

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор, проректор по  
научной и инновационной работе  
и в техн. наук профессор М.В. Чукин



10 октября 2016г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФБГОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет  
им. Г.И. Носова» о 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

Вспенивание шлака является стандартным элементом технологии выплавки стали в современных дуговых электропечах, позволяющим получить закрытую шлаком электрическую дугу, что ведет к более полному использованию её тепловой энергии и, следовательно, и улучшению всех технико-экономических показателей процесса. Такую значимость вспенивание шлака получило относительно недавно, когда электрическая мощность дуговых сталеплавильных печей существенно возросла.

Проблема вспенивания шлака на отдельных металлургических предприятиях возникала постепенно, по мере ввода в эксплуатацию мощных дуговых электросталеплавильных печей. Решалась она опытным путем и на разных металлургических предприятиях выработанные способы вспенивания шлака являются в разной степени эффективными. Поэтому тема рецензируемой диссертационной работы, посвященной разработке эффективных способов вспенивания шлака при выплавке стали в современных мощных дуговых печах, является актуальной.

Вообще говоря, вспенивание уже давно используется в разных технологических процессах: обогащении полезных ископаемых, производстве строительных и теплоизоляционных материалов и др. На базе этих процессов создана общая теория пенообразования, базирующаяся на законах физики и физической химии и имеющая развитый математический аппарат.

Вопросы вспенивания шлака не являются новыми и для металлургии черных металлов. Так, этому вопросу уделялось значительное внимание в теплотехнике мартеновского процесса, причем здесь стояла обратная задача – устранение пенообразования.

Как в прежних, так и в современных исследованиях пенообразования сталеплавильных шлаков доминировал чисто технологический подход: рассматривалось влияние на пенообразование различных технологических факторов. Какие-либо попытки рассмотреть вспенивание сталеплавильных шлаков на основе общей теории пен или общих законов физики и физической химии нам не известны.

Рецензируемая диссертационная работа является первой крупной работой, в которой такая попытка сделана. Наиболее интересной представляется глава 2, в которой изложены результаты экспериментального исследования вспенивания шлака в 150-тонной дуговой сталеплавильной печи. Её материалы существенно расширяют представления металлургов о механизме вспенивания шлака, физических и физико-химических процессах появления и разрушения шлаковой пены. На их основе в главе 3 описывается математическая модель шлакообразования, позволившая расчетным путем проанализировать влияние некоторых технологических факторов на устойчивость пены.

Вопросы вспенивания шлака рассмотрены в связи с другими аспектами выплавки стали в дуговых печах – теплообменом в рабочем пространстве печи, плавлением металлической шихты и пылеобразованием. Следует отметить, что в лабораторных условиях проведено физическое моделирование вспенивания шлака. Этот метод исследования редко используется в настоящее время.

Материалы этих глав рассматриваемой диссертации несомненно имеют ценность для теории шлакообразования при выплавке стали в дуговых печах.

Ценность рецензируемой диссертационной работы для практики сталеплавильного производства состоит в разработке способа получения устойчивой шлаковой пены в дуговой сталеплавильной печи путем непрерывной загрузки в неё металлизированных железорудных окатышей. Этот технологический прием разработан для специфических условий ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат». Однако его основную идею можно рекомендовать для использования (после определенной доработки) в электросталеплавильных цехах металлургических предприятий, имеющих современные высокопроизводительные дуговые печи, в том числе в ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ОАО «Северсталь», ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат», ОАО «Серевский металлургический завод» и др.

Положительно оценивая рецензируемую работу в целом, по её содержанию необходимо сделать следующие основные замечания.

1. Название диссертации сформулировано неудачно. Общая оценка характера работы «Развитие научных основ вспенивания сталеплавильных шлаков» плохо увязывается с объявленной далее сугубо прикладной целью – повышением «энерготехнологических показателей производства стали в дуговых сталеплавильных печах». Анализ содержания работы показывает, что в ней доминируют прикладные вопросы совершенствования технологии плавки стали в ДСП, к ним же относятся основные научные результаты, указанные в общих выводах по работе. Так, из 18-ти выводов 13 относятся к вопросам технологии вспенивания шлака в ДСП. Рассмотрение процесса вспенивания связано, в основном, с научным обоснованием способов вспенивания шлака при выплавке стали в ДСП в довольно специфических условиях ОАО «Оскольский электрометаллургический комбинат».

2. Как следует из таблицы 2.2 (с. 75), при физическом моделировании вспенивания шлака с использованием воды в качестве моделирующей жидкости, подобие обеспечивалось равенством отношения критериев

Архимеда и Вебера. Обосновывается такое решение (с. 73) следующим образом: «Увеличение критерия Архимеда ( $Ar'$ ) способствует росту уровня шлака, а увеличение критерия ( $We$ ) – уменьшению уровня шлака». Это соображение нельзя принять за достаточное обоснование подобия вспенивания в сталеплавильных процессах и в модели. Поэтому результаты проведенного моделирования можно принять лишь как приближенную и чисто качественную картину вспенивания шлака в реальном агрегате.

3. На рисунке 2.6 (с. 79) приведены данные моделирования увеличения высоты слоя шлака в зависимости от приведенного расхода газа. Опытные точки расположены, в основном, значительно ниже линии тренда, но указан очень большой, близкий к единице ( $R^2 = 0,9634$ ) и явно ошибочный коэффициент аппроксимации. Это вызывает некоторую неуверенность в качестве статистической обработки данных и на других рисунках, например рисунках 2.1 или 2.2.

4. В пункте 2.4 при рассмотрении способов стабилизации вспененных шлаков диссертант определяет расчетом на основе полимерной теории температуру ликвидус и степень гетерогенности шлаков, химический состав которых приведен в таблице 2.8. Простой расчет по данным этой таблицы показывает, что во всех шлаках соотношение атомов кислорода и кремния значительно больше 4. Как известно, в таких шлаках все кремнекислородные тетраэдры находятся в «островном» состоянии и не объединяются в какие-либо полимероподобные комплексы. Никак не отвергая возможность перехода шлаков в гетерогенное состояние, следует указать, что использование полимерной теории даже для приблизительной оценки структуры и свойств подобных шлаковых расплавов методически ошибочно, тем более, что какой-либо экспериментальной проверки результатов расчета в диссертации нет. Здесь можно заметить, что температуру ликвидус шлаков следовало экспериментально определить каким-либо известным способом, например, термографическим, а фазовое состояние шлаков при рабочей температуре оценить по диаграммам состояния многокомпонентных

оксидных систем. «Атлас шлаков», содержащий такие диаграммы, в списке литературы указан под номером 127.

5. В общих выводах по работе на с. 303 и ранее в тексте, указаны пределы изменения содержания важнейших компонентов – оксидов кальция, кремния, магния и железа – в трех группах шлаков с разной способностью вспениваться. Сумма минимальных значений этих пределов в каждой группе шлаков составляет 96-98%, а средние и, тем более, максимальные значения «зашкаливают» за 100%. При этом во всех шлаках, как следует из упоминавшейся уже таблицы 2.8, в заметном количестве (более 5%) присутствуют ещё и оксиды других элементов.

6. Хотя диссертация написана хорошим языком, в ней встречаются неточности и неудачные предложения. Например, на с. 7 говорится, что в нашей стране энергоёмкость сталеплавильного производства в 1,5 раза выше, чем в Западной Европе, а по приведенным здесь же цифрам различие получается существенно меньше – 1,24. Подпись к рисунку 2.6 (с. 79): «Зависимость относительного увеличения уровня жидкости от приведенной скорости газа», а оси графика совсем другая по физическому смыслу величина «Приведенный расход газа,  $\text{м}^3/\text{м}^2$  мин». Ещё одна подпись к рисунку 6.2.11 (с. 296): «Зависимость ... в зависимости от ...». Такие недостатки создают впечатление о некоторой небрежности в оформлении рукописи.

Сделанные замечания относятся к отдельным деталям обсуждаемой диссертационной работы, не связаны с изложенными в ней основными научными результатами, не меняют общего положительного впечатления от работы в целом и не ставят под сомнение квалификацию её автора.

#### Общее заключение

Диссертация А.А. Кожухова является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технологические решения по выплавке стали в дуговых печах, заключающиеся в использовании металлизированных окатышей для вспенивания шлака и получения устойчивой шлаковой пены,

изолирующей электрическую дугу от свободного пространства печи. Эти решения сокращают длительность плавки, снижают расход электроэнергии и уменьшают выделение пыли, что имеет существенное значение для металлургической промышленности страны.

Диссертация соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор Кожухов Алексей Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Металлургия черных, цветных и редких металлов.

Диссертационная работа и отзыв о ней обсуждены на заседании кафедры технологий металлургии и литейного производства 5 октября 2016г., протокол №3.

Заведующий кафедрой ТМиЛП  
профессор д-р техн. наук



К.Н. Вдовин

455000, г. Магнитогорск,  
пр. Ленина, 38, к. 156а  
Тел.: 8(3519) 29-44-19

## СВЕДЕНИЯ о ведущей организации

| Полное наименование организации,<br>сокращенное наименование организации                                                                                                                         | Место<br>нахождения<br>(страна, город)     | Почтовый адрес (индекс,<br>город, улица, дом),<br>телефон, адрес электронной<br>почты, адрес официального<br>сайта в сети "Интернет"                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Федеральное государственное бюджетное<br>образовательное учреждение высшего<br>образования «Магнитогорский<br>государственный технический<br>университет им. Г.И. Носова<br>МГТУ им. Г.И. Носова | Российская<br>федерация<br>г. Магнитогорск | 455000, г. Магнитогорск,<br>проспект Ленина, 38.<br>Тел. 8(3519) 29-84-02<br>факс: +7 (3519) 23-57-59<br><a href="mailto:mgtu@mgtu.ru">mgtu@mgtu.ru</a><br><a href="http://www.mgtu.ru">http://www.mgtu.ru</a> |

Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций):

1. Бигеев, В.А. Столяров А.М., Валиахметов А.Х. Металлургические технологии в высокопроизводительном электросталеплавильном цех: учеб. пособие / В.А. Бигеев, А.М. Столяров, А.Х. Валиахметов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – 308 с.
2. Бигеев, В.А. Окисленность шлака современной дуговой сталеплавильной печи / В.А. Бигеев, А.Е. Малофеев, А.В. Пантелеев и др. // Черная металлургия, №2. – 2011. – С. 22-25.
3. Бигеев, В.А. Регулирование окисленности шлака по ходу плавки современной дуговой сталеплавильной печи / В.А. Бигеев, А.Е. Малофеев, А.В. Пантелеев и др. // Черные металлы: Спец. выпуск. – М.: Изд. «Руда и металлы». 2011. – С. 34-36.
4. Бигеев, В.А. Оценка энергоемкости стали, выплавляемой в дуговых сталеплавильных печах / В.А. Бигеев, В.Н. Михайловский, Е.Б. Агапитов, М.С. Каблукова // Электрометаллургия, №9. – 2011. – С. 17-18.
5. Бигеев, В.А. Оценка влияния нечетко контролируемых параметров на десульфурацию в АКП / В.А. Бигеев, Е.Б. Агапитов, М.А. Лемешко // Электрометаллургия, №11. – 2013. – С. 7-8.
6. Тахаутдинов, Р.С. Моделирование предварительного подогрева лома в ДСП с шахтным подогревателем / Р.С. Тахаутдинов, В.А. Бигеев, Д.Р. Тухватулин, А.Н. Федянин // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. Вып. 11 – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», 2011. – С. 45-48.
7. Bigeev, V.A. Using production wastes in electros slag remelting / V.A. Bigeev, S.N. Berdnikov, A.S. Berdnikov et al // Steel in Translation. – 2011. – Issue 41 (5). – pp. 22-25.
8. Бигеев, В.А. Окисленность шлака современной дуговой сталеплавильной печи / В.А. Бигеев, А.Е. Малофеев, А.В. Пантелеев и др. // Черная металлургия, №6. – 2013. – С. 22-25.
9. Бигеев, В.А. Анализ выплавки стали в современных ДСП с использованием различных видов альтернативного сырья / В.А. Бигеев, А.Х. Валтахметов, Ю.А. Колесников, А.Н. Федянин // Черная металлургия, №1. – 2014. – С. 36-37.
10. Бигеев, В.А. От двухвального сталеплавильного агрегата к агрегатам типа Conarc / В.А. Бигеев, Ю.А. Колесников, И.А. Агзамов // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XVI Международной конференции / под ред. В.Е. Рощина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Ч. 1. – С. 35-40.

Ученый секретарь Диссовета Д 212.111.01

*В.Н. Селиванов* В.Н. Селиванов

