



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

**Институт новых материалов
и технологий**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ).
Институт новых материалов и технологий.

ул. Мира, 28, Екатеринбург, Россия, 620002,
тел./факс: +7 (343) 374-53-35, +7 (343) 375-44-39
e-mail: inmt@urfu.ru, urfu.ru

10.04.2024 № 33.20-32/95

На № _____ от _____

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Саитгараева Альберта Ахметгареевича «Совершенствование технологических режимов производства электротехнической изотропной стали с особонизким содержанием углерода и серы», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

Разработка и применение магнитомягких материалов с пониженными удельными магнитными потерями для магнитопроводов в электромашиностроении остается одним из основных способов энергосбережения. В настоящее время наиболее распространенными материалами для изготовления магнитопроводов электрических машин (генераторов, электродвигателей, преобразователей частоты) являются электротехнические изотропные стали (ЭИС). Использование данной стали позволит обеспечить техническую, технологическую и энергетическую безопасность Российской Федерации.

Известно, что уровень магнитных свойств ЭИС определяется содержанием основных легирующих элементов: Si и Al, а также количеством вредных примесей, таких как C, S, N, O, Ti, В и др. Уменьшение количества вредных примесей, таких как Cr, Ni, Cu. В ПАО «НЛМК» при производстве электротехнической изотропной стали решается просто - путем задачи в металлошихту горячебрикетированного железа. Однако отдельного внимания заслуживают вопросы поведения в металле таких элементов как углерод и сера

Актуальность работы.

Еще 30–40 лет назад к содержанию углерода предъявляли требования – не более 0,01 %, на рубеже 20 лет – не более 0,005 %, на сегодняшний день – не более 0,003 %, а в перспективе ожидается, что требования по углероду будут еще ниже. Аналогичная ситуация наблюдается по содержанию серы – не более 0,015 %. Ограничения, которые возникали при практическом производстве были связаны с технологическими и организационными проблемами, например, анализ возможности фиксации низких значений углерода и серы (отсутствие методик), которые бы позволили с достаточной достоверностью получать требуемые содержания данных элементов.

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»
за № _____
Дата регистрации <u>23.04.2024</u>
Фамилия регистратора _____

Особо остро стоит вопрос по обеспечению в готовой стали содержания углерода и серы на уровне не более 0,002 %. При этом помимо теоретического обоснования возможности достижения указанных величин необходимо удостовериться, что используемые в ПАО «НЛМК» установки могут обеспечить требуемые режимы, обоснованные термодинамикой и кинетикой процессов глубокого рафинирования. Возникает ряд вопросов, связанных как с очищением металла от этих примесей, так и с исключением, либо по крайней мере, со снижением попадания их в металл, когда рафинирование расплава уже закончено и осуществляется этап раскисления, доводка расплава до требуемого химического состава. Таким образом, представленная диссертационная работа, посвященная теоретическому и экспериментальному обоснованию режимов рафинирования металлического расплава от вредных примесей с использованием агрегатов ковшевой обработки стали: агрегата «ковш-печь» (АКП), агрегата циркуляционного вакуумирования (АЦВ) и установки доводки металлов (УДМ) до уровня по содержанию углерода менее 0,003 % и серы менее 0,002 % в готовой стали, и их внедрению на ПАО «НЛМК», позволяющих стабильно получать ЭИС с заданными магнитными свойствами, несомненно **является актуальной**.

К научной новизне диссертационной работы следует отнести следующее:

1. Установлена приоритетная значимость факторов, влияющих на процесс глубокого обезуглероживания металла при рафинировании в циркуляционном вакууматоре, а именно: начальной окисленности системы «металл-шлак», начальной температуры металла, интенсивности подачи транспортирующего газа. Показано, что на перечисленные факторы, на основе многомерного регрессионного анализа (МРА), приходится 65-75 % значимости от всех факторов, обеспечивающих получение углерода в металле менее 0,002 %. Установлено, что обезуглероживание металла, при содержании углерода менее 0,005 %, контролируется кинетическими параметрами, а именно: увеличением поверхности раздела «металл-газовая фаза», что достигается переходным режимом истечения аргона от струйного к пузырьковому за счет снижения интенсивности подачи транспортирующего газа (в рассматриваемых условиях) с $140 \text{ м}^3/\text{ч}$ до $80 \text{ м}^3/\text{ч}$.

2. Установлен механизм десульфурации металла с использованием одношлакового режима (без смены окислительного и наведения восстановительного шлака) при производстве высококремнистой стали типа ЭИС, при этом снижение окисленности шлака и повышение его сульфидной емкости достигается за счет взаимодействия металлического расплава с высоким содержанием кремния и алюминия со шлаком. В течение всего процесса обработки металла в ковше, включая время разлива окисленность шлака снижается до содержания оксидов железа менее 0,50 %, что обеспечивает снижение содержания серы в металле до значений менее 0,002 %.

3. На основании регрессионного анализа данных, отражающих совместное влияние углерода и серы (при их содержании в металле менее 0,005 % каждого) на изменение магнитных потерь ($P_{1,5/50}$) в конечной продукции – холоднокатаном листе, получена зависимость, позволяющая оценить приоритетную значимость указанных примесей на магнитные свойства ЭИС. Установлено, что при содержании углерода и серы в металле менее 0,005 % каждого снижение серы оказывает более значимое влияние на повышение служебных характеристик. Влияние серы на удельные магнитные потери больше в 1,75 раза, чем углерода.

Практическая значимость работы

Разработаны технологические режимы и приемы выплавки электротехнической изотропной стали на агрегатах Конвертерного цеха № 1 ПАО «НЛМК», позволяющие обеспечить стабильное содержание углерода и серы в маркировочной пробе, обеспечивающие заданный уровень магнитных потерь.

Достоверность теоретических практических положений диссертации основывается на применении стандартизированных методов определения показателей качества. Используемые для проведения диссертационных исследований аналитические приборы поверены с применением ГСО. Сходимость результатов анализов по исследовательским методикам испытаний оценивалась при двукратной повторяемости экспериментов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, приложений и изложена на 193 страницах машинописного текста и содержит 81 рисунок, 42 таблицы, библиографический список из 101 наименования.

В первой главе диссертации рассмотрены особенности технологии выплавки ЭИС в конвертерах. В том числе подробно описан и проанализирован накопленный опыт ковшевой обработки вышеуказанной стали.

Изучены имеющиеся в литературе данные о поведении углерода, серы в ходе сталеплавильного процесса, отмечены требуемые условия для проведения обезуглероживания, влияние компонентов металла на активность серы в железе, выделены технологические приемы, применяемые для снижения содержания последних. Показано, что удельные магнитные потери напрямую связаны с качеством металла, а именно низким содержанием углерода и серы. Обоснована целесообразность разработки новой технологии производства ЭИС с повышенными потребительскими свойствами.

В результате проведенного анализа существующих технологий производства сформулированы и определены основные задачи исследования.

Во второй главе диссертации представлены результаты исследования возможностей производства высшей марки ЭИС с высокими служебными свойствами на действующем оборудовании конвертерного цеха № 1 (КЦ-1) ПАО «НЛМК», которое было осуществлено на 44 кампа-

ниях (254 плавки) ЭИС 4-й группы легирования – марки стали при выплавке (подкат): 0402, 0404, 0405 в 2020 г. Представлены методы измерения и описание приборов с указанием погрешностей.

В третьей главе диссертации проанализированы выпадки, превышающие содержание углерода более 0,002 % после этапа обезуглероживания и выделены основные факторы, оказывающие влияние на поступление углерода в расплав после этапа обезуглероживания.

Показано, что достигнутый уровень по содержанию вредных примесей, таких как углерод и сера в готовой стали характеризуются не стабильностью технологического процесса. Разброс значений полученных содержаний по углероду и сере варьируется от 0,0023 до 0,0064 % и от 0,0007 до 0,0048 % соответственно. Стабильность результатов по содержанию вредных примесей (углерод и сера) может зависеть от различных факторов, анализ влияния на режим рафинирования которых входит в основные задачи следующего раздела.

В четвёртой главе диссертации проведен многомерный регрессионный анализ, с помощью которого определена значимость и степень влияния факторов на процесс глубокого обезуглероживания. Построены математические модели поведения углерода в зависимости от температуры расплава, окисленности, режима подачи лифт газа. Установлено, что процесс обезуглероживания расплава на АЦВ эффективнее протекает при подаче лифт-газа по режиму, приближенному к пузырьковому на уровне $80 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Установлено, что для оптимального протекания реакции содержание углерода перед вакуумированием должно быть менее 0,025%, окисленность $400 \div 700 \text{ ppm}$ с подачей газообразного кислорода в объеме около 30 м³, при условии окончания подачи кислорода не позднее $8 \div 12$ мин. и обеспечения «чистого кипа» в течение не менее 10 мин., время обработки увеличено с 18 мин. до $20 \div 25$ мин.

Рекомендовано использовать сталеразливочные ковши с шоткретированным слоем шлакового пояса.

Разработанная технология выплавки и ковшевой обработки вакуумированной ЭИС 3-4-й групп легирования, с проведением опытно-экспериментальных работ, позволила получать содержание вредных примесей, таких как C, S менее 0,003 % в условиях работы одношлаковым способом.

На основании регрессионного анализа данных, отражающих совместное влияние углерода и серы (при их содержании в металле менее 0,005% каждого) на изменение магнитных потерь (P_{1,5/50}), получена зависимость, позволяющая оценить приоритетную значимость указанных примесей на магнитные свойства ЭИС. Влияние серы на удельные магнитные потери больше в 1,75 раза, чем углерода.

В пятой главе диссертации представлены предложения, технологические приемы по снижению степени науглероживания успешно опробованы в условиях действующего производства

КЦ-1 ПАО «НЛМК» и внесены в действующую нормативную документацию. Они прошли достаточно широкое опробование в условиях КЦ-1 ПАО «НЛМК», что подтверждено выпуском НД. Ряд технологических приемов предложено тиражировать смежному Конвертерному цеху № 2 при производстве низкоуглеродистого, низкосернистого сортамента.

Предложен и реализован комбинированный вариант десульфурации за счет шлаковой обработки и десульфуратора в виде порошковой проволоки с кальциевым наполнителем, что позволило добиться целевых результатов по содержанию серы в маркировочной пробе динамных марок сталей, на исследуемых подкатах 0404, 0405, на уровне не более 0,002%.

В заключении по диссертации сформулированы основные научные положения и изложены достигнутые практические результаты работы.

Результаты работы достаточно полно обсуждены на региональных, Всероссийских и Международных конференциях и семинарах. В целом, следует отметить хороший уровень и разнообразие экспериментальных и расчетных методов исследования, представленных и использованных автором, квалифицированное обсуждение результатов.

Основные положения диссертационной работы были представлены на 5 научных конференциях всероссийского и международного уровней. Основное содержание диссертации опубликовано в 7 печатных изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и рекомендованных ВАК РФ. Новизна предложенных технических решений защищена одним патентом Российской Федерации.

Рассмотренный материал автореферата диссертации соответствует паспорту специальности 2.6.2 Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Наряду с несомненными достоинствами, по работе следует сделать некоторые замечания:

1. При рассмотрении режимов истечения газа из пузырькового режима в струйный соискатель рассматривает его подачу снизу в вертикальной плоскости, однако в циркуляционном вакууматоре газ подается в горизонтальных плоскостях. Желательно дать пояснение, как может повлиять данная неточность на общие выводы по декарбонизации расплава?

2. При эксплуатации вакуум-камеры происходит износ футеровки, что приводит к увеличению внутреннего диаметра впускного патрубка и изменению технологических параметров обработки стали. Учитывался ли данный факт при анализе обезуглероживания?

3. Какая схема футеровки и типы огнеупорных изделий используются в рабочей футеровке сталеразливочного ковша КЦ 1 ПАО НЛМК? Какие дальнейшие, наиболее перспективные, типы огнеупоров предполагается использовать при выплавке марок сталей рассматриваемых в диссертации?

4. В выводах к разделу 4 соискатель указывает: Экспериментально установлено и подтверждено, что на содержание серы в расплаве влияют следующие факторы: состав, объем,

окисленность шлака, расход, скорость и период отдачи порошковой проволоки, температурный режим обработки и режим продувки инертным газом (Ar) на УДМ. Определены оптимальные диапазоны их изменения для проведения глубокой десульфурации.

По этому выводу считаю нужным отметить следующее:

4.1. Со стр. 139 по стр. 145 идет описание процесса обработки расплава кальцийсодержащими материалами (порошковой проволокой). За период проводимых исследований было опробовано несколько вариантов подачи порошковой проволоки с кальциевым наполнителем, рассмотрена зависимость, позволяющая определить скорость ввода порошковой проволоки с наполнителем из силикокальция.

В настоящее время вопросы введения порошковой проволоки подробно описаны и существуют расчетные методы, например: 1) Лозовая Е.Ю., Шешуков О.Ю., Жучкова В.И., Виноградов С.В. Плавление силикокальция, вводимого в жидкую сталь различными способами // Сталь, 2005. № 12. С. 21-23; 2) Лозовая Е.Ю., Шешуков О.Ю., Жучков В.И., Бурмасов С.П., Виноградов С. В. Оценка времени плавления силикокальция при вводе в жидкую сталь различными способами // Металлургия и горная промышленность, 2006. № 7. С. 185-187.

Учитываются все теплофизические характеристики расплава, модификатора, оболочки, параметры ковша и самое главное величина заглубления – 200 мм от дна ковша. Скорость введения порошковой проволоки в этом случае определяется просто.

4.2. Соискатель дважды приводит результаты химического анализа состава шлака при обработке расплава в промежуточном ковше УНРС (табл. 16 на стр. 64) и полученного из сталеразливочного ковша после разливки металла на УНРС (табл. 38 на стр.149), указывая, что по окончании разливки металла содержание $Fe_{общ}$ менее 1,0 % (табл. 38). Также отмечено, что полученные фактические результаты отношения $(CaO)/(FeO)$ находятся на уровне $20 \div 30$, что говорит о достаточной емкости шлака по отношению к сере, превышающие значения, описанные в [22] в 8 и более раз.

Считаю необходимым отметить следующее: При своих оценках процесса десульфурации соискатель не дал оценки шлаков по содержанию оксида алюминия Al_2O_3 , а фактически оно находится в пределах от 38,9 % и до 50,3 %. При таком содержании Al_2O_3 шлак «кислый» т.к. данный оксид амфотерный с содержания свыше 16 % начинает проявлять кислотные свойства, поэтому ни какой десульфурации быть не может.

5. Но возможно, в таблице 38 перепутано наименование столбцов CaO и Al_2O_3 .

Сделанные замечания носят частный характер, и не меняют общего положительного мнения о рецензируемой работе. Автореферат диссертации отражает её содержание.

