

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу Титаева Александра  
Анатольевича “Совершенствование технологии нагрева  
горячедеформированных труб на основе анализа теплофизических  
процессов”, представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных  
и редких металлов

Производство труб является одной из ключевых отраслей в металлургической промышленности России. В условиях нарастающей международной конкуренции задачи снижения издержек производства за счет совершенствования существующих технологических процессов и внедрения новых представляются чрезвычайно актуальными. Решению данных задач посвящена диссертационная работа Титаева А.А., в которой описано совершенствование технологии нагрева труб с использованием научного подхода в виде анализа теплофизических процессов в печи.

В качестве методологической основы был выбран существующий зональный метод расчета теплообмена излучением, который был существенно доработан автором для применения в случаях нагрева металла в пламенных печах. Усовершенствованный метод был применен для расчета тепловых потоков в нагревательных методических печах с шагающими балками при финишной отделке труб. Моделирование теплообмена было выполнено с помощью специально разработанного при участии автора комплекса компьютерных программ.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием современных приборов сбора и обработки информации о технологическом процессе, общепринятых расчетных методик, методов математического анализа и моделирования.

Практическая ценность работы состоит в возможности использования методики и результатов расчета для создания новых режимов нагрева труб и подтверждена внедрением рекомендаций в процесс финишной обработки труб на предприятии ОАО “Первоуральский новотрубный завод”. В частности, использование результатов работы позволило значительно сократить объем повторного нагрева горячедеформированных труб из стали 13ХФА.

Основные материалы диссертации достаточно полно доложены на всероссийских и международных отраслевых конференциях. По теме диссертации опубликованы 17 научных работ, в том числе 4 работы в журналах, рекомендованных ВАК России. Оформлен 1 патент на изобретение.

Диссертационная работа выполнена на 165 страницах машинописного текста, включающего 38 рисунков и 27 таблиц. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, состоящего из 66 источников.

**Во введении** диссертационной работы дается обоснование актуальности задачи совершенствования существующих технологий нагрева труб, даны цели и задачи исследования, сформулирована научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость работы, описаны методология, степень достоверности и апробации работы.

**В первой главе** представлен обзор литературных источников, освещающих вопрос анализа теплофизических процессов в металлургических печах. Указаны преимущества и недостатки существующих инженерных подходов к расчету теплообмена излучением. Выполняемые в процессе обработки труб термические операции подробно рассмотрены на примере существующей линии финишной обработки, установленной на одном из крупнейших трубных заводов региона. В

качестве обоснования актуальности выбранной темы исследования дан статистический анализ производства труб с разбором причин получаемого брака. Указаны недостатки существующей технологии нагрева.

В конце главы сделаны выводы и представлен набор задач, решаемых в процессе диссертационной работы:

- усовершенствование существующего зонального метода моделирования теплообмена излучением для расчета теплообмена при нагреве труб: 1) разработка простой с вычислительной точки зрения и быстрой модели излучения продуктов сгорания; 2) разработка метода расчета переноса излучения в случае сложной геометрической конфигурации;

- разработка методики определения допустимого диапазона параметров работы печи (темпа шагания балок печи и температуры в зонах) для получения заданного теплового режима нагрева труб;

- выполнение анализа и моделирования процессов, происходящих в печи, с целью минимизации влияния возмущающих факторов на стабильность режима работы: 1) разработка схемы установки и алгоритма стабилизации газодинамического режима работы печи; 2) усовершенствование метода контроля температуры труб с помощью монохроматического пирометра.

**Во второй главе** рассматриваются особенности моделирования теплообмена излучением, основные положения и формулировки при моделировании теплообмена излучением с помощью зонального метода, особенности моделирования теплообмена при нагреве трубных заготовок в закрытых печных пространствах. Также в данной главе описываются разработанные при участии автора модель излучения продуктов сгорания органического топлива и метод дискретизации направлений переноса (ДНП) излучения при расчете матрицы обобщенных угловых коэффициентов.

В основе предлагаемой автором модели излучения продуктов сгорания лежит вычисление интегрального коэффициента поглощения объемной зоны

на основе известных физических и геометрических величин (температура, парциальные давления компонентов смеси, характеристический путь луча в зоне). Модель представляет собой развитие формулы Гурвича-Митора и позволяет быстро и просто вычислить коэффициент поглощения печной атмосферы при неизменных парциальных давлениях смеси газов. При изменении парциальных давлений модель требует настройки с помощью оптимизации коэффициентов по одной из точных моделей (EWBM, LBL и др.). Время вычисления по данной модели примерно в 3 раза меньше, чем при использовании широко применяемой модели взвешенной суммы серых газов при сопоставимой точности получаемых результатов.

Разработанный автором метод расчета обобщенных угловых коэффициентов основан на дискретизации направлений распространения излучения в печном пространстве. В качестве направлений излучения выбираются геометрические центры поверхностных зон, ограничивающих печное пространство и металл. Для каждого из выбранных направлений излучения выполняется расчет переносимой вдоль него энергии, что позволяет вычислить обобщенные угловые коэффициенты каждой пары зон в системе. Основное преимущество предложенного метода состоит в сокращении объема требуемых вычислений за счет уменьшения количества отслеживаемых лучей. Сравнение метода с существующим аналогом на тестовой геометрической конфигурации показывает уменьшение времени счета в 7 раз, при этом ошибка при выполнении балансовых соотношений в системе уменьшилась с 2,9% до 0,07%.

В выводах главы указывается, что:

- одной из ключевых особенностей при моделировании теплообмена в нагревательных печах является расчет влияния состава продуктов сгорания топлива на характеристики теплообмена излучением в печном пространстве;
- разработана аппроксимирующая модель для учета зависимости коэффициента поглощения продуктов сгорания от химического состава, температуры и объемной конфигурации газовой зоны, в основе которой

лежит определение степени черноты газового слоя в виде формулы с оптимизируемыми коэффициентами;

- разработан метод расчета обобщенных угловых коэффициентов излучения, который позволяет с высокой степенью точности получить распределение потоков тепла в геометрически сложных конфигурациях, характерных для современных печей. Преимуществом метода является сокращение объема вычислений за счет многократного использования полученной при отслеживании лучей информации (для вычисления сразу нескольких элементов матрицы обобщенных угловых коэффициентов излучения).

**Третья глава** посвящена совершенствованию режимов нагрева труб с использованием математической модели процессов теплопереноса. В ней представлены основные положения методики совершенствования режимов нагрева труб на основе анализа теплофизических процессов в печи, расчет теплообмена при нагреве труб из стали 13ХФА с использованием усовершенствованного зонального метода моделирования теплообмена, анализ результатов моделирования, определение параметров режима и выдача рекомендаций по совершенствованию режимов нагрева горячедеформированных труб повышенной эксплуатационной надежности, определение рекомендуемой максимальной производительности при нагреве труб в печи.

Разработана методика совершенствования режима нагрева и выдержки труб в нагревательных печах, которая включает в себя выбор режимов, требующих корректировки по причине возникающего брака при нагреве и выдержке труб, построение модели печного пространства с трубами для получения параметров режима нагрева, определение допустимого диапазона параметров работы печи, обеспечивающего требуемые характеристики нагрева.



Методика была применена для корректирования режимов нагрева труб из стали 13ХФА в методической печи с шагающими балками для снятия остаточных напряжений. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в печи позволило рассчитать фактическую динамику нагрева трубы. Для комплексной характеристики процесса нагрева и выдержки был введен в рассмотрение параметр  $P$ , учитывающий время нагрева и температуру трубы. Выполненное на базе статистики обработки труб за 2013г моделирование позволило определить допустимый диапазон комплексного параметра  $P$ , требуемый для получения труб с требуемыми механическими свойствами. После корректировки режимов нагрева в соответствии с моделью произошло существенное снижение (в 6 раз в относительных величинах) объема повторной обработки труб по рассматриваемой группе сортаментов.

Была построена зависимость между максимальной производительностью печи и температурой нагрева труб. Для практического применения предлагается использовать диаграммы пересчета, позволяющие определить цикл шагания балок по заданной температуре в печи (пример расчета приведен для труб диаметром 219мм), что обеспечивает необходимую температуру труб в начале зоны изотермической выдержки. Применение полученных результатов позволяет стабилизировать время изотермической выдержки и избежать ее сокращения за счет недогрева труб в конце зоны нагрева.

Для повышения прогнозируемости свойств печи целесообразным является внесение изменений в конструкцию и алгоритмы управления печью, способствующих повышению стабильности анализируемых параметров и измеряемых величин, а также уменьшению влияния возмущающих факторов.

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы стабилизации параметров нагрева за счет совершенствования конструкций и алгоритмов управления печью: описаны существующие способы регулирования давления в печах,

представлен метод регулирования давления, основанный на определении содержания кислорода в отходящих дымовых газах, описана схема установки, реализующей предложенный алгоритм, выполнена оценка эффективности способа и даны результаты его экспериментального внедрения в производство. Также описаны существующие способы измерения температуры металла в нагревательных печах и предложено усовершенствование метода измерения температуры пирометром излучения с помощью оценки и компенсации величины ошибки.

Оценка эффективности предложенного способа регулирования давления в печи была проведена как с использованием экспериментальных данных, так и путем теоретического расчета теплового баланса печи и массы образующейся в процессе нагрева окалины. Внедрение данной схемы в производство позволило сократить количество подсосов холодного воздуха в печь до 7 раз, а также на 12% уменьшить массу образующейся окалины. По результатам исследования оформлен патент на изобретение.

Предложено усовершенствование метода измерения температуры труб монохроматическим пирометром излучения. В основе усовершенствования лежит определение оптимального расстояния от объектива пирометра до поверхности металла, в результате чего влияние искажающих температуру факторов (излучения слоя продуктов сгорания и охлаждение металла потоком воздуха от пирометра) оказывается взаимно компенсированным. Проведено внедрение разработанного усовершенствования в производство.

#### **Замечания по содержанию работы:**

1. При одностороннем нагреве не учитывается несимметричность подвода тепла и влияние этого фактора на равномерность прогрева труб со стороны подоины, а именно в местах контакта поверхности трубы с неподвижными балками.

2. При определении параметров лучистого теплообмена отсутствует анализ влияния слоя образующейся на трубах окалины и ее теплофизических свойств на процесс нагрева металла.

3. В формуле 2.46 не определено, как при расчете коэффициентов ослабления излучения учитывается изменение концентраций углекислого газа и паров воды в газовой среде по объему внутripечного пространства.

4. Для удобства практического применения полученных расчетных величин степени черноты продуктов сгорания и угловых коэффициентов излучения целесообразно привести конкретные обобщенные значения этих параметров хотя бы при условии использования природного газа для отопления печей.

5. Непонятно, почему оптические пирометры для измерения температуры поверхности труб визируются на “определенные ячейки” в печном пространстве, а не на поверхность труб непосредственно (показатель визирования).

6. При моделировании режимов с целью сокращения продолжительности времени нагрева не представлены или не учитываются ограничения на термические напряжения и максимально возможный расход топлива в подзонах;

7. Предлагаемые в работе технические решения по совершенствованию режимов управления нагревом имеют элементы новизны, но сложны по технической реализации.

8. В работе недостаточно четко изложены практические вопросы использования температуры поверхности металла в реализации энергосберегающих режимов высококачественной финишной обработки труб.

Данные замечания не снижают положительной оценки работы и ее научной и практической значимости.



Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научно обоснованные технологические и технические решения в области нагрева труб. Результаты данных исследований имеют существенное значение для металлургической отрасли в целом и трубного производства в частности. Внедрение разработанных усовершенствований позволило добиться улучшения экономических и качественных показателей производства.

Содержание автореферата в полной мере соответствует содержанию диссертации, а тема и содержание диссертации соответствуют специальности 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утв. постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), а ее автор – Титаев Александр Анатольевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов.

Парсункин Борис Николаевич,  
профессор, д.т.н.,  
профессор кафедры “Автоматизированные  
системы управления”  
ФГБОУ ВПО «Магнитогорский  
государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»,  
Заслуженный работник высшей школы РФ  
тел. +7(3519)29-84-32  
01 декабря 2015г.

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический  
университет им. Г.И. Носова»,  
455000, Россия, г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38.



Б.Н. Парсункин

