



**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, 375-44-39  
e-mail: inmt@urfu.ru, [www.urfu.ru](http://www.urfu.ru)

30.09.2021 № 33.20-32/241  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ

официального оппонента 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 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Тенденции в повышении объемов производства высококачественной стали и увеличение доли легированной стали определяют возрастающую потребность в ферросплавах. Основной объем производства массовых ферросплавов получают в электропечах углеротермическим процессом.

**Актуальность работы.** Особенности выплавки ферросплавов заключаются в том, что ферросплавная электропечь работает в смешанном режиме выделения тепла как в режиме дуги, так и в режиме сопротивления, что усложняет процесс, поскольку электрический режим и технология выплавки взаимосвязаны, и в значительной мере определяются составом шихтовых материалов, их удельным электросопротивлением и особенностями конструкции печи. С повышением мощности ферросплавных печей и ухудшением качества рудных материалов наблюдается ухудшение энерготехнологических параметров выплавки.

Кроме того, с повышением мощности ферросплавных печей наблюдается увеличивающийся разрыв между установленной мощностью трансформаторов и активной мощностью в ванне печи, используемой на технологические процессы, что также ухудшает энерготехнологические параметры и не позволяет обеспечить высокие технико-экономические показатели, а также ограничивает производительность ферросплавных агрегатов.

Доля затрат на энергетику процесса в структуре себестоимости ферросплавной продукции в условиях постоянно увеличивающихся тарифов на электроэнергию существенно возрастает. К значительному ухудшению технико-экономических показателей производства, в том числе и к меньшему извлечению ведущих элементов в сплав, приводит также снижение качества рудных материалов и углеродистых восстановителей. В этих условиях актуальным

является повышение эффективности производства ферросплавов путём разработки научных основ и совершенствование технологического процесса выплавки в электропечах.

Таким образом, представленная диссертационная работа, посвященная развитию теоретических основ и совершенствованию энерготехнологических параметров производства ферросплавов углетермическим процессом для улучшения показателей работы рудовосстановительных электропечей, несомненно **является актуальной**.

*К научной новизне* диссертационной работы следует отнести следующее:

1. На основании теоретических положений и практических исследований получена новая информация об углетермическом процессе выплавки ферросплавов в электропечах, что позволяет при рассмотрении в комплексе технологических, электроэнергетических и теплотехнических параметров выплавки, выявить закономерности для улучшения энерготехнологических показателей ферросплавных электропечей.

2. Впервые в электрометаллургии ферросплавов введено новое понятие **«Энерготехнологический критерий работы ферросплавной электропечи»** - безразмерная величина, определяющаяся на основе комплекса технологических, электрических, теплотехнических параметров выплавки ферросплавов, однозначно характеризующая эффективность работы электропечи углетермическим процессом. Данная величина может быть использована для совершенствования технологии выплавки и конструкции печных агрегатов для получения ферросплавов.

3. Впервые установлена зависимость и получены функциональные закономерности изменения энерготехнологического критерия работы печи и удельного расхода электроэнергии на выплавку ферросплавов. А именно, энерготехнологический критерий в комплексе фиксирует долю технологических, электрических и тепловых потерь при выплавке в ферросплавной печи, что отражается на удельном расходе электроэнергии. При мероприятиях, направленных на сокращение комплекса потерь при выплавке, энерготехнологический критерий возрастает, а удельный расход электроэнергии снижается.

4. Получена зависимость изменения энерготехнологического критерия ферросплавной печи, традиционной конструкции, от увеличения мощности печных трансформаторов при выплавке шлаковым и бесшлаковым углетермическим процессом. А именно, увеличение мощности ферросплавных электропечей традиционных конструкций, происходит в основном за счёт увеличения силы тока и соответственно диаметра электродов, а не рабочего напряжения, что увеличивает разрыв между мощностью трансформатора и активной мощностью в ванне печи, которая направлена на технологический процесс, и как следствие ухудшается тепловая работа ванны печей большой мощности, что в комплексе снижает энерготехнологический критерий печи и увеличивает удельный расход электроэнергии, по сравнению с ферросплавными печами средней мощности. Отмечено, что 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 увеличивается удельный расход электроэнергии.

5. Предложена и опробована новая технологическая схема выплавки ферросплавов с увеличенным подэлектродным промежутком «электрод-под» для значительного повышения в 2,5 раза сопротивления ванны и напряжения для улучшения энерготехнологических параметров печей с закрытой дугой. 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 %. Теоретически обоснована, разработана 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.

6. Теоретически обоснована и опробована новая технология выплавки ферросплавов в печи с увеличенным распадом электродов с дифференцированным способом загрузки шихты, что дополнительно улучшает энерготехнологические параметры агрегата. Исследования показали, что применение дифференцированного способа загрузки шихты в печь, с увеличенным распадом (до 4,5-6,0 диаметров электрода), повышает сопротивление ванны, напряжение и мощность в печи в 2,2-2,6 раза, по сравнению с аналогичной выплавкой в печи с обычным распадом электродов и традиционным способом загрузки шихты в печь. В результате, энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи увеличился на 57,4-63,5 %.

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-под» в ванне печи под слоем шихты. Получены зависимости подэлектродного промежутка в ванне ферросплавной печи для традиционных значений распада электродов (2,1-2,3) и для увеличенных значений распада до (4,5-6,0), которые выражены в относительных величинах через диаметр электрода печи.

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; 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, электроэнергетических 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 ферросплавной 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 (шлаковый процесс) 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. Выявлено, что при увеличении мощности печей от 16,5-22,5 МВ·А до 81 МВ·А для выплавки 45 %-ного ферросилиция, из-за снижения активного сопротивления ванны, энерготехнологический критерий уменьшается от (0,313-0,338) до величины 0,239-0,282 (-13,5... -26,7 %) и ниже, что приводит к менее эффективной работе электропечей.

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 (или возможного их уменьшения), 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 увеличенным подэлектродным промежутком 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 электродов. При этом улучшились коэффициент мощности, электрический и тепловой КПД печи. Удельный расход электроэнергии на 1 баз. т сплава снизился на 16,7 %. Энерготехнологический критерий ферросплавной 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.

На основании результатов проведённых полупромышленных испытаний и рекомендаций, впоследствии на заводе на 8-ми печах РКЗ-16,5/22,5 был увеличен диаметр

распада электродов от проектных размеров 2,9 м до 3,7-3,8 м и на 4-х печах РКЗ-81 от 5,2 м до 5,7-5,8 м.

4. Полученный энерготехнологический критерий является основой для оценки работы ферросплавных печей, в том числе:

- для выявления наиболее перспективных и эффективных технологий выплавки ферросплавов, особенно в случае применения новых и нетрадиционных видов рудного сырья, вовлечение в производство различных углеродистых восстановителей;
- при проведении комплексного энерготехнологического аудита и повышении эффективности работы промышленных электропечей;
- при разработке новых печных агрегатов и технологий, а также для составления прогнозов и перспектив развития в электрометаллургии ферросплавов.

5. 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 разработанного 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.

6. С позиции мероприятий, направленных на повышение энерготехнологического критерия печи, показано положительное влияние данной комплексной величины не только на удельный расход электроэнергии на выплавку, а также на снижение себестоимости получаемого сплава и увеличение удельной производительности ферросплавной электропечи (т/сут.) на 1 МВ·А установленной мощности трансформатора.

Достоверность теоретических положений диссертации подтверждается результатами экспериментальных исследований, традиционным способом электролитического 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 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 для выплавки ферросплавов шлаковым и бесшлаковым процессом, а также рассмотрены технические решения по улучшению энерготехнологических параметров выплавки сплавов кремния, марганца и хрома на основе отечественного и зарубежного опыта. 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, снижается сопротивление ванны. К тому же рост мощности печей не приводит к аналогичному повышению производительности агрегата, так как из-за электрических потерь, увеличивается разрыв между мощностью трансформатора и мощностью в ванне печи. Для улучшения используются углеродистые восстановители с повышенным удельным электросопротивлением (полукокс, газовые угли, спецкокс и другие). Наибольший эффект от повышения активного сопротивления ванны составляет 5-10 %. Проведён анализ технических решений по совершенствованию конструкций печных агрегатов, в том числе в печах с полыми электродами; с разряджением 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 материалоёмких в металлургии. Рассмотрено аналитическое исследование причин ухудшения параметров ферросплавных печей при увеличении мощности на базе зависимостей изменения рабочего напряжения и силы тока электродов. В этой главе изложены результаты по увеличению диаметров электродов на базе электролитического моделирования печей и данных промышленных печей по снижению активного сопротивления ванны.

Глава 3 посвящена разработке комплексного параметра работы электропечи для выплавки ферросплавов. 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, что 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.

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 параметры. При этом отмечено, что извлечение ведущего элемента и теплового КПД традиционных печей работают в противофазе при увеличении коэффициента мощности, электрического КПД и коэффициента загрузки трансформатора.

В главе 5 с позиции энерготехнологического критерия электропечи рассмотрена выплавка: ферросилиция, углеродистого феррохрома, углеродистого ферромарганца, черного 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 электроэнергии от 10,5 до 8,6 МВт·ч/т сплава. При выплавке 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. Выявлено, что улучшение в работе печей соответствует повышению энерготехнологического критерия. Комплексная величина может рассматриваться как основной элемент энергетического и технологического аудита электропечи для совершенствования и выявления эффективных режимов работы.

В главе 6 исследовано влияние подэлектродного промежутка и распада электродов на энерготехнологический критерий работы ферросплавной печи. Проанализированы традиционные величины подэлектродного промежутка в выплавке ферросплавов. Показано, что увеличенный подэлектродный промежуток и разработанная технология выплавки позволяет увеличить сопротивление ванны, напряжение и мощность в ванне (в 2 раза и более), без изменения силы тока электрода и получения 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, что 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 диссертантом получена зависимость величины подэлектродного промежутка в ванне ферросплавной печи от распада электродов и установлено влияние данных параметров на повышение энерготехнологического критерия печи, вследствие увеличения рабочего напряжения.

В главе 7 приведены оценка технических решений с помощью энерготехнологического критерия работы 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.

Результаты работы достаточно полно обсуждены на региональных, Всероссийских и Международных конференциях и семинарах. По теме диссертации опубликована монография «Энерготехнологические параметры выплавки ферросплавов в электропечах». – М.: МИСиС. – 2018. – 216 с. В общем по теме диссертации опубликовано 77 научных работ, в том числе в журналах перечня ВАК - 28, авторские свидетельства РФ - 4, статьи в других журналах и сборниках конференций - 44, 1 монография. 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, следует отметить хороший уровень и разнообразие экспериментальных и расчетных методов исследования, представленных и использованных автором, квалифицированное обсуждение результатов.

Рассмотренный материал автореферата 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 несомненными достоинствами, по работе следует сделать некоторые замечания:

1. Терминология:

Вероятно, вместо термина «углеродотермический» следует применять термин «углетермический».

2. Касаемо, Положений, выносимых на защиту:

Автор работы указывает: «На защиту выносятся следующие положения по решению проблемы повышения энерготехнологических параметров ферросплавных электропечей:

комплексный анализ работы ферросплавной...;

влияние увеличения мощности печных трансформаторов...;



зависимость энерготехнологического критерия ферросплавной печи и удельного расхода электроэнергии на выплавку сплава;

анализ составляющих величин энерготехнологического критерия...;

анализ технологии выплавки различных сплавов...;

влияние подэлектродного промежутка и распада электродов...;

Считаю, что необходимо изложить в следующей форме, а именно: «Результаты анализа...; Оценка зависимости...; оценка влияния...» и т.д.

3. Автор указывает, что «Следовательно, наибольшая величина энерготехнологического критерия соответствует наименьшему удельному расходу электроэнергии, при выплавке ферросилиция, на примере бесшлакового, углетермического процесса». А также «..., что повышение энерготехнологического критерия работы ферросплавной печи соответствует снижению удельного расхода электроэнергии». При величинах критерия, которые отличаются в десятых долях единицы (табл. 3.1 – 0,301 и 0,289 соответственно; табл. 3.3. – 0,226 и 0,294 соответственно) очень сложно судить об оценке процесса. Во-первых, необходимо оценить погрешность определения критерия, а во вторых, построить график. Может тогда вероятно оценить или сопоставить величину параметра и его характеристику показателей процесса.

4. Стр. 110. В разделе «Извлечение ведущего элемента в сплав» следовало рассмотреть примеры на кремнии, марганце и хrome. Никель же, все-таки получают несколько по другой технологии. И видимо, его рассмотрение в данном разделе неуместно.

5. В выводах к главе 4 автор утверждает «...для современных мощных ферросплавных электропечей с более совершенными конструкциями короткой сети, существенное влияние на энерготехнологический критерий оказывает тепловой КПД печи, коэффициент мощности, коэффициент загрузки трансформатора и степень извлечения ведущего элемента в сплав при работе на сравнительно бедном рудном сырье». Но не проведена оценка вклада каждого показателя в критерий. Т.е. нет возможности принять решение о мерах его повышения в каждом конкретном случае. Поэтому по анализу критерия получаются достаточно тривиальные выводы:

«...выплавка высококремнистых сплавов в электропечах малой и средней мощности была более эффективной»;

«... численные значения энерготехнологического критерия характеризуют уровень эффективности работы печи, при этом их увеличение соответствует снижению удельного расхода электроэнергии на выплавку углеродистого феррохрома»;

«...в определённых пределах можно использовать серосодержащие добавки для снижения вязкости шлака и потерь сплава со шлаком. В результате увеличивается извлечение марганца и производительность электропечи, соответственно повышается энерготехнологический критерий печи при получении стандартного углеродистого ферромарганца».

6. На основании всего вышесказанного автор делает вывод: «С позиции энергоресурсосбережения, такая комплексная величина, как энерготехнологический критерий, может рассматриваться как основной элемент энергетического и технологического аудита ферросплавного печного агрегата, а также для выявления эффективных режимов работы печей, применение различных видов шихтовых материалов и инновационных технологий». Вероятно, энерготехнологический критерий может рассматриваться как сравнительный коэффициент различных технологий. Но он не дает ответа на необходимые мероприятия для повышения эффективности процесса.

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

#### ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании рассмотренных материалов автореферата, диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, позволившее разработать технические решения для повышения энерготехнологических параметров и универсальный метод оценки для различных технологий выплавки ферросплавов в печах переменного тока, печах с пониженной частотой тока, печах постоянного тока с открытой и закрытой дугой, а также в плазменных печах и имеющее достаточный уровень научной новизны и практической значимости. Считаю, что диссертационная работа **Шкирмонтова Александра Прокопьевича** соответствует требованиям п. 9, Положения о присуждении учёных степеней (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.6.2 (05.16.02) – металлургия чёрных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент



*Шешуков*  
Шешуков Олег Юрьевич, доктор технических наук, профессор, директор Института новых материалов и технологий, заведующий кафедрой металлургии железа и сплавов ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

620002, г. Екатеринбург,  
ул. Мира, 28.  
Тел.: (343)3754439  
E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Я, Шешуков Олег Юрьевич, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведенных в этом документе *Шешуков*