

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Кожухова Алексея Александровича  
«Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения  
энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных  
печах», представленной на соискание ученой степени доктора  
технических наук

Исследование процесса вспенивания сталеплавильных шлаков в дуговых печах и оценка его влияния на основные энерготехнологические показатели выплавки является достаточно актуальным, так как сегодня обеспечить устойчивое протекание процесса вспенивания сталеплавильного шлака в дуговых печах на протяжении всей электроплавки достаточно сложно.

На основе проведенных исследований автор разработал новую методику по оценке эффективности вспенивания шлаков в дуговых печах, которая основана на учете основных физико-химических свойствах шлака (вязкости и поверхностное натяжение) и позволяет определить величину необходимого объема вспенивающего газа (приведенный расход газа). Данная методика имеет важное практическое значение.

На основе обобщения проведенных теоретических и экспериментальных исследований автор получил новые положения о протекании процесса вспенивания шлака и его влияния на основные энерготехнологические показатели электроплавки стали:

- описал механизм вспенивания шлака в дуговой печи;
- выявил области различной вспениваемости шлаков в дуговой печи;
- определил, что основными факторами влияющими на эффективность вспенивания шлака являются объем образующегося вспенивающего газа и фактическая температура шлака;
- оценил роль металлизированных окатышей в процессе вспенивания шлаков;
- предложил математическую модель описывающую процесс вспенивания шлака и позволяющую рассчитать предельную высоту вспенивания шлака в зависимости от величины приведённого расхода;
- разработал математическую модель расчёта параметров энерготехнологического режима выплавки стали в дуговой печи;

Практическая ценность научных идей предлагаемых автором состоит в разработке новых рекомендаций направленных на оптимизацию шлакового режима, интенсификацию процессов осаждения пыли в объеме вспененного шлака и повышение энерготехнологических показателей выплавки стали в дуговых печах.

Ознакомление с авторефератом указывает на несомненную научную и практическую значимость работы.

Вместе с тем, из автореферата не совсем понятно как осуществлялось выполнение условий подобия физической модели и реального процесса.

В целом на основании автореферата, можно сказать, что представленная работа представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему и отвечает требованиям Положения ВАК о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности - 05.16.02 Metallургия чёрных, цветных и редких металлов.

Начальник сталеплавильного бюро  
сталеплавильной лаборатории ТУ АО ОЭМК,  
кандидат технических наук



*А.А. Бондарчук*

А.А. Бондарчук

*Алексей Заберино*  
*Михаил из ОЭМК ТУ*

## Отзыв

на автореферат диссертации Кожухова Алексея Александровича на тему: «Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 - «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов»

**1. Актуальность работы.** Современное состояние производства стали в дуговых сталеплавильных печах характерно тем, что в связи с высокими затратами на сырье и энергию необходимо разрабатывать современные энерго- и ресурсосберегающие технологии. Опыт показывает, что применение технологии вспенивания сталеплавильных шлаков позволяет значительно интенсифицировать процесс производства в дуговых печах и повысить эффективность технологии в целом. Автору удалось убедительно доказать, что применением технологии вспенивания шлака можно существенно интенсифицировать электроплавку стали. Это делает работу Кожухова А.А. весьма актуальной и значимой как в научном, так и практическом планах.

**2. Научная новизна работы.** Работа Кожухова А.А. содержит обширный научный материал по исследованию процесса вспенивания сталеплавильных шлаков и его влияния на основные энерготехнологические показатели электроплавки стали. В проведенных автором исследованиях выявлен механизм вспенивания сталеплавильного шлака, предложены способы стабилизации этого процесса, а также обосновано и доказано влияние скорости загрузки металлизированных окатышей в ДСП и их степени металлизации на высоту вспенивания, что позволило спрогнозировать области различной степени вспениваемости шлака. Сформулирован механизм осаждения пыли в объеме вспененного шлака. Разработана научно обоснованная методика оценки способности сталеплавильных шлаков пениться на основе физико-химических свойств шлака. По результатам теоретических и экспериментальных исследований предложены уравнения, позволяющие определить высоту вспенивания шлака в зависимости от степени металлизации окатышей и скорости их загрузки в печь, а также оценить эффективность осаждения пыли в объеме вспененного шлака в зависимости от скорости движения газа, высоты вспененного шлака и размера частиц. Автором предложена математическая модель, описывающая процесс вспенивания сталеплавильного шлака с точки зрения теории перколяции и фракталов. Даны научно обоснованные рекомендации по совершенствованию теплотехнических, энергетических и технологических параметров электроплавки с учётом факторов теплового состояния ванны, высоты вспенивания шлака, параметров загрузки окатышей в печь, позволяющие существенно улучшить технико-экономические показатели и повысить эффективность работы дуговых печей.

Совокупность представленных Кожуховым А.А. в автореферате материалов и результаты проведенных им научных исследований вносят существенный вклад в развитие теории и практики процесса вспенивания сталеплавильного шлака.

**3. Практическая значимость.** Кожуховым А.А. получены результаты являющиеся основой создания современных энерго- и ресурсосберегающих технологий выплавки стали в современных дуговых печах, которые обеспечивают:

- совершенствование шлакового режима дуговой сталеплавильной печи с учётом изменения температуры шлака по ходу электроплавки стали и позволяют поддерживать процесс вспенивания шлака и его устойчивость по ходу и в конце плавки;

- интенсификацию процесса осаждения пыли в объеме вспененного шлака, что позволяет снизить брызгоунос и выносы из зоны продувки, а также повысить выход годной стали;
- энергосберегающий режим электроплавки металлизированных окатышей в объеме вспененного шлака, позволяющий увеличить скорость загрузки окатышей и сократить длительность плавки под током на 1,5 минуты, а также снизить удельный расход электроэнергии в среднем на 0,5%.

Исследования и решения, представленные в работе приняты к использованию в условиях ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» и ОАО «Оскольский завод металлургического машиностроения», что подтверждено актами, а также являются инженерной основой для проектирования и эксплуатации современных дуговых сталеплавильных печей, обеспечивающих более высокие технико-экономические и экологические показатели выплавки стали.

**4. Достоверность приведенных в автореферате данных.** Достоверность результатов проведённых экспериментов доказана воспроизводимостью результатов, в том числе при проверке в условиях действующих производств. Полученные автором данные согласуются с результатами подобных исследований, описанными в современной научно-технической литературе.

**5. Замечания по автореферату.**

Не совсем понятно, каким образом работает представленный алгоритм расчета параметров энерготехнологического режима при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи. Автору следовало бы, более подробно описать предложенный им алгоритм.

**6. Заключение рецензента:**

Диссертационная работа, представленная к защите Кожуховым А.А, является законченной научно-квалификационной работой, соответствует требованиям пункта 9 Положения ВАК Министерства образования и науки России, применяемым к докторским диссертациям, а ее автор Кожухов Алексей Александрович заслуживает присуждения искомой ученой степени – доктора технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов».

Профессор кафедры  
«Металлургии черных металлов»  
Донбасского государственного  
технического университета,  
к.т.н., профессор

Куберский С.В.

Юлия Куберская

С.И. Мисневский



## ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Кожухова Алексея Александровича «Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

Снижение энергоёмкости производства стали в дуговых сталеплавильных печах обуславливает необходимость разработки современных энерго- и ресурсосберегающих технологий. В работе для снижения энергоёмкости производства стали в дуговых печах предлагается применение технологии вспенивания сталеплавильных шлаков, как фактора не только влияющего на энерготехнологические показатели работы дуговой сталеплавильной печи, но и интенсификации процесса выплавки в целом.

В работе на основе исследования процесса вспенивания шлака разработана методика оценки способности сталеплавильного шлака к пенообразованию, позволяющая определить по физико-химическим свойствам шлака необходимую величину приведённого расхода газа, которая обеспечит эффективное вспенивание шлака, что является новаторским решением научной проблемы, имеющей важное теоретическое и практическое значение.

Обобщение теоретических предположений и экспериментальных результатов позволило автору выявить несколько пунктов научной новизны, заключающейся в следующем:

- сформулирован механизм образования вспененного шлака, состоящий из двух стадий:
  - 1) формирование в процессе объёмного обезуглероживания двухфазной области
  - 2) образование в двухфазной области большого количества мелких пузырьков газа, обеспечивающих вспенивание сталеплавильного шлака;
- установлены новые закономерности стабилизации процесса вспенивания шлака, путём регулирования его фактической температуры;
- определены области различной степени вспенивания шлака, которые определяются его физико-химическими свойствами;
- показано, что скорость загрузки металлизированных окатышей в ДСП и их степень металлизации оказывают существенное влияние на процессы вспенивания шлака и получено выражение, позволяющее определить высоту его вспенивания в зависимости от степени металлизации окатышей и скорости их загрузки в печь;
- предложена модель по определению предельной высоты вспенивания шлака, в зависимости от приведённого расхода вспенивающего газа и учитывающая основные параметры, процесса вспенивания шлака (диаметр пузырьков, поверхностное натяжение шлака);
- разработана математическую модель расчёта параметров энерготехнологического режима выплавки стали в дуговой печи, учитывающая основные параметры теплового состояния ДСП, а также влияние массы загружаемых металлизированных окатышей на уровень перегрева шлака и высоту его вспенивания;
- сформулирован механизм осаждения технологической пыли в объёме вспененного шлака и получено выражение для оценки эффективности осаждения технологической пыли в объёме вспененного шлака в зависимости от скорости движения газа, высоты вспененного шлака и размера частиц пыли;

– даны научно обоснованные рекомендации по совершенствованию теплотехнических, энергетических и технологических параметров электроплавки.

Практическая ценность научных идей заключается в том, что разработаны и предложены рекомендации по оптимизации шлакового режима, интенсификации процесса осаждения пыли в объеме вспененного шлака и снижению энергоемкости производства стали в дуговых сталеплавильных печах, которые опробованы и приняты к использованию на отечественных металлургических предприятиях с получением соответствующих подтверждающих документов. Идеи подтверждены патентами РФ.

Ознакомление с авторефератом указывает на несомненную научную и практическую значимость работы.

Вместе с тем, в автореферате не совсем точно обоснована возможность применения положений теории пенообразования в химической промышленности к вспениванию сталеплавильных шлаков.

В заключение следует отметить, что диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные автором, имеют существенное значение для науки и практики. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы. Работа отвечает требованиям Положения ВАК о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности - 05.16.02 Металлургия чёрных, цветных и редких металлов.

Никитченко Т.В. - главный специалист  
отдела планирования и технической экспертизы  
проектов модернизации производства  
Департамента горнорудного производства  
ООО УК "МЕТАЛЛОИНВЕСТ",  
к.т.н. по специальности 05.16.02  
Металлургия чёрных, цветных и редких металлов



# ОТЗЫВ

на автореферат диссертации

**КОЖУХОВА АЛЕКСЕЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА**

на тему «РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ВСПЕНИВАНИЯ  
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА  
СТАЛИ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ» на соискание  
ученой степени доктора технических наук по специальности  
05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов»

Работа соискателя посвящена актуальной научно-технической проблеме – исследованию процесса вспенивания шлака для повышения производительности, энергосбережения, безаварийности и безопасности обслуживания сталеплавильных агрегатов.

Научная новизна работы состоит в установлении роли вспененного шлака на процесс плавки стали в дуговых электропечах, установлении двухстадийного механизма образования вспененного шлака, нахождении закономерности стабилизации процесса вспенивания шлака, разработанной с применением теории перколяции и фракталов модели механизма разрушения вспененного шлака, формулировке механизма осаждения технологической пыли в объёме вспененного шлака. Актуальность работы подтверждена внедрением результатов на ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат» и ОАО «Оскольский завод металлургического машиностроения».

Однако по автореферату имеются отдельные замечания.

1. На с. 14-15 приводится показатель  $K$ , вместе с тем расшифровки этого условного обозначения нет.

2. На с. 30 реферата приводится величина экономии расхода электроэнергии на 1% или 4,62 кВт·ч без объяснения, каким образом эта величина получена из теплового баланса (табл. 4) и за счет каких статей баланса произведена экономия.

3. Непонятна логическая структура алгоритма, приведенного на рис. 12, например по какому условию производится выбор направления после блоков «1. Увеличение силы тока...» и «1. Гетерогенизация шлака ...».

Вместе с тем проделанная автором работа заслуживает безусловно-го внимания, полезна с научной и практической точек зрения. Актуальность, научная новизна и практическая значимость работы КОЖУХОВА АЛЕКСЕЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА несомненны. Результаты диссертации обоснованы на современном научном уровне, представляют собой законченное научное исследование, должным образом опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК, представлены на ряде региональных, международных конференциях.

В целом, на основании автореферата, можно сделать вывод о том, что представленная диссертация отвечает всем требованиям, предъявляемым к работам на соискание учёной степени доктора технических наук, в том числе и требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор КОЖУХОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов».

**Трубаев Павел Алексеевич,**

*доктор технических наук (специальности 05.13.08 – Процессы и аппараты химической технологии и 05.13.11 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов), доцент, профессор кафедры Энергетики теплотехнологии БГТУ им. В.Г. Шухова, тел. +7 910-322-83-91, e-mail: trubaev@gmail.com*

П.А. Трубаев  
10.10.2016г

Подпись Трубаева П.А. удостоверяю

**Проректор по научной работе  
БГТУ им. В.Г. Шухова,  
д-р техн. наук, проф.**



**Е.И. Евтушенко**

*Адрес федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (БГТУ им. В.Г. Шухова): 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.*

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук **Кожухова Алексея Александровича** «Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах», представленной в диссертационный совет Д212.132.02 на базе НИТУ "МИСиС" по специальности 05.16.02 - Metallургия черных, цветных и редких металлов

Диссертационная работа Кожухова А.А. является научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований, представлены современные направления развития научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков. С целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новые, научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие металлургического комплекса РФ.

Это обусловлено, по моему мнению, тем, что исследования, связанные со вспениванием сталеплавильных шлаков, являются безусловно актуальными, поскольку вспененный шлак позволяет снизить тепловые потери с зеркала металла, а также экранировать электрические дуги, что обеспечивает эффективную передачу энергии к металлу. Высота вспененного шлака, а значит и его объем в печи, играет большую роль в предотвращении чрезмерного облучения стеновых панелей и свода электрическими дугами, что способствует повышению технико-экономических показателей работы дуговых сталеплавильных печей.

В части, касающейся **научной новизны** диссертационной работы Кожухова Алексея Александровича, следует отметить, что автором с использованием основных положений теорий фракталов и перколяции, предложена модель "жизненного цикла" вспененного шлака. Как следует из автореферата, указанная модель содержит механизм разрушения вспененного шлака, а также выражение, позволяющее рассчитать предельную высоту вспененного шлака. Полученные результаты позволили автору представить и математическую модель процесса для случая непрерывной загрузки металлизированных окатышей в печь, отличающуюся от аналогов учетом основных параметров теплового состояния ДСП.

Необходимо отметить **практическую значимость**, представленной к

защите работы, заключающуюся в разработке рационального шлакового режима дуговой сталеплавильной печи. Указанный режим позволяет, с учетом изменения температуры шлака по ходу процесса, обеспечивать и поддерживать вспенивание шлака и его устойчивость по ходу и в конце плавки, то есть позволяет влиять на “жизненный цикл” вспененного шлака. Именно с этим, по-видимому, связано то, что, как следует из автореферата, исследования и технологические решения, представленные в работе, приняты к использованию в условиях ПАО “ОЭМК” и ПАО “ОЗММ”.

Основные **научные результаты** диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Количество публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации А.А. Кожухова на соискание ученой степени доктора наук, значительно превышает требования п. 13 Положения ... (30 статей в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 3 монографии и 3 патента).

**Замечания по автореферату диссертации А.А. Кожухова «Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах»:**

**1. На с.9**, строки 3-8 сверху, в разделе “Вторая глава” автор указывает, что для приведения к подобию гидродинамических процессов, протекающих при вспенивании шлака на промышленной ДСП и экспериментальной установке, использовались критерии Архимеда и Вебера. При этом, при обосновании выбора критериев подобия, соискатель утверждает, что “Увеличение критерия Архимеда способствует росту уровня шлака, а увеличение критерия  $We$  – уменьшению уровня шлака”. Вряд ли эти критерии напрямую оказывают влияние на высоту шлака, их назначение – приведение к подобию процессов, протекающих в промышленной и экспериментальной установках.

**2. На с. 19** (последний абзац) **и 20** (первый абзац) в разделе “В третьей главе”, автор указывает “За основу взята модель, дисперсная среда в которой характеризуется тремя четко разделяющимися элементами, а именно, *пленками...., каналами...., узлами*”. При этом в автореферате нет данных о том, что же такое с точки зрения агрегатного/фазового/химического состава эти самые пленки, каналы и узлы. Как они (пленки, каналы и узлы) соотносятся с количеством фаз в системе “Вспененный шлак”? Более того, здесь же автор утверждает, что “Если пренебречь объемом шлака в узлах и *его течением по пленкам (?)*, тогда вспененный шлак будет представлять собой систему ... каналов, имеющих поперечное сечение в *форме треугольника*”. На мой взгляд, положение о “треугольнике” ничем не подтверждено. По-видимому, речь идет

о выбранной автором модели структуры, соотносящейся со структурой дерева Кейли.

**В автореферате имеются неудачные выражения.** Так, например, на с. 9 автореферата в разделе “Вторая глава”, строки 14-17 снизу, указано “При увеличении приведенного расхода газа ... происходит ... *образование газовых “колоколов”* ... и *переход к “снарядному” режиму* барботирования. Скорее к взрывному, неконтролируемому. При этом из этого текста следует, что именно образование “колоколов” вызывает взрывное/неконтролируемое барботирование. Но, так ли это?

Снижающим восприятие представленных в автореферате данных является, по моему мнению, использование несогласованных единиц измерений (стр. 9). Так, например, расход воздуха дан в (л/ч) , а приведенный расход газа в ( $m^3/m^2 \cdot мин$ ).

Тем не менее, несмотря на имеющиеся замечания по автореферату, считаю, что **диссертационная работа** «Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах» по содержанию, научной и практической значимости полученных результатов **соответствует требованиям** действующего «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор **Кожухов Алексей Александрович заслуживает присуждения** степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 - Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Доктор технических наук, ст. научн. сотр.,  
заведующий кафедрой ТКМ ДГТУ  А.Ю.Кем  
05-09-16

Почтовый адрес: 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1,  
ФГБОУ ВО Донской государственной технической университет.  
Тел. +78632381397; E-mail: [akem@dstu.ru](mailto:akem@dstu.ru)

Подпись А.Ю. Кема заверяю.  
Ученый секретарь Ученого Совета,  
канд. техн. наук, доцент



## **ОТЗЫВ**

**на автореферат диссертации КОЖУХОВА Алексея Александровича «Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 - Metallургия черных, цветных и редких металлов**

Работа Кожухова А.А. посвящена решению актуальной проблемы повышения энергоэффективности и экономии ресурсов при производстве стали в дуговых сталеплавильных печах и находится в русле современных научных исследований и разработок, активно ведущихся в металлургической отрасли.

Текст автореферата создает впечатление о работе как о завершенном произведении, имеющем теоретическую направленность, обладающем внутренним единством, содержащем новые научные результаты и свидетельствующем о личном вкладе автора диссертации в науку.

По тексту автореферата имеются следующие замечания и вопросы:

1. Материалы, представленные в автореферате, не позволяют в полной мере оценить заявленное «развитие научных основ вспенивания...» в сравнении с другими известными решениями.
2. Текст автореферата не соответствует требованиям п.9.2.1 ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления». В частности, в общей характеристике работы отсутствуют такие структурные элементы, как степень разработанности темы исследования; теоретическая значимость работы; методология и методы исследования; положения, выносимые на защиту, на наш взгляд, необходимые для получения полного представления о диссертации. В этой связи остается вопрос о том, насколько четко соискателем выполняется п. 24.1 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», введенный Приказом Минобрнауки России от 09.12.2014 № 1560.
3. В автореферате отсутствует какая-либо информация о фактически полученном или хотя бы ожидаемом экономическом эффекте от внедрения разработок, который свидетельствовал бы о повышении энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах, заявленном в теме диссертации. К сожалению, нет и конкретных рекомендаций по использованию полученных научных выводов, обязательных для диссертации, имеющей теоретический характер.
4. Выводы по диссертации, изложенные на стр. 35-37 автореферата, выглядят излишне детализированными и необоснованно многочисленными, в большей степени соответствующими кандидатской, а не докторской диссертации.
5. Не понятно, какое отношение к теме работы имеет целый ряд публикаций автора, заявленных в качестве «основных по теме диссертации». В частности, речь идет о пп. 1-7, 9-11, 15-17, 20, 26-27 на стр. 37-39 автореферата, монографиях пп. 1-2 и патенте п. 1 на стр. 40 автореферата, пп. 1-20 на стр. 40-42 автореферата. Ведь они касаются не электродуговой плавки, а конвертерного процесса.

Тем не менее при ознакомлении с текстом диссертации (в дополнение к автореферату) некоторые из замечаний снимаются, что все же позволяет сделать вывод о том, что перед нами научно-квалификационная работа, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

Это, в свою очередь, дает право положительно оценить работу Кожухова А.А. как в целом соответствующую требованиям ВАК Минобрнауки РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, в частности, п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а автора считать заслуживающим ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 - Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Заведующий кафедрой  
«Металлургические  
технологии и оборудование»  
ФГБОУ ВО  
«Нижегородский  
государственный  
технический университет  
им. Р.Е. Алексеева», доктор  
технических наук,  
профессор

Леушин Игорь Олегович

30.08.2016 г.

603050, ГСП-41, Нижний Новгород, ул. Минина, дом 24,  
тел. (831) 436 43 95, E-mail: mto@nntu.nnov.ru



## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Кожухова Алексея Александровича  
«Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью  
повышения энерготехнологических показателей производства стали в  
дуговых сталеплавильных печах»,  
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Поставленная в диссертационной работе задача снижения энергоемкости и повышения эффективности дуговых печей, безусловно, является очень актуальной. Для решения этой задачи автор выбрал одно, на первый взгляд, казалось бы, достаточно узкое направление исследований – вспенивание сталеплавильных шлаков. Но как показывает анализ работы, автор подошел к этой задаче системно, связав состояние вспененного шлака со всеми основными технологическими параметрами. В работе представлен большой объем исследований: статистический анализ, прямые измерения (в том числе толщины и состава шлака, что само по себе представляет значительный интерес), физическое моделирование с использованием критериев подобия и, наконец, создание математических моделей.

Наибольший научный и практический интерес в работе представляют следующие результаты:

- раскрытие механизма вспенивания и возможности поддержания шлаков во вспененном состоянии с учетом влияния состава шлака, температуры металла и шлака, скорости обезуглероживания, а также темпа подачи металлизированных окатышей;
- математическая модель и результаты расчета степени использования мощности дуг в зависимости от степени экранирования их шлаком и угловых коэффициентов излучения;
- модель и алгоритм расчета параметров энерготехнологического режима, с учетом поддержания уровня вспененного шлака и темпа подачи окатышей;
- математическая модель и представленная на рис. 12 зависимость осаждения частиц в слое шлака от числа Рейнольдса для частиц разного диаметра;
- математическое описание структуры и механизма разрушения вспененного шлака с использованием теории фракталов.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. Автор уделил большое внимание анализу парных зависимостей (рис.3), на наш взгляд, более обоснованно тесноту связей можно было бы описать в виде множественной корреляции или регрессии, поскольку, как видно на рис.3, эти зависимости имеют значительный разброс данных, что объясняется, прежде всего, одновременным влиянием других факторов. Например, криволинейная аппроксимация данных зависимости толщины вспененного шлака от содержания СаО в шлаке (рис.3б) может быть подвергнута сомнению.
2. Подрисуночные подписи на рис.2 вводят в заблуждение: на рисунке обозначено, что 1,2,3 – это режимы, а в подрисуночной подписи это зоны.

Работа, направленная на решение важной народнохозяйственной задачи, представляет значительный теоретический и практический интерес, отвечает требованиям предъявленным «Положением о присуждении ученых степеней» к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор Кожухов Алексей Александрович заслуживает присуждение ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов».

Профессор кафедры  
«Прикладные информационные технологии  
и программирование»  
Сибирского государственного индустриального  
университета, доктор технических наук  
Заслуженный деятель науки РФ.

В.П. Цымбал

654007 Российская Федерация, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
E-mail: [tsybala33@mail.ru](mailto:tsybala33@mail.ru)

Подпись профессора Цымбала В.П.  
удостоверяю  
начальник отдела кадров



Т.А. Дрепина

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Кожухова Алексея Александровича «Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Тема диссертационной работы актуальна. Повышение производительности, энергосбережения дуговых сталеплавильных печей весьма актуально. Работа обладает научной новизной и практической значимостью. Теоретически и экспериментально обоснована роль вспененного шлака в процессе интенсификации плавки стали в электропечах, раскрыт механизм вспенивания, установлено влияние состава шлака на показатели его вспенивания. Разработан рациональный шлаковый режим, энергосберегающий режим электроплавки металлизированных окатышей в объеме вспененного шлака.

По работе имеется следующее замечание. В табл. 3, стр. 28 автореферата указано, что при полном экранировании дуги шлаком можно получить коэффициент использования тепла дуги 0,99. В действительности вследствие электромагнитного выдувания даже при полном визуальном погружении в шлак и углубление в металле дуга выбрасывает шлак из углубления, частично открываясь и коэффициент использования тепла дуги снижается до  $0,8 \div 0,85$ . Выше значения 0,85 без устранения электромагнитного выдувания коэффициент использования тепла электрической дуги недостижим.

Сделанное замечание не снижает в целом высокий уровень работы.

Диссертационная работа «Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах» соответствует требованиям ВАК Российской Федерации, а ее автор Кожухов Алексей Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Доктор технических наук, профессор  
заведующий кафедрой Электроснабжения  
и электротехники ФГБОУ ВПО «Тверской  
государственный технический университет»

*Макаров*

12.09.2016.

А.Н. Макаров

Макаров Анатолий Николаевич  
170026, г.Тверь, наб. Афанасия  
Никитина, 22, ТвГТУ  
пел/факс 8 (4822) 78-83-17  
E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru



*Макаров А.Н.*  
СЕКРЕТАРЬ  
Секретарь Совета  
Тверского государственного  
технического университета

## О Т З Ы В

на автореферат диссертации Кожухова Алексея Александровича «Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Работа Кожухова А.А. направлена на повышение производительности и энергосбережения при выплавке стали в ДСП, что совпадает с направлением развития черной металлургии в России. В связи с этим актуальность проблемы, решаемой в диссертации, не вызывает сомнения.

С целью решения этой проблемы в данной работе выполнены:

- комплекс исследований по системному изучению всех процессов, связанных с процессом вспенивания шлака при выплавке стали в ДСП,;
- развитие научных основ теории вспенивания;
- совершенствование и оптимизация технологии выплавки стали в ДСП, обеспечивающей повышение производительности и энергосбережения.

При выполнении работы получены следующие результаты:

1. Установлены закономерности процесса вспенивания в зависимости от состава шлака и его физических свойств, температуры металла и шлака, темпа подачи металлизированных окатышей и их физико-химических свойств.
2. На основе теории перколяции и фракталов разработана математическая модель, описывающая процесс вспенивания шлака, с использованием которой получена формула для расчета предельной высоты вспенивания с учетом основных параметров процесса (диаметра пузырьков, поверхностного натяжения шлака и др.)
3. Разработана комплексная методика расчета параметров электротехнологического режима выплавки стали в ДСП, отличающаяся от известных тем, что включает указанную формулу для

расчета высоты вспенивания и учитывает основные параметры теплового состояния ДСП при использовании металлизированных окатышей.

4. Установлены закономерности осаждения технологической пыли в объеме вспененного шлака.
5. На основе результатов исследований разработаны рекомендации по совершенствованию теплотехнических, энергетических и технологических параметров плавки, которые позволяют существенно улучшить технико-экономические показатели и повысить эффективность работы других печей.

Полученные результаты доложены и обсуждены на многочисленных международных, всероссийских и региональных научно-практических конференциях, а также на IX и XIII международных конгрессах сталеплавателей, прошедших с 1999г. по 2014г. Общее количество мероприятий составило 17.

Результаты исследований широко опубликованы в 3 монографиях, в 30 журналах из списка ВАК, 3 патентах и 27 публикациях в других изданиях.

Внедрение результатов исследования обеспечивает повышение производительности ДСП до 10%, снижение удельного расхода электроэнергии на 0,5% и снижение выноса крупной пыли до 90%.

По автореферату диссертационной работы имеются замечания:

1. Не приведены данные по достоверности использованных методик расчета и эксперимента в виде численных значений погрешностей. Например: погрешность методики измерения высоты вспененного шлака.
2. Учитывая, что температура шлака на площади металла неравномерна при работе электрических дуг, а высота вспенивания зависит от температуры шлака через вязкость, можно предположить, что высота вспенивания будет различна по площади металла. Так ли это и насколько это существенно?
3. На рис.8 (стр.22 ) приведены результаты расчета по формуле (9) в виде зависимости толщины шлака от приведенного расхода газа. Однако в формуле (9) на первый взгляд нет величины полной толщины шлака и расхода газа. Как же был выполнен расчет?

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы.

Диссертационная работа Кожухова А.А. представляет собой единое завершённое исследование, в котором решена крупная научно-техническая проблема. Объём полученных новых научных результатов и их практическая значимость отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор Кожухов Алексей Александрович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02-металлургия черных, цветных и редких металлов.

Профессор кафедры металлургии,  
машиностроения и технологического  
оборудования Череповецкого  
Государственного университета,  
д.т.н., профессор, действительный член  
Российской и Европейской Академий Естествознания



З.К.Кабаков



## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации *Кожухова Алексея Александровича*

«Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 - «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов»

Снижение энергоемкости производства стали в дуговых сталеплавильных печах определяет необходимость разработки отвечающих новому уровню развития науки и техники энерго- и ресурсосберегающих технологий. Одним из перспективных направлений интенсификации процесса выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах является применение технологии вспенивания шлака. С учетом высокой энергоемкости производства стали в дуговых сталеплавильных печах, эффективность применения технологии вспенивания шлака экономически целесообразна. Вместе с тем, процесс вспенивания сталеплавильного шлака в дуговых сталеплавильных печах изучен недостаточно. Не единого мнения о наиболее ключевом факторе влияющем на развитие процесса вспенивания шлака. На этом основании тема исследований А.А. Кожухова актуальна как в научном, так и прикладном отношении.

Научные положения и выводы работы А.А. Кожухова основаны на результатах разнообразных экспериментов. Это позволяет рассматривать результаты диссертации как достоверные и обоснованные.

Научная новизна работы диссертанта состоит в следующем:

- установлен механизм образования вспененного шлака состоящий из двух стадий: 1) формирование в процессе объёмного обезуглероживания двухфазной области; 2) образование в двухфазной области большого количества мелких пузырьков газа, обеспечивающих вспенивание сталеплавильного шлака;
- установлены новые закономерности стабилизации процесса вспенивания шлака, путём регулирования его фактической температуры;
- предложена новая методика оценки способности сталеплавильного шлака к пенообразованию, позволяющая определить по физико-химическим свойствам шлака необходимую величину приведённого расхода газа;
- показано, что скорость загрузки металлизированных окатышей в ДСП и их степень металлизации оказывает существенное влияние на процессы вспенивания шлака и представлено уравнение, позволяющее определить высоту его вспенивания в зависимости от степени металлизации окатышей и скорости их загрузки в печь;
- с применением теории перколяции и фракталов предложена модель позволяющая рассчитать предельную высоту вспенивания шлака, в зависимости от приведённого расхода вспенивающего газа и учитывающее основные параметры, определяющие процесс вспенивания шлака;
- разработана математическая модель расчёта параметров энерготехнологического режима выплавки стали в дуговой печи, которая учитывает основные параметры теплового состояния ДСП и влияние массы загружаемых металлизированных окатышей на уровень перегрева шлака и высоту вспенивания шлака;
- сформулирован механизм осаждения технологической пыли в объёме вспененного шлака и получено уравнение позволяющее оценить эффективность осаждения технологической пыли в объёме вспененного шлака в зависимости от скорости движения газа, высоты вспененного шлака и размера частиц.

Практическое значение работы А.А. Кожухова вполне очевидно и заключается в том,



## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Кожухова Алексея Александровича на тему:  
«Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков  
с целью повышения энерготехнологических показателей производства стали  
в дуговых сталеплавильных печах»,  
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

**1. Актуальность работы.** Обеспечение эффективного развития отечественной электрометаллургии на основе создания перспективных энерго- и ресурсосберегающих технологий является сегодня одной из актуальных задач. Одним из перспективных направлений способствующих снижению энергетических затрат в дуговых сталеплавильных печах является применение технологии вспенивания сталеплавильного шлака. Изучение такого сложного процесса, как вспенивание сталеплавильного шлака и его влияния на основные энерготехнологические показатели электроплавки определяет высокую актуальность данной работы.

**2. Научная новизна работы** заключается в следующем в

- установлены технологические параметры, влияющие на вспенивание шлака и раскрыт механизм вспенивания который состоит из двух стадий;
- показана зависимость вспениваемости шлака от его состава и физических свойств, температуры металла и шлака, а также от темпа подачи металлизированных окатышей, в том числе с учётом их физических и химических параметров;
- сформулированы новые закономерности стабилизации процесса вспенивания шлака, путём регулирования его фактической температуры;
- предложена новая методика оценки способности сталеплавильного шлака к пенообразованию, позволяющая определить по физико-химическим свойствам шлака необходимую величину приведённого расхода, обеспечивающую эффективное вспенивание шлака;
- на основе теории фракталов и перколяции, получено выражение, позволяющее рассчитать предельную высоту вспенивания шлака, в зависимости от приведённого расхода вспенивающего газа и учитывающее основные параметры, определяющие процесс вспенивания шлака (диаметр пузырьков, поверхностное натяжение шлака, коэффициент характеризующий структуру вспененного шлака  $k_1=15$ );
- даны научно обоснованные рекомендации по совершенствованию теплотехнических, энергетических и технологических параметров электроплавки с учётом факторов теплового состояния ванны, высоты вспенивания шлака, параметров загрузки окатышей в печь, позволяющие существенно улучшить технико-экономические показатели и повысить эффективность работы дуговых печей.

**3. Практическая значимость работы** состоит в следующем:

- предложен рациональный шлаковый режим дуговой сталеплавильной печи с учётом изменения температуры шлака по ходу процесса, позволяющего обеспечить поддержание процесса вспенивания шлака и его устойчивость по ходу и в конце плавки;

- предложены мероприятия по интенсификации процесса осаждения пыли в объёме вспененного шлака, которые позволяют снизить брызгоунос и вынос технологической пыли из зоны продувки и повысить выход годной стали;
- предложен энергосберегающий режим электроплавки металлизированных окатышей в объёме вспененного шлака, что позволит увеличить скорость загрузки окатышей и сократить длительность плавки под током на 1,5 минуты, а также снизить удельный расход электроэнергии в среднем на 0,5%.
- Новизна технических решений, предложенных автором, подтверждена 2 патентами РФ.

#### **4. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Теоретические положения и практические рекомендации логично вытекают из фактического материала и полностью соответствуют цели диссертационной работы. Выводы по работе содержательны и отвечают на поставленные задачи исследования. Практические рекомендации, базирующиеся на полученных результатах, конкретны и обоснованы.

#### **5. Достоверность приведенных в автореферате данных.**

Достоверность проведённых экспериментов доказана опытом полупромышленных испытаний. Полученные автором данные согласуются с подобными исследованиями, описанными в литературе. По теме диссертации опубликовано 62 работы, в том числе 3 монография, 30 - в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, оформлены 2 патента РФ.

#### **6. Замечания и рекомендации.**

При исследовании процесса вспенивания сталеплавильного шлака автор прибегает к холодному моделированию. Однако при описании методики холодного моделирования, недостаточно полно описывается, каким образом осуществлялось подобие процессов на реальном агрегате и модели.

#### **7. Заключение рецензента:**

Диссертационная работа Кожухова А.А. является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям пункта 9 Положения ВАК Минобрнауки России, применяемым к докторским диссертациям, а автор диссертации заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 - Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Ведущий научный сотрудник отдела магнитной гидродинамики  
Физико-технологического института металлов  
и сплавов НАН Украины, профессор, доктор технических наук,  
Заслуженный деятель науки и техники Украины  
адрес: Украина, 03680, Киев-142, ГСП,  
Бульвар Академика Вернадского, 34/1;  
телефон 380-50-4722746;  
e-mail: [stalevoz@i.ua](mailto:stalevoz@i.ua)



Смирнов Алексей Николаевич

*Подпись А.Н. Смирнова* *удостоверено*

Ученый секретарь ФТИМС НАН Украины *В.Л.* Лахненко В.Л.