

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора кафедры теплотехнических и энергетических систем ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова»
Картавцева Сергея Владимировича

на диссертационную работу Шкирмонтова Александра Прокопьевича **«Развитие теоретических основ совершенствования энерготехнологических параметров выплавки ферросплавов углеродотермическим процессом с целью повышения показателей работы электропечей»**, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.2 (05.16.02) – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

В работе с позиции энергосбережения и основных положений «бережливого производства» рассмотрены вопросы значительного повышения энерготехнологических параметров при выплавке ферросплавов в электропечах.

Основными потребителями ферросплавов для раскисления и легирования стали и сплавов являются сталеплавильное и литейное производство. В ряде случаев ферросплавы используются при обогащении полезных ископаемых, в качестве восстановителей для металлургических процессов и в виде защитных металлических покрытий. Однако в большей степени увеличение производства высоколегированной стали, а также весьма значительные объёмы товарных сплавов для экспорта определяют возрастающую потребность в ферросплавах.

Актуальность работы. Основной объём производства ферросплавов получают в электропечах рудовосстановительным, углеродотермическим процессом. В отличие от дуговых сталеплавильных печей, особенности выплавки ферросплавов из рудных материалов и восстановителей заключаются в том, что ферросплавная электропечь работает непрерывным процессом в смешанном режиме выделения тепла, в основном режиме сопротивления и в меньшей степени в режиме дуги. Удельный расход электроэнергии для производства массовых ферросплавов в 10–15 раз выше, чем для выплавки 1 т стали в дуговой печи. Поэтому доля затрат на электроэнергию в структуре себестоимости ферросплавов достаточно высока. К ухудшению показателей производства сплавов приводит снижение качества рудной базы материалов и восстановителей. Также при повышении мощности ферросплавных печей наблюдается увеличивающийся разрыв между установленной мощностью трансформаторов и мощностью в ванне печи, для технологического процесса, что не позволяет обеспечить высокие технико-

экономические показатели. В таких условиях повышение эффективности производства ферросплавов путём разработки и совершенствования энерготехнологических параметров работы электропечей несомненно *является актуальным*.

В диссертационном исследовании **научная новизна** заключается в следующем.

1. Автором рассмотрены в комплексе технологические, электрические и теплотехнические параметры выплавки ферросплавов. В результате удалось выявить наиболее существенные закономерности для улучшения энерготехнологических показателей работы ферросплавных электропечей.

2. На основании проведённых исследований, в электрометаллургии ферросплавов, было введено новое понятие – «энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи». Предложенная безразмерная величина включает: извлечение ведущего элемента в сплав; тепловой КПД печи; коэффициент мощности печи; электрический КПД; коэффициент загрузки трансформатора. Данная величина характеризует эффективность работы ферросплавной электропечи, а также может быть использована для совершенствования технологии выплавки и конструкции печных агрегатов.

3. При проведении мероприятий, направленных на сокращение комплекса потерь, энерготехнологический критерий печи возрастает, а удельный расход электроэнергии на 1 т ферросплава снижается. При ухудшении работы печей энерготехнологический критерий уменьшается и возрастает удельный расход электроэнергии на выплавку.

4. Получена зависимость изменения энерготехнологического критерия ферросплавной печи, традиционной конструкции, от повышения мощности печных трансформаторов. А именно: повышение мощности печей происходит в основном при увеличении силы тока электрода, и в меньшей степени за счёт рабочего напряжения (снижение сопротивления ванны) и увеличиваются электрические потери в короткой сети. Это повышает разрыв между мощностью трансформатора и мощностью в ванне для технологического процесса крупных ферросплавных печей. Как следствие ухудшается тепловая работа ванны и энерготехнологический критерий печи.

Для повышения сопротивления ванны печи используют (полукоксы, спец-коксы, бурый уголь и др.), с повышенным удельным электросопротивлением. Эффективность этого мероприятия составляет 5–10 %.

5. Для значительного повышения в 2,5 раза сопротивления ванны, напряжения и улучшения энерготехнологических параметров печей диссертантом предложена и опробована новая технологическая схема выплавки ферросплавов с увеличенным подэлектродным промежутком «электрод–подина».

При этом качественно меняется картина ввода дополнительной мощности в ванну электропечи – не за счёт увеличения силы тока, а благодаря повышению сопротивления ванны, напряжения и мощности, что энергетически более выгодно и эффективно. В результате при выплавке 45 %-ного ферросилиция существенно улучшились электрический КПД, коэффициент мощности, тепловой КПД при получении стандартного ферросплава, а энерготехнологический критерий печи увеличился на 35 %.

6. Теоретически обоснована, разработана и опробована принципиально новая концепция выплавки ферросплавов по варианту автономных, изолированных, плавильных зон под электродами в ванне печи в слое шихты и соответственно выпуском расплава из-под каждого электрода.

Вариант концепции включает сочетание двух технических решений: использование технологии выплавки ферросплавов с увеличенным подэлектродным промежутком и применение электропечи со значительно увеличенным в 2,1–2,8 раза относительным расходом электродов и более глубокой ванной. Данное комплексное решение приводит к повышению в 2,2–2,6 раза сопротивления ванны, напряжения и дополнительной мощности в ванне печи (каждый показатель) без ухудшения степени извлечения ведущего элемента в сплав при получении стандартного ферросплава. В результате улучшаются коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД печи, снижается удельный расход электроэнергии. Для выплавки 45 %-ного ферросилиция энерготехнологический критерий увеличился на 37,8–48,0 %.

7. Впервые получена зависимость величины подэлектродного промежутка в ванне ферросплавной печи от распада электродов и отмечено влияние данных параметров на повышение энерготехнологического критерия работы печи, вследствие увеличения рабочего напряжения. Показано, что большему относительному распаду электродов соответствует увеличенный подэлектродный промежуток «электрод–подина» в ванне печи под слоем шихты. Получены зависимости величины подэлектродного промежутка в ванне печи для традиционных значений рас-

пада электродов (2,1–2,3) и для увеличенных значений распада до (4,5–6,0), которые выражены в относительных величинах через диаметр электрода.

8. Разработана новая методика, на основе энерготехнологического критерия, для сравнительной оценки эффективности выплавки ферросплавов в печах различных конструкций и технологий. В результате анализа составляющих величин энерготехнологического критерия был разработан универсальный метод оценки технических решений для различных технологий выплавки ферросплавов в следующих агрегатах: в печах переменного тока промышленной частоты; в печах с пониженной частотой тока; в печах постоянного тока с открытой и закрытой дугой, а также в плазменных печах.

Практическая значимость работы заключается в использовании дополнительно полученной информации о состоянии углетермического процесса, при шлаковой и бесшлаковой выплавке ферросплавов, во взаимосвязи технологических, электрических и теплотехнических параметров. Это выявило факторы для улучшения комплекса энерготехнологических параметров и снижения удельных энергозатрат на выплавку ферросплавов в электропечах, а также для использования полученных данных при разработке новых технологических схем и конструктивных особенностей печей.

1. Отмечено, что при выплавке 75%-ного ферросилиция увеличение энерготехнологического критерия работы печи от 0,248 до 0,314, соответствует снижению удельного расхода электроэнергии в диапазоне от 10,5 до 8,6 МВт·ч/т сплава. При выплавке углеродистого феррохрома увеличение энерготехнологического критерия печи от 0,252 до 0,326, приводит к снижению удельного расхода электроэнергии от 4,3 до 3,3 МВт·ч/т.

2. Решена научно-техническая проблема значительного повышения активного сопротивления ванны, напряжения и мощности ферросплавной электропечи в 2 раза и более, без увеличения силы тока и диаметра электродов, с целью улучшения энерготехнологических параметров процесса выплавки.

3. Разработана и опробована в опытных крупномасштабных электропечах, в полупромышленном варианте новая концепция выплавки ферросплавов на примере 45 %-ного ферросилиция с увеличенными подэлектродным промежутком (2,27–2,42) и распадом электродов (5,6 диаметров электродов) на Аксуском заводе ферросплавов. В результате, сопротивление ванны, мощность и рабочее напряжение возросли в 2 раза, при неизменных значениях силы тока и диаметров электро-

дов. При этом улучшились коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД печи. Снизился удельный расход электроэнергии, а энерготехнологический критерий печи увеличился на (+29,8 %) по сравнению с базовым вариантом выплавки с традиционным распадом электродов.

Для выплавки по технологии с увеличенным подэлектродным промежутком ферросплавная печь переходит из разряда низкошахтных печей в разряд среднешахтных электропечей. При этом дополнительная мощность в ванну печи вводится благодаря увеличению рабочего напряжения, а не силы тока электрода, что энергетически выгодно.

4. На основании энергоаудита двух печей мощностью по 29 МВ·А завода «Кузнецкие ферросплавы», при выплавке 75 %-ного ферросилиция, была применена методика оценки работы электропечей и повышения их эффективности с использованием энерготехнологического критерия ферросплавной печи. При этом применение на одной из печей увеличенного распада электродов 3,4 м, вместо 3 м, а также углеродистых восстановителей (полукокса) с повышенным удельным электросопротивлением, увеличило энерготехнологический критерий ферросплавной печи с 0,203 до 0,258, при снижении удельного расхода электроэнергии на 6,8 % или 615 кВт·ч/т.

5. С позиции мероприятий, направленных на повышение энерготехнологического критерия печи, показано положительное влияние данной комплексной величины:

- на снижение удельного расхода электроэнергии;
- на уменьшение себестоимости получаемого сплава;
- на увеличение удельной производительности ферросплавной печи (т/сут) на 1 МВ·А установленной мощности трансформатора.

Достоверность теоретических положений диссертации подтверждается результатами экспериментальных исследований, традиционным способом моделирования электропечей, анализом большого количества практических данных выплавки ферросплавов в промышленных печах, а также результатами разработанных технологических схем выплавки в опытных крупномасштабных электропечах, в полупромышленном и промышленном варианте.

Личное участие автора заключается в определении актуальности, цели и постановке задач исследования, разработке методик, организации и проведении

исследований, обработке, анализе и обобщении результатов исследований; в формулировании выводов; участие в апробации работы и написании статей.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, библиографического списка и четырех приложений. Материал работы изложен на 302 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 32 таблицы, библиографический список включает 228 источников, из них 34 иностранный источник.

Содержание диссертации достаточно адекватно и полно отражено в тексте автореферата.

В главе 1 диссертант рассмотрел состояние вопроса производства ферросплавов в электропечах. Приведён анализ тенденций повышения показателей печей выплавки ферросплавов. На основе отечественного и зарубежного опыта рассмотрены технические решения по улучшению параметров выплавки сплавов кремния, марганца и хрома. Показано, что с увеличением мощности трансформаторов печей происходит ухудшение показателей выплавки и дополнительно - при снижении качества рудного сырья и восстановителей. Отмечено, что сила тока электродов (в десятки килоампер) возрастает быстрее рабочего напряжения, при этом снижается сопротивление ванны. К тому же рост мощности печей не приводит к аналогичному повышению производительности агрегата, из-за роста электрических потерь. Как видно из таблиц 1.1 и 1.2, увеличивается разрыв между мощностью трансформатора и мощностью в ванне печи. Для улучшения работы используются углеродистые восстановители с повышенным удельным электросопротивлением (полукоксы, газовые угли, спецкоксы и другие). Наибольший эффект от повышения активного сопротивления ванны составляет 5–10 %. Также проведён анализ технических решений по совершенствованию конструкций печных агрегатов, в том числе в печах с полыми электродами; с разрежением под сводом; с пониженной частотой тока; в печах постоянного тока (с открытой и закрытой дугой), а также в плазменных печах.

В главе 2 исследованы энерготехнологические параметры выплавки в электропечах, так как производство ферросплавов является одним из наиболее энергоёмких и материалоемких в металлургии. Рассмотрено аналитическое исследование причин ухудшения параметров ферросплавных печей при увеличении мощности на базе зависимостей изменения рабочего напряжения и силы тока электродов. Основной причиной является снижение активного сопротивления ванны печи. Приведены результаты по увеличению диаметров электродов на базе электро-

литического моделирования печей, а также данные промышленных ферросплавных печей по снижению активного сопротивления ванны.

Глава 3 посвящена разработке комплексного параметра работы ферросплавной электропечи. Рассмотрены варианты параметров, которые ранее использовались для оценки работы печей. В результате анализа технологических, электрических, теплотехнических величин получен комплексный параметр, который получил название – энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи, который включает: извлечение ведущего элемента в сплав; тепловой КПД печи; коэффициент мощности; электрический КПД и коэффициент загрузки трансформатора. Приведены варианты использования. Показано, что увеличение энерготехнологического критерия соответствует снижению удельного расхода электроэнергии на выплавку ферросплавов.

В главе 4 приведён анализ составляющих величин энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи. Рассмотрено извлечение ведущих элементов в сплав при выплавке ферросилиция, феррохрома, ферромарганца, ферроникеля и кремния.

Показано, что величина теплового КПД существенно ниже (в 1,5–2,0 раза), чем другие показатели энерготехнологического критерия, так как ферросплавная печь является низкошахтным агрегатом и работает рудовосстановительным процессом с большим количеством отходящих газов. Это полностью согласуется с данными Кривандина В.А. и Егорова А.В. для теплового КПД ферросплавных печей (0,45–0,50) и менее, из-за больших потерь тепла (30–45 %) с отходящими колошниковыми газами (В кн.: Тепловая работа и конструкция печей чёрной металлургии.– М., 1989.– 462 с.).

При этом диссертантом показано, что для традиционных ферросплавных печей величины теплового КПД печи и извлечения ведущего элемента в сплав работают в противофазе при увеличении таких электрических параметров, как коэффициент мощности, электрический КПД и коэффициент загрузки трансформатора.

В главе 5 с позиции энерготехнологического критерия печи рассмотрена выплавка: ферросилиция, углеродистого феррохрома, углеродистого ферромарганца, чернового ферроникеля и технического кремния. Получено, что при бесшлаковом процессе выплавки 75%-ного ферросилиция увеличение энерготехнологического критерия печи от 0,248 до 0,314 соответствует снижению удельного расхода элек-

троэнергии от 10,5 до 8,6 МВт·ч/т сплава. Для выплавки углеродистого феррохрома увеличение энерготехнологического критерия от 0,252 до 0,326 приводит к снижению удельного расхода электроэнергии от 4,3 до 3,3 МВт·ч/т сплава. Энерготехнологический критерий, как комплексная величина, может рассматриваться как основной элемент энергетического и технологического аудита электропечи для совершенствования и выявления эффективных режимов работы.

В главе 6 приведен анализ влияния подэлектродного промежутка и распада электродов на энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи. Проанализированы традиционные величины подэлектродного промежутка печей при выплавке ферросплавов (при выражении их через диаметры электродов). Показано, что увеличенный подэлектродный промежуток и разработанная технология выплавки позволяет повысить сопротивление ванны, напряжение и мощность в ванне (в 2 раза и более), без изменения силы тока электрода и получении стандартного ферросплава со значительным повышением энерготехнологических параметров электропечи.

На основании рассмотренной технологии предложена и опробована принципиально новая концепция выплавки ферросплавов по варианту автономных изолированных плавильных зон под электродами в ванне печи под слоем шихты и, соответственно, выпуском расплава из-под каждого электрода. Это приводит к повышению в 2,2–2,6 раза сопротивления ванны, напряжения и дополнительной мощности в ванне печи (каждый показатель) без ухудшения степени извлечения ведущего элемента и получения стандартного сплава. Снижается удельный расход электроэнергии и увеличивается энерготехнологический критерий для выплавки ферросилиция до 37,8–48,0 % по сравнению с базовым вариантом.

Впервые автором получена зависимость относительных величин подэлектродного промежутка и распада электродов в ванне ферросплавной печи и установлено влияние данных параметров на повышение энерготехнологического критерия печи, вследствие увеличения рабочего напряжения.

В главе 7 приведена оценка технических решений с помощью энерготехнологического критерия ферросплавной печи и практические рекомендации. На основании энерготехнологического критерия автором разработана новая методика для сравнительной оценки эффективности выплавки ферросплавов в печах различных конструкций и технологий. В результате анализа был применён метод оценки технических решений в электрометаллургии для различных технологий

выплавки ферросплавов: в печах переменного тока; в печах с пониженной частотой тока; в печах постоянного тока (с открытой и закрытой дугой), а также в плазменных печах.

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

Публикации и конференции. Результаты исследований достаточно широко докладывались на Международных конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликована монография «Энерготехнологические параметры выплавки ферросплавов в электропечах». – М.: МИСиС. – 2018. – 216 с.

Всего по теме диссертации опубликовано 77 научных работ, в том числе в журналах перечня ВАК Минобрнауки РФ – 28, авторские свидетельства – 4, статьи в других журналах и сборниках конференций – 44, монография – 1.

В изданиях, которые входят в Международные реферативные базы данных систем цитирования, опубликовано 9 работ в переводных периодических изданиях: «Steel in Translation» – 3 (Scopus, квартиль Q2); «Metallurgist» – 6 (Scopus, квартиль Q3).

В целом, можно отметить достаточно хороший уровень и разнообразие экспериментальных и расчетных методов исследования, представленных и использованных автором, а также квалифицированное обсуждение результатов.

Специальность. Рассмотренный материал диссертации соответствует паспорту специальности 2,6.2 (05.16.02) – металлургия черных, цветных и редких металлов: п. 11 – Пирометаллургические процессы и агрегаты; п. 12 – Электрометаллургические процессы и агрегаты; п. 17 – Материало- и энергосбережение при получении металлов и сплавов.

Наряду с определёнными достоинствами по работе следует сделать некоторые замечания:

1. В диссертационной работе отмечено, что для выплавки ферросплавов шлаковым и бесшлаковым процессом в системе энерготехнологического критерия печи наименьшую величину в 1,5–2 раза имеет тепловой КПД (стр. 123), чем другие составляющие величины. В связи с этим, как можно повысить тепловой КПД ферросплавной электропечи ?

2. С позиции энергосбережения, необходимо конкретизировать основные положения снижения удельного расхода электроэнергии для выплавки ферросплавов

