

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Тупилко Ирины Владимировны на тему «Разработка энергоресурсосберегающих режимов внепечной деазотации жидкого металла в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика.

Диссертационная работа Тупилко И.В. состоит из введения, 5-ти разделов, общих выводов, приложений и списка использованных источников. Диссертационная работа изложена на 123 страницы, из которых основной текст диссертации занимает 110 страниц, список литературы – 11 страниц, приложение – 2 страницы.

Актуальность выбранной темы диссертационной работы

Проблема энергоресурсосбережения является одной из ключевых для металлургической промышленности, ввиду высокой энергозатратности этого производства на большинстве этапов технологической цепочки. Данная оценка в полной мере относится к технологической фазе улучшения качества металла, в которой находят широкое и эффективное применение установки внепечной дегазации. Проведенный обзор современного состояния проблемы деазотации жидкого металла показал, что существенное влияние на состав металла в технологиях его деазотации имеют процессы конвективного тепломассопереноса атомов азота в расплаве. Авторы работ ставят проблему изыскания дополнительных способов интенсификации внепечной деазотации расплавов с учетом существующих разработок в этом направлении. Классическим вариантом внепечной дегазации металла является его продувка инертным газом в ковше. И.И. Борнацкий, В.И. Мачикин, В.С. Живченко. на основании экспериментальных исследований нашли, что не интенсивность продувки, а количество пузырей аргона, внедряемых в металл в единицу времени, является фактором интенсификации процессов конвективного тепломассопереноса. По данным Н.М. Чуйко наиболее интенсивной по тепломассопереносу является продувка через пористые элементы днища ковша, которая обеспечивает распределение мелких пузырьков инертного газа по всему объему расплава. А.В. Кайбичев исследовал влияние электрического воздействия на расплав металла в

процессе внепечной дегазации. Из зарубежных специалистов внепечной деазотацией занимались преимущественно японские ученые: А. Kazuo, Т. Harada, S. Tasisada. В настоящее время отсутствует универсальный способ деазотации металла на уровне современных требований к качеству металлических изделий энергоресурсосберегающие режимы интенсификации процессов тепломассопереноса. В связи с этим актуальна тема диссертационной работы, которая посвящена разработке энергоресурсосберегающих режимов интенсификации процессов тепломассопереноса в условиях внепечной деазотации металла.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

При разработке научных положений, выводов и рекомендаций диссертации использованы апробированные научные методы, которые основаны на фундаментальных положениях теории тепломассопереноса. При сопоставлении результатов расчетно-теоретических исследований и экспериментальных данных получена достаточная степень соответствия.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций доказана удовлетворительной сходимостью результатов математического моделирования и экспериментальных данных.

Новизна научных положений, изложенных в диссертации, состоит в следующем:

1. Впервые при математическом моделировании конвективной диффузии удаляемого из жидкого металла газа при его внепечной обработке в условиях атмосферного давления учтён теплообмен расплава с атмосферой через слой синтетического шлака. Разработанная математическая модель применима к металлу с достаточно высокой температурой плавления и эффективно описывает растворение удаляемого азота в расплаве и ионизацию в нём атомов газа.

2. Впервые теоретически обоснован и экспериментально подтвержден эффект интенсификации молекулярного звена $2 [N] = \{N_2\}$

теплообменного процесса удаления азота из расплава металла, механизм которого состоит в формировании электростатическим полем области повышенной концентрации (локализованного сгустка) в области проекции границы электрода (источника электростатического поля) на межфазную поверхность "вакуум-металл".

3. Впервые в результате проведенных исследований установлены научные предпосылки реализации энергоресурсосберегающего режима технологии внепечной дегазации металла от растворенного в нем азота при участии молизионного звена в лимитированном теплообменном процессе.

4. Впервые получено обобщение соотношения закона Сиверта для постановки граничного условия к уравнению конвективной диффузии атомов азота в расплаве при исследовании в нём процессов теплопереноса. Обобщение достигнуто за счёт дополнительного учёта воздействия электростатического поля докритических напряженностей на межфазную поверхность «вакуумметалл» и степени ионизации атомов азота в расплаве.

5. Впервые проведена количественная оценка интенсивности теплообменного процесса азота в жидкой ванне при внепечной деазотации металла комплексным воздействием в условиях лимитирования этого процесса кинетической (молизионной) стадией.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный энергоресурсосберегающий режим технологии в условиях интенсификации процессов конвективного теплопереноса в расплаве может быть внедрен на различных предприятиях по производству металла ответственного назначения. Практическая значимость подтверждается и использованием результатов работы при выполнении кафедральной темы, указанной выше.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, дана связь диссертации с тематикой научных исследований кафедры «Техническая теплофизика» факультета металлургии и теплоэнергетики, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследований, научная новизна,

теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации результатов, а также личный вклад автора.

Первый раздел содержит общую характеристику процессов тепломассопереноса в условиях технологии внепечной дегазации жидкого металла от растворённых в нем газов. Приведены особенности деазотации расплавов. Изучено современное состояние вопроса энергоресурсосбережения при интенсификации процессов тепломассопереноса в жидкой ванне, обеспечивающие повышение производительности агрегатов внепечной обработки металла. Выявлено, что в настоящее время наиболее перспективными элементами рассматриваемой технологии являются: продувка жидкого металла аргоном через пористое днище ковша при атмосферном давлении под слоем синтетического газопроницаемого шлака, а также вакуумирование с интенсификацией процессов тепломассопереноса в жидкой ванне сосредоточенной продувкой аргоном через днище ковша и электростатического поля, действующего на межфазную поверхность «вакуум-металл». Отмечено, что недостатками предшествующих исследований других авторов являются: неучёт при построении математических моделей диффузионных процессов теплообмена расплава с атмосферой через слой шлака, изменения по высоте жидкой ванны скорости всплывания пузырей аргона и плотности потока массы удаляемого газа на поверхность «аргонметалл». Кроме того, анализ второго элемента рассматриваемой технологии с участием электростатического поля докритических напряжённостей проведен лишь для водорода без оценки особенностей деазотации расплавов. Ожидается экономия аргона для продувки металла и электрической энергии при воздействии на него электростатического поля.

Во втором разделе дано обоснование выбора направления научных исследований, связанного с актуальностью темы диссертации и реализацией её цели. Автором сформулирована энергоресурсосберегающая технология внепечной дегазации жидкого металла от растворённого азота комплексным воздействием продувки инертным газом, вакуума и электростатического поля докритических напряженностей в условиях интенсификации процессов тепломассопереноса. Усовершенствованный способ энергоресурсосбережения, лежащий в основе этой технологии включает следующие два этапа:

– продувка жидкого металла аргоном в период $\tau_0 \leq \tau \leq \tau_B$, а также продолжение продувки жидкой ванны в период $\tau_B \leq \tau \leq \tau_M$;

– комплексное воздействие на расплав продувкой аргоном, вакуумом и электростатическим полем докритических напряжённостей при $\tau_M \leq \tau \leq \tau_K$.

При этом $\tau_0, \tau_B, \tau_M, \tau_K$ – соответственно моменты начала продувки металла аргоном, окончания выпуска расплава в рафинировочную ёмкость с «пористым кольцом» в днище при атмосферном давлении под слоем наведенного азотопроницаемого синтетического шлака, наступления молизационного (кинетического) звена тепломассопереноса атомов азота в жидкой ванне и окончания обработки металла.

При исследовании процессов тепломассопереноса на первом этапе технологии к уравнению конвективной диффузии атомов азота в расплаве впервые присоединено уравнение теплопроводности, учитывающее теплообмен металла с атмосферой через слой шлака. Основные допущения, положенные в основу математической модели следующие:

- осевая симметричность системы;
- градиент температуры расплава в направлении вертикальной координаты z существенно выше аналогичной характеристики в направлении радиальной координаты r ;
- средние по объёму жидкой ванны значения компонент V_z скорости металла и шлака равны скорости V_H наполнения расплавом рафинировочной емкости, а среднее по объёму значение компоненты V_r равны нулю.

Математические модели процессов тепло- и массопереноса в расплаве в условиях его продувки инертным газом при атмосферном давлении под слоем синтетического шлака включают: уравнение теплопроводности для расплавов металла и шлака с краевыми условиями, а также уравнение конвективной диффузии атомов азота в жидком металле.

В уравнении конвективной диффузии дополнительно учитываются изменения по высоте жидкой ванны, скорости всплывания пузырей аргона и плотности потока массы атомов азота на поверхность пузырей в период $\tau_B \leq \tau \leq \tau_M$.

Результаты компьютерного моделирования сопоставляются как с данными лабораторных исследований на «холодной» модели с участием автора, так и исследованиями японских авторов.

Методика диссертационного исследования включает проведение теоретического анализа влияния воздействия электростатического поля на интенсификацию процессов тепломассопереноса в жидком металле на втором этапе технологии. Это исследование проведено на основе теоретического обобщение закона Сивертса для азота на межфазной поверхности «вакуум-металл» в условиях воздействия на неё этого внешнего поля, а также экспериментальное подтверждение этих теоретических разработок.

Третий раздел посвящен численному исследованию процессов тепломассопереноса в жидком металле на основе математических моделей. Составлена программа реализации вычислительного процесса на языке Паскаль. Математическая модель теплового процесса численно исследована по явной схеме метода конечных разностей.

В работе приведен график зависимости эффективности ϵ конвективной диффузии азота в расплаве железа (степени его дегазации) в функции интенсивности Ω продувки аргоном через «пористое кольцо» в днище при различных значениях диаметра d_n пор продувочного устройства. Как следует из этого графика, при увеличении интенсивности продувки эффективность ϵ возрастает вследствие увеличения количества пузырей аргона, внедряемого в жидкую ванну в единицу времени. Однако, при некотором оптимальном значении $\Omega = \Omega_{\text{опт}}$ ϵ достигает максимума и дальнейший рост этой величины прекращается. Существование $\Omega_{\text{опт}}$ связано с наличием противоположной тенденции увеличению площади поверхности контакта «аргон-металл» при росте Ω , а именно, снижению времени контакта пузырей аргона с жидкой ванной, вследствие чего рафинирующая способность каждого из пузырей уменьшается. Следовательно, режим продувки при $\Omega = \Omega_{\text{опт}}$ является энергоресурсосберегающим. Зависимость $\epsilon(d_n)$ является убывающей, так как при снижении диаметра пор продувочного устройства при фиксированном значении $\Omega = \Omega_{\text{опт}}$ площадь поверхности контакта «аргон – металл» возрастает. При этом, как показали исследования, массовый расход аргона для обеспечения $\Omega_{\text{опт}}$ снижается с уменьшением d_n .

Таким образом, в третьем разделе разработаны научные предпосылки сбережения аргона при продувке расплава металла через пористые элементы днища ковша.

Необходимо отметить, что пористые пробки и пористые блоки в ДНР не разрабатываются и требуют эффективного развития огнеупорной промышленности. Они успешно используются, например, в Японии.

Вместе с тем аргон, в отличие кислорода, газ недешевый и рекомендации по его сбережению весьма актуальны.

В четвертом разделе диссертации исследована и подтверждена адекватность разработанной математической модели путем сравнения полученных результатов с данными лабораторных исследований японских авторов. Автор сравнивает результаты компьютерного моделирования на основе этой модели с данными лабораторных исследований японских ученых. Показано хорошее согласование. Аспирантка И.В. Тупилко в своей работе при проведении исследований на «холодной» модели обобщает результаты с жидкого железа в лабораторных исследованиях японских авторов и на другие металлы, расплавы которых растворяют азот. Это, с одной стороны, положительная сторона работы, а, с другой стороны, можно добиться лишь качественного (не количественного) соответствия результатов компьютерного моделирования и лабораторных данных. По сути, этими исследованиями доказано существование оптимальной интенсивности продувки аргоном жидкого металла различного вида. Значение этого оптимума зависит от конкретных условий реализации технологии.

Этот комплексный подход к подтверждению адекватности разработанной математической модели считаю вполне правомерным.

Пятый раздел содержит результаты теоретического исследования процессов тепломассопереноса в жидком металле во второй период технологии, а также выявление фактора энергоресурсосбережения при интенсификации этих процессов. В этот период лимитирующим звеном тепломассопереноса атомов азота в жидкой ванне является молизионное (кинетическое): $2[N] = \{N_2\}$.

Как показали результаты исследований, в кинетической (молизионной) области лимитирования тепломассопереноса азота в жидком металле на интенсификацию этого процесса самое существенное влияние оказывает площадь межфазной поверхности «аргон-металл»,

которая зависит от интенсивности Ω продувки и диаметра пор продувочного устройства. При значительных Ω это обуславливает высокую производительность установки внепечной обработки металла. При умеренных и малых значениях Ω на производительность этих установок влияет напряженность внешнего электростатического поля, вклад которого возрастет при увеличении напряженности E этого поля.

В экономически развитых странах (Япония, США, Германия) новым перспективным видам воздействия уделяется большое внимание. Это особенно относится к получению ответственных марок металла со сверхнизким содержанием азота для недопущения преждевременного старения изделий. В этом смысле, проведенные автором, по сути фундаментальные исследования в этом разделе весьма актуальны. Ценность этого раздела в том, что получение металла со сверхнизким содержанием азота автор исследует с позиции энергосбережения.

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

1. В работе рассмотрен лишь жидкий металл, в котором азот растворим, но отсутствуют другие газы (водород, кислород), а также нитридные включения.
2. Ввиду сложности электрооборудования высоких напряжений существуют трудности реализации на заводах ДНР практических рекомендаций пятого раздела. На мой взгляд, этот раздел вносит вклад на этом этапе лишь в фундаментальные основы энергосбережения.
3. Недостаточно подробное изложение практических рекомендаций третьего раздела работы по экономии аргона.

Несмотря на изложенные замечания, рецензируемая работа выполнена на высоком теоретическом уровне, имеет в том числе прикладное значение и заслуживает положительной оценки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рецензируемой диссертационной работе решена важная научно-практическая задача, связанная с экономией материальных и энергоресурсов технологии внепечной обработки металлов.

В целом диссертация Тупилко И.В. полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым

к кандидатским диссертациям и паспорту научной специальности, утвержденного постановлением Совета Министров ДНР, а автор работы заслуживает присуждение ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика.

Официальный оппонент:

доцент кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

д.т.н., доцент

286123, ДНР, г. Макеевка,

ул. Державина, 2

+38 (0623) 22-74-71

mailbox@donnasa.ru

http://www.donnasa.org/



Анатолий Яковлевич Бабанин

Подпись д-ра техн. наук, доцента,
доцента кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ГОУ ВПО

«ДОННАСА» заверяю

ВРИО ректора

д.э.н., профессор



В.Г. Севка