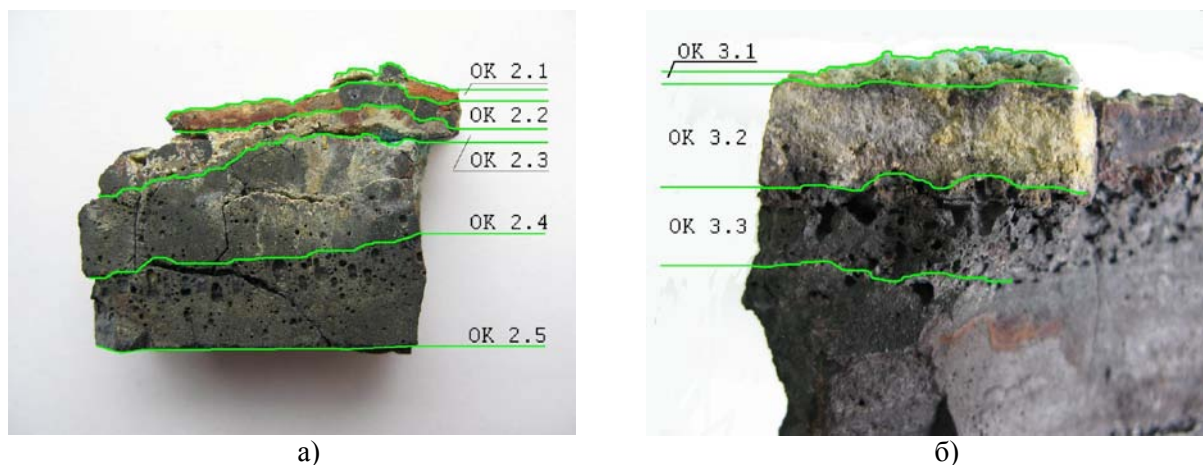


Рисунок 18. Образцы гарнисажа с обозначенными слоями из различных мест печи: а) кессон второго ряда; б) кессон третьего ряда.

Результаты послойного химического анализа, проведенные методом ICP-MS приведены на графике (Рисунок 19)

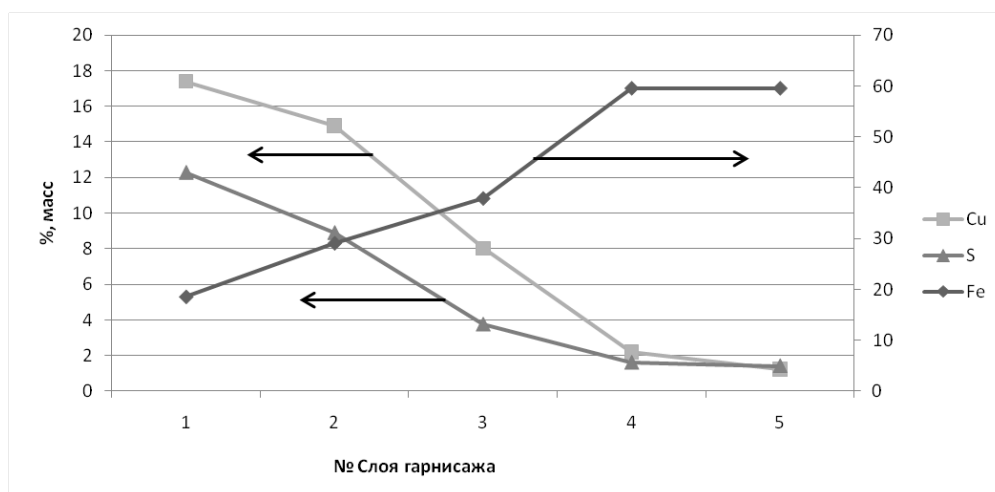


Рисунок 19. Результаты послойного химического анализа гарнисажа

Как видно из таблиц, в слоях, находящихся в контакте с кессоном, количество меди и серы значительно превышает их содержание в шлаке, из которого образуется гарнисаж на поверхности кессона. Содержание серы и меди в слоях, прилегающих к рабочей поверхности кессона, согласуются с составом отложений с поверхности кессонов.

Из приведенных данных видно, что концентрация меди и серы в слое гарнисажа возрастает при приближении к огневой поверхности кессона, а концентрация железа снижается. При этом состав наиболее удаленного от поверхности кессона слоя близок к составу шлака в печи.

Подобное распределение концентрации компонентов в твердых отложениях может свидетельствовать об участии меди кессонов в химических процессах на их поверхности с последующим проникновением (за счет диффузии) меди вглубь (от поверхности кессона) гарнисажа. Каковы эти процессы, и какой механизм их осуществления необходимо еще исследовать и прояснять, однако, их протекание с образованием фаз с высокой концентрацией меди должно вести к расходованию меди кессонов, т.е. к их постепенному разрушению.

В идеальном варианте, когда шлаковый гарнисаж плотно и постоянно закрывает огневую поверхность кессона от шлакового расплава и газовой фазы печи, сложно представить протекание каких-либо процессов на поверхности кессонов с образованием отмеченных выше соединений меди. В то же время, эти соединения образуются.

Взаимодействие твердого шлака с медью при температурах огневой поверхности кессона 150-250°C маловероятно (хотя ничего исключить нельзя до тех пор, пока механизм образования отложений недостаточно изучен). Один из возможных механизмов – взаимодействие рабочей поверхности кессонов с серо- и кислород содержащей газовой фазой. При этом контакт поверхности кессона с газовой фазой возможен, например, по следующим механизмам (в следующих случаях):

- За счет плохого смачивания шлаком меди, гарнисаж на поверхности кессона держится слабо. В некоторые моменты часть гарнисажа обрушивается с поверхности кессона. При этом состав газа, приходящего в контакт с огневой поверхностью кессона, будет близок к составу отходящих газов процесса плавки медного сульфидного сырья;

- В результате того, что медный кессон плохо смачивается жидким шлаком, между поверхностью кессона и твердым шлаковым гарнисажом могут образоваться “зазоры”, газовые прослойки. При подаче дутья в печь газы, насыщенные кислородом, могут попадать в эти зазоры за счёт напора дутья. В эти же “зазоры” могут попадать и газовые продукты процесса плавки через трещины в гарнисаже, а также в момент обрушения части гарнисажа с некоторых кессонов.

Можно представить и другие возможные механизмы возникновения контакта огневой поверхности кессона и газовой фазы. Однако, наличие контакта фаз еще не означает их взаимодействия, ведь из-за высокой теплопроводности меди температура ее поверхности (а значит и сред, которые касаются этой поверхности) составляет всего ~150-250 °C. Далее были проведены некоторые теоретические и экспериментальные проверки и оценки возможности протекания взаимодействия газовых сред с медью при характерных для огневой поверхности кессонов ПВ температурах.

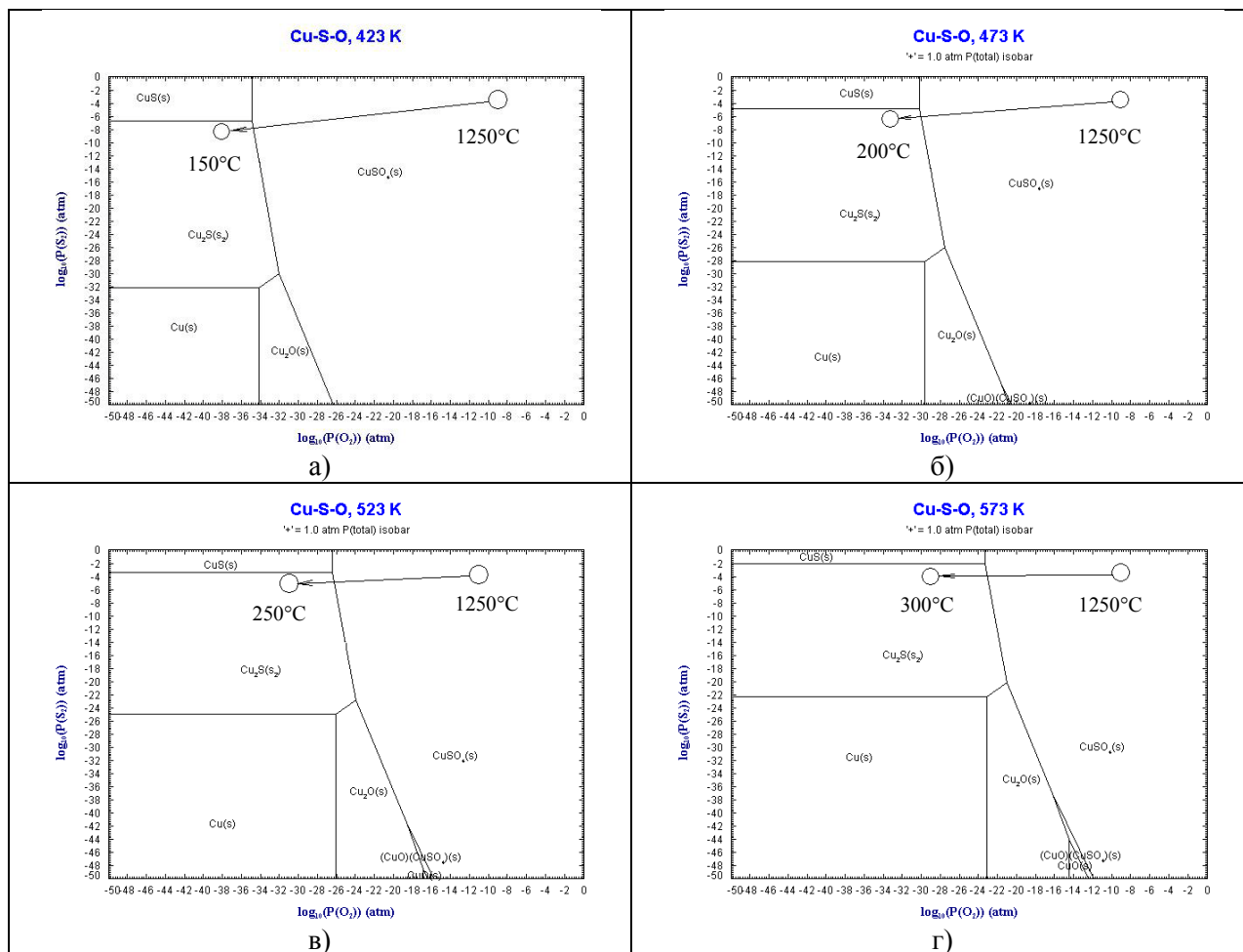


Рисунок 20. Диаграммы парциальных давлений в системе Cu – S – O при различных температурах: а) 150°C б) 200°C в) 250°C г) 300°C

Первопричиной химического разрушения рабочей поверхности металла кессонов является их термодинамическая неустойчивость в различных средах при данных внешних условиях, т.е. возможность самопроизвольного перехода металлов в более устойчивое окисленное состояние в результате процесса:

Металл + Окислительный компонент среды = Продукт реакции
с соответствующим уменьшением термодинамического потенциала этой системы.

Для исследования термодинамической вероятности возможности коррозии меди в атмосфере печи было решено построить диаграммы парциального давления в системе Cu – S – O.

По данным из справочной литературы были построены диаграммы парциальных давлений при температурах 150°C, 200°C, 250°C, 300°C в пределах парциальных давлений по p_{O_2} и p_{S_2} от 10^{-50} до 1 атм (Рисунок 20).

Как видно из представленных диаграмм, в условиях внутripечной атмосферы, наиболее вероятным соединением является сульфат меди $CuSO_4$. Причем, область, занятая этим соединением уменьшается с повышением температуры.

Также на диаграммы нанесены области составов газов печи Ванюкова. Из практического опыта известно, что в газах печи Ванюкова при температуре 1250°C парциальное давление кислорода p_{O_2} составляет $5 \times 10^{-9} \div 10^{-8}$ атм, а парциальное давление серы $p_{S_2} = 10^{-2} \div 4 \times 10^{-2}$ атм. При уменьшении температуры до значений, соответствующих температурам рабочей поверхности кессонов, парциальные давления p_{O_2} и p_{S_2} также изменятся.

Области парциальных давлений, которые соответствуют составу металлургических газов, при снижении температур до интересующих, представлены на диаграммах парциальных давлений. Данные области расположены в зоне образования сульфита меди Cu_2S , практически на границе с сульфидом меди CuS . Следовательно, образования именно этих соединений следует ожидать на поверхности меди в данных условиях. Однако в металлургической печи, при изменении режимов работы возможны изменения и в составе газов, в том числе, увеличения парциального давления кислорода.

В связи с недостатком сведений о процессах коррозии меди было принято решение провести серию опытов по взаимодействию меди с различными серосодержащими газами при температурах поверхности водоохлаждаемых элементов, которые смогли бы ответить на вопросы о возможности коррозионных процессов на поверхности кессонов, степени протекания этих процессов и об их скоростях.

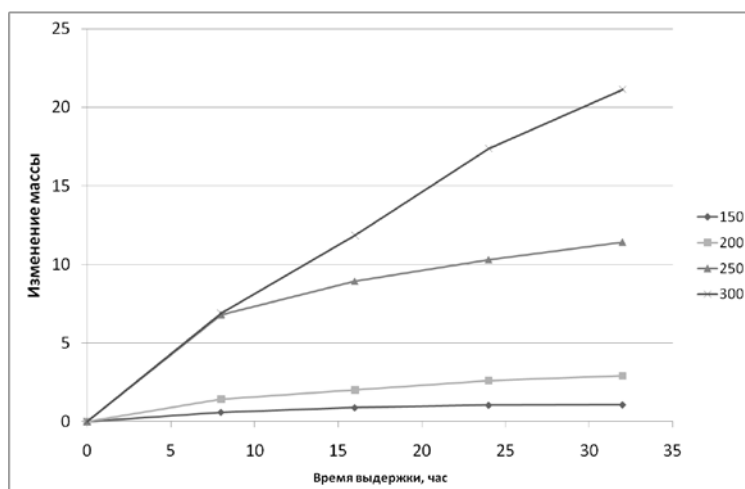


Рисунок 21. Изменение массы медной пластинки при проведении эксперимента

По полученным значениям построены графики изменения величины (скорости) прироста при различных температурах. Также построен график суммарного прироста массы при различных температурах (Рисунок 21).

В результате проделанной экспериментальной работы было выяснено, что медь достаточно активно реагирует с серосодержащими газами. При температурах от 150 до 300 °С при постоянном потоке газов за год может образоваться до 60 кг осадка на одном квадратном метре медной поверхности. Естественно, это может произойти только в идеальных условиях, при постоянном составе газов, при их постоянном потоке, при отсутствии диффузионных затруднений для попадания газов к медной поверхности. Однако можно предположить, что в реальных условиях, при попадании газов из печи в зазоры между поверхностью кессона и гарнисажем процесс взаимодействия этих газов с медной поверхностью кессона будет происходить.

Результаты качественного фазового анализа налёта, образовавшегося в результате взаимодействия меди с сернистым ангидридом, показали, что в условиях проведённых опытов наиболее вероятным продуктом взаимодействия являются сульфат меди, что, при условии повышенного парциального давления кислорода, по сравнению с опытами при продувке расплава, соответствует результатам термодинамического расчета.

Таким образом, в лабораторных условиях было доказано, что коррозия меди в среде газов, получаемых при плавке медного сульфидного сырья возможна, а её скорости достаточно велики, чтобы разрушать огневую поверхность кессона.

Выводы

1. Проанализированы основные режимы работы печи Ванюкова. Несмотря, на общую стабильность работы печи, иногда происходят существенные повышения теплосъёма с печи, которые длятся около 8 часов, и могут привести к ускоренному износу водоохлаждаемых элементов. Составы продуктов плавки также могут колебаться в широких пределах. Их причиной, в основном, служат колебания в составах исходных материалов, а также неточности, допущенные при шихтовке (слишком грубое измерение массы флюсов и концентратов).
2. Проанализированы основные типы износа водоохлаждаемых элементов. Это плавный «размыв» острых углов на поверхности кессона, образование небольших углублений – «раковин», а также искривление плиты. На основании исследований по коррозии меди в серосодержащей атмосфере, можно предположить, что именно химическое взаимодействие поверхности кессонов с внутripечной средой является причиной двух первых типов износа.
3. Получены экспериментальные данные по величине тепловых потоков на охлаждаемые элементы ПВ ОАО СУМЗ. По рядам кессонов – несколько большие на втором, чуть меньшие или близкие – на первом, наименьшие на третьем и четвертом. По длине печи тепловые нагрузки сильно неравномерны – снижаются к шлаковой стороне печи. Необходимо искать возможности более равномерного распределения дутья по печи, что позволит снизить интенсивность барботажа в зоне загрузки шихты и таким образом тепловые нагрузки на кессоны в этой зоне печи.
4. Получены данные по температуре внешней поверхности кессонов. Отмечена неравномерность температур, а, следовательно, тепловых нагрузок по телу отдельных элементов. На основании этих данных определены наиболее теплонапряженные зоны – верхняя часть кессонов первого ряда и нижняя часть кессонов второго ряда.

5. По результатам расчетов на математической модели становится очевидно, что фактором, сильнее всего влияющим на величину нагрева кессона, является тепловой поток на рабочую поверхность. Условия охлаждения – температура и расход охлаждающей воды, в тех пределах, которые устанавливаются на заводе, позволяют эффективно отводить тепло даже при невысоком расходе воды и повышенной температуре. Следовательно, именно режимы плавки и условия, создаваемые внутри печи, играют определяющую роль в разрушении водоохлаждаемых элементов.
6. Проведен химический анализ рабочей поверхности кессона, отложений, образовавшихся на нем, а также гарнисажа. В отложениях присутствует значительное количество меди, серы и кислорода, что принципиально свидетельствует о присутствии в отложениях таких соединений как сульфаты, сульфиды, оксиды, главным образом меди и железа.
7. Проведен термодинамический анализ возможности коррозии меди в атмосфере кислорода и серы. По результатам анализа сделан вывод о том, что при взаимодействии газов, соответствующих газам печи Ванюкова, на поверхности меди, при расчетных температурах рабочей поверхности кессона, должны образовываться сульфиды или сульфиты меди.
8. Опыты по взаимодействию меди с различными серосодержащими газами доказали возможность образования соединений на поверхности меди при условиях плавки в печи Ванюкова, причем скорость этих взаимодействий существенно зависит от температуры и они достаточно велики, чтобы быть химическое взаимодействие было основной причиной износа рабочей поверхности кессона.

Основное содержание работы отражено в публикациях:

1. Вернигора А. С., Казанцев А.Н., Красильников Ю.В., Милованов М.Ф., Камкин Р.И. Анализ показателей печи Ванюкова на ОАО СУМЗ с целью стабилизации режимов плавки // Цветные металлы. - 2008. - № 3. - С. 24-28-
2. Комков А.А., Вернигора А.С., Лапин А. В. Исследование параметров теплового воздействия шлакового расплава на стеновые кессоны печи Ванюкова // Цветные металлы. - 2009. - № 4. - С. 45-49 –
3. Вернигора А. С., Кузнецов А. В., Мамаев А. Ю. / Исследование коррозии огневой поверхности кессонов печей Ванюкова при переработке медного сульфидного сырья / Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы // Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции – МИСиС, г. Москва, 2009, С. 27-29.
4. Комков А. А., Вернигора А. С. / Модель теплового удара на водоохлаждаемые элементы печи Ванюкова возникающего при обрушении гарнисажа / Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы // Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции – МИСиС, г. Москва, 2009, С. 37-39.
5. Комков А. А., Вернигора А. С., Лапин А. В., Милованов М. В., Камкин Р. И. / Исследование распределения тепловых нагрузок по водоохлаждаемым элементам печи Ванюкова / Металлургия цветных металлов. Проблемы и перспективы // Сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции – МИСиС, г. Москва, 2009, С. 27-29.
6. Ноу-хау № 20-341-2009 ОИС от "4" сентября 2009 г. " «Методика оценки эффективности охлаждения водоохлаждаемого элемента печи Ванюкова». Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау Отдела защиты интеллектуальной собственности МИСиС.