

УДК 669.187:621.365.22

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ
В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА
ФАСОННО-ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА****А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, В.В. Окунева***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., Крупнов А.В., Окунева В.В., 2025

Аннотация. В статье рассмотрена проблема большого удельного расхода электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах малой вместимости фасонно-литейного производства по сравнению с печами большой вместимости. Отмечено влияние габаритов загружаемого металлолома на расход электроэнергии в период его расплавления. Предложен переход на лом в шихте размером не более $200 \times 150 \times 100$ мм в качестве способа снижения затрат электроэнергии на выплавку стали в малотоннажных дуговых печах и приведено обоснование этого способа.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, расход электроэнергии, шихта, температура футеровки, повышение энергоэффективности.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-58-66**ВВЕДЕНИЕ**

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) переменного трехфазного тока и постоянного тока незаменимы в обеспечении сталями и сплавами производства, изделия которого работают в тяжелых и экстремальных условиях, что имеет большое значение для нашей страны.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Дуговые сталеплавильные печи малой вместимости 0,5–12 т имеют большой удельный расход электроэнергии по сравнению с ДСП средней и большой вместимости. Это связано с геометрическими особенностями конструкции ДСП (рис. 1, табл. 1) и режимами работы [1–3].

Удельный расход электроэнергии в ДСП малой вместимости за весь период плавки составляет 700–800 кВт·ч/т, в период расплавления – 475–650 кВт·ч/т, а средний КПД дуг – 0,57. Для ДСП большой вместимости удельный расход в период расплавления составляет 375–385 кВт·ч/т, а КПД дуг – 0,67 [1–3].

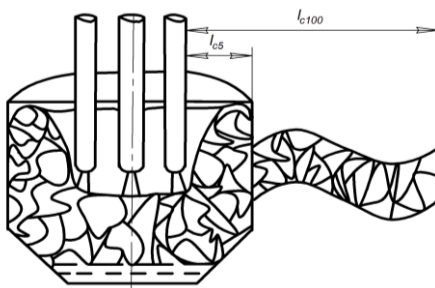


Рис. 1. Расстояния от электродов до стен печи ДСП-5 и ДСП-100

Таблица 1

Параметры ДСП [4]						
Печь \ Параметр	ДСП-0,5	ДСП-1,5	ДСП-3	ДСП-6	ДСП-12	ДСП-100
D_B , м	1,1	1,5	1,8	2,27	2,7	5,4
r_{CT} , м	0,31	0,49	0,55	0,69	0,85	2
d_p , м	0,48	0,52	0,7	0,9	1,0	1,4
G_3 , кВтч/т	650	540	520	475	450	385

На рис. 2 показано изменение удельного расхода электроэнергии дуговых сталеплавильных печей малой и большой вместимости за 120-летний период.

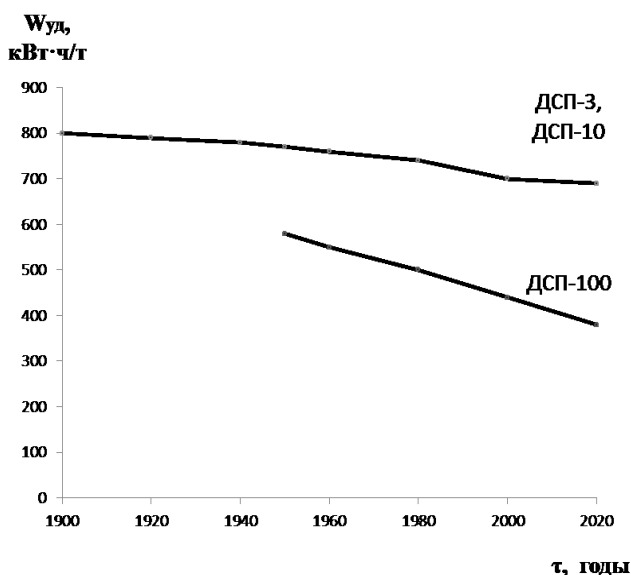


Рис. 2. История изменения удельного расхода электроэнергии в малотоннажных (ДСП-3, ДСП-10) и большегрузных (ДСП-100) печах

Потребление электроэнергии ДСП-3 в начале XX в. составляло 780–800 кВт·ч/т. За 120-летний период оно снизилось до 650–700 кВт·ч/т, т.е. на 14 %. С начала XX в. вместимость печей росла и в 1950-е годы составила 100 т (ДСП-100). В 1950–1960-х годах удельный расход электроэнергии в большегрузных ДСП-100 был 500–650 кВт·ч/т. За последние 70 лет в результате интенсификации процесса плавки стали, использования кислорода, вспенивания шлака и вывода процесса рафинировки в ковш-печь удельный расход электроэнергии в ДСП-100 снизился до 360–375 кВт·ч/т, т.е. на 210–220 % [5].

В малотоннажных печах также возможно применение средств интенсификации плавки и поднятие уровня шлака, но эти мероприятия требуют глубокого анализа, так как в малых печах на первом месте стоит выпуск годного металла требуемого химического состава.

Из графика изменения температуры футеровки (рис. 3), полученного экспериментальным путем, можно выделить особенность изменения температуры: в период прорезки колодцев у ДСП-5 наблюдается рост температуры футеровки, когда как у ДСП-100 температура снижается, что связано с геометрическими размерами печей [5, 6].

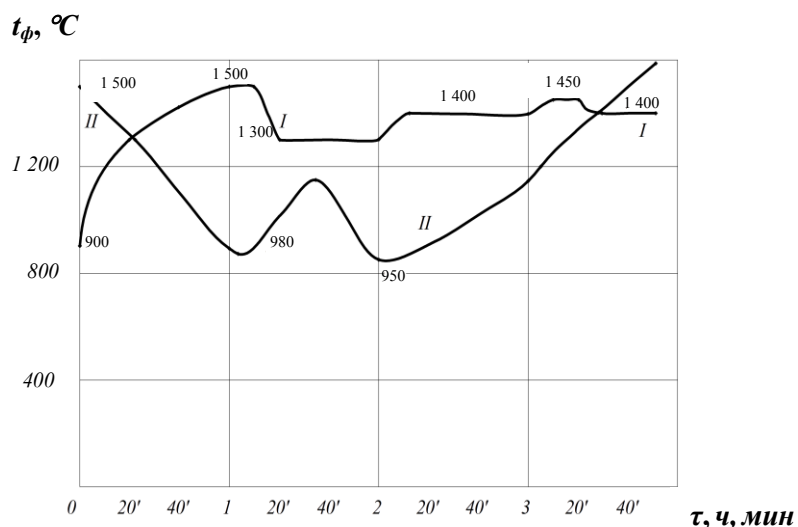


Рис. 3. Изменение температуры футеровки по ходу плавки в печах ДСП-5 (I), ДСП-100 (II)

В ДСП-5 диаметр ванны составляет 2,27 м, диаметр распада электродов – 0,9 мм, кратчайшее расстояние от дуг до стен l_{C5} , определяемое как разность радиуса ванны и радиуса распада электродов, равно 0,69 м, тогда как у ДСП-100 $l_{C100} = 2$ м. Это связано с тем, что часть теплового излучения дуг проходит через пустоты между кусками шихты в малотоннажной ДСП, достигает футеровки стен и вызывает ее нагрев, а соответственно, рост ее температуры, который фиксируют. У большегрузных ДСП из-за большей толщины слоя шихты тепловое излучение дуг почти не достигает стен, а загруженная шихта в начальный период плавки начинает отбирать теплоту стен, снижая их температуру.

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАВКИ СТАЛИ

Существующий способ плавки в ДСП вместимостью 0,5–12 т предполагает загрузку крупной шихты размерами $800 \times 500 \times 500$ мм и мелкой шихты размерами от $200 \times 150 \times 100$ мм с последующим ее плавлением [7].

Вследствие небольшого расстояния между электродом и футеровкой 10–20 % теплового излучения дуг через пустоты между кусками шихты достигает футеровки стен печи и бесполезно расходуется на ее нагрев. Полезно расходуется на нагрев шихты и ее расплавление 80–90 % теплового излучения. КПД дуг пропорционально снижается на 10–20 %.

На основе вышесказанного сделан вывод, что чем мельче шихта, тем меньше пустоты между кусками шихты и тем меньше теплового излучения дуг достигнет через пустоты футеровки стен печи, тем меньше потери теплового излучения дуг, тем выше КПД дуг. Чем крупнее шихта, тем крупнее пустоты между кусками шихты и тем больше теплового излучения дуг достигает футеровки стен печи, тем больше потери теплового излучения дуг, тем меньше КПД дуг.

Авторами статьи предложен и запатентован [8] способ плавки стали в ДСП трехфазного тока фасонно-литейного цеха, в основе которого лежит загрузка мелкой шихты габаритами не более $200 \times 150 \times 100$ мм.

Подтверждением реализации способа повышения энергоэффективности плавки за счет применения меньших размеров шихты являются результаты исследования влияния фракционного состава металлолома на технико-экономические показатели работы ДСП на

ОАО «ММК». Был осуществлен ряд плавов в ДСП-180 и получен удельный расход электроэнергии при использовании лома с габаритными размерами кусков в завалке $800 \times 500 \times 500$ мм (лом АЗ, 14 плавов) – 310 кВт·ч/т и $600 \times 500 \times 500$ мм (лом 2А, 59 плавов) – 278 кВт·ч/т. Для повышения экономии электроэнергии использовали в завалке 30 % жидкого чугуна. Снижение расхода электроэнергии при плавке лома меньшего размера составило 11 %, и это связано с сокращением продолжительности работы печи под током. Данные показатели расхода электроэнергии получены за счет уменьшения времени завалки шихты и за счет совершенствования теплообмена между дугами и шихтой [9].

Целесообразно в печах фасонно-литейных цехов использовать шихту меньших размеров ($200 \times 150 \times 100$ мм), так как габариты печей малой вместимости значительно меньше габаритов большегрузных печей. Данный вывод подкрепляется требованиями к размеру товарного лома в Великобритании. Там применяют товарный лом с максимальными размерами кусков до 200 мм и до 150 мм, так как лом больших размеров требует увеличения расхода электроэнергии и большего времени на расплавление. Использование лома средней плотности позволяет снизить удельный расход электроэнергии на 1–2 % и сократить время расплавления шихты на 5 % [10].

На Череповецком металлургическом комбинате (ЧерМК) при исследовании влияния состава шихты на показатели выплавки стали марки 17ГС в ДСП-100 получили удельный расход электроэнергии на расплавление 429 кВт·ч/т при использовании в завалке тяжеловесного лома и 385 кВт·ч/т при использовании лома средней плотности. Эффект экономии электроэнергии составляет 10 % от применения в завалке лома средней плотности. Исследователями сделан вывод: «Расход электроэнергии в период плавления в значительной степени зависит от качества металлолома, которым определяется число подвалок, стабильность горения электрических дуг и их КПД η_d » [11].

В источнике [12] отмечено, что при работе стотонных ДСП с насыпной плотностью лома более 2 т/м^3 отмечаются рост расхода электроэнергии на плавление шихты и увеличение длительности периода плавления. Наличие крупных кусков лома в завалке вызывает рост числа поломок электродов.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ

ПРЕДЛАГАЕМОГО И ТРАДИЦИОННОГО СПОСОБОВ ПЛАВКИ СТАЛИ

Предлагаемый в патенте [8] способ плавки относится к периоду расплавления, а окислительный и восстановительный периоды проводятся по традиционной технологии плавки [13] в ДСП фасонно-литейного цеха.

После выпуска из печи всего жидкого металла в разливочный ковш при открытом своде печи осуществляют загрузку шихты из бадьи.

Традиционным способом шихта загружается в печь бадьей следующим образом: внизу бадьи располагают легковесный мелкий лом для защиты футеровки подины печи от удара при загрузке; лом крупного и среднего размера вперемешку располагают в центре бадьи поверх легковесного мелкого лома; крупные куски располагают в бадье под электродами; по периферии бадьи вместе с ломом крупного и среднего размера располагают лом среднего и мелкого размера; поверх лома среднего и крупного размера располагают легковесный мелкий лом. Для увеличения углерода добавляют в шихту передельный чугун, брикеты кокса или электродный бой. Кокс и электродный бой укладывают в бадье на легковесный мелкий лом и под лом среднего и крупного размера. Передельный чугун располагают в верхней части бадьи поверх лома крупного и среднего

размера. Тугоплавкие легирующие элементы располагают под осью электродов в центре бадьи вперемешку с ломом крупного и среднего размера, легкоплавкие легирующие элементы – ближе к периферии. Для удаления фосфора в процессе плавления в шихту вносят 2–3 % извести от загружаемого объема.

Предлагаемый способ укладки шихты в бадье выглядит так: вниз бадьи укладывают легковесный лом, брикеты стружки; на уложенный легковесный лом и брикеты стружки укладывают карбюризатор – брикеты кокса и электродный бой для науглероживания выпускаемой стали; на уложенный в бадье карбюризатор загружают мелкую шихту размерами до $200 \times 150 \times 100$ мм; монолитные куски лома размерами $200 \times 150 \times 100$ мм в бадье располагают ближе к оси электрода печи; никель для легирования выплавляемой стали закладывают по периферии бадьи вместе с мелкой шихтой; поверх мелкой шихты в бадью укладывают слой из передельного чугуна и легковесного лома.

После завалки шихты свод печи закрывают и опускают электроды до соприкосновения с металлической шихтой. Между электродами и шихтой зажигаются три электрические дуги и начинают прорезать колодцы на максимальной мощности (рис. 4а) – режим А. После прорезки колодцев и формирования лужи металла понижают мощность дуг (рис. 4б) – режим Б. Далее дуги работают на жидкий металл и производится доплавление остатков металла, мощность дуг понижается (рис. 4в) – режим В. Последующие режимы осуществляются на ванну жидкого металла (рис. 4г): легирование – режим Г; окислительный период – режим Д; восстановительный – режим Е; подготовка к выпуску – режим Ж.

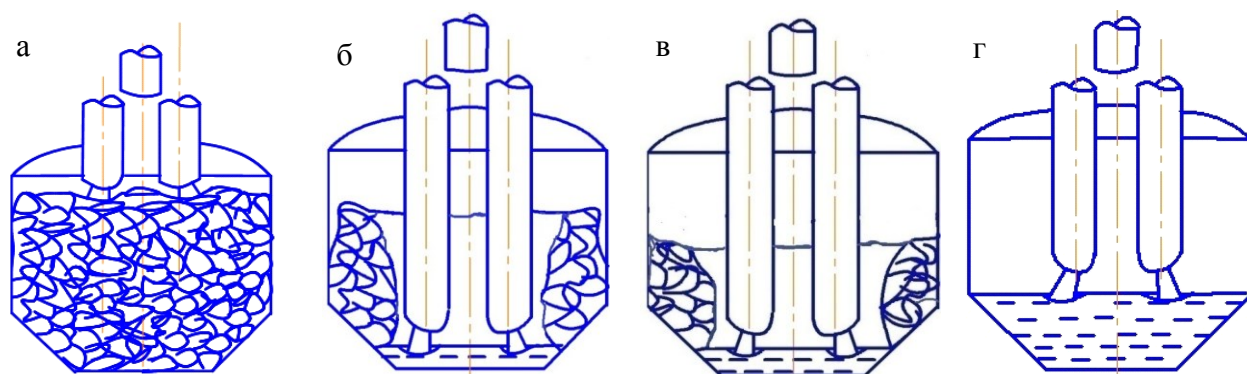


Рис. 4. Процесс расплавления металла в ДСП: а – прорезка колодцев;
б – заглубление электродов в шихту и формирование жидкого металла;
в – работа дуг на жидкий металл и доплавление; г – работа дуг на ванну металла

В табл. 2 представлено сопоставление основных электрических параметров плавки в ДСП-6 с основной футеровкой и мощностью 5 МВА, поясняющих преимущество запатентованного способа, т.е. плавки в печи на мелкой шихте, перед плавкой в печи на традиционной шихте. Необходимая информация о вводимой мощности, интервалах времени каждого режима плавки, удельном расходе электроэнергии взята из источников [1–3]. Аналитические расчеты выполнены согласно методикам из источников [6, 14].

Таблица 2

Сопоставление параметров плавки в ДСП-6 мощностью 5 МВА

Параметры	Единица измерения	Номер электрического режима						
		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
P_a	кВт	4 350	2 900	1 940	566	1 100	1 610	1 100
P_d	кВт	1 400	920	620	180	355	520	355
I_d	кА	12,8	10,6	8,6	4,7	6,2	7,7	6,2
Параметры при плавке на мелкой шихте								
η_d	–	0,79	0,5	0,51	0,76	0,6	0,47	0,6
Q_d	кВт·ч	1 087,5	870	737,2	237,72	1 100	531,3	550
τ	Ч	0,25	0,3	0,38	0,42	1	0,33	0,5
Параметры при плавке на традиционной шихте								
η_d	–	0,77	0,45	0,5	0,76	0,6	0,47	0,6
Q_d	кВт·ч	1 305	957	814,8	237,72	1 100	531,3	550
τ	Ч	0,3	0,33	0,4	0,42	1	0,33	0,5
Сопоставление параметров плавки на различной шихте								
$\Delta\eta_d$	–	0,02	0,05	0,01	0	0	0	0
ΔQ_d	кВт·ч	–217,5	–87	–77,6	0	0	0	0
$\Delta\tau$	ч	–0,05	–0,03	–0,02	0	0	0	0

Суммарный расход электроэнергии на расплавление шихты в ДСП-6 в режимах с А по В составляет на традиционной шихте 3 038 кВт·ч, на мелкой шихте – 2 694,7 кВт·ч, что показывает уменьшение потребления электроэнергии на 343,3 кВт·ч (11 %) при плавании. Снижение расхода электроэнергии связано со снижением теплового излучения дуг на футеровку стен печи и увеличением излучения дуг на шихту, а соответственно, и меньшим нагревом футеровки стен в процессе расплавления (рис. 5).

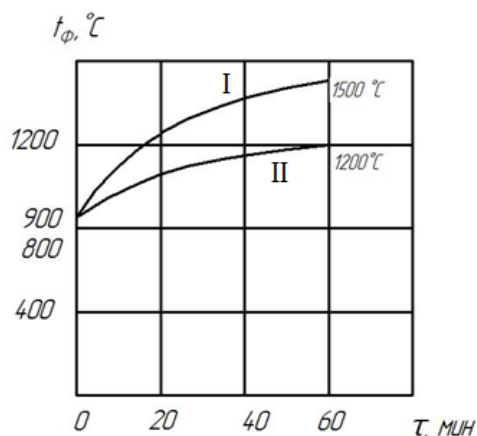


Рис. 5. Изменение температуры футеровки стен в период расплавления шихты по способам: I – традиционному; II – предлагаемому

Процесс плавания протекает с уменьшением времени плавания без изменения вводимой мощности, так как расплавление кусков металла меньшего размера осуществляется быстрее расплавления кусков металла большего размера.

Средневзвешенный КПД дуги ДСП-6 в период расплавления за режимы с А по В составляет для традиционной шихты 0,57, а для предлагаемой шихты 0,6. КПД дуги при плавке шихты размерами не более $200 \times 150 \times 100$ мм возрастает на 5 % по отношению к плавке традиционной шихты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энергоэффективность работы ДСП малой вместимости 0,5–12 т фасонно-литейных цехов определяет стоимость производимой продукции, которая нужна промышленным предприятиям России.

Удельный расход электроэнергии у фасонно-литейных печей в период расплавления составляет 475–650 кВт·ч/т, а средний КПД дуг – 0,57, что связано с габаритными параметрами этих печей (малым расстоянием между осью электрода и стеной печи – 0,31–0,85 м) и разрешенными максимальными габаритами кусков загружаемого лома $800 \times 500 \times 500$ мм. В связи с этим через пустоты в шихте потоки теплового излучения от дуг достигают футеровки стен, что подтверждено быстрым ростом ее температуры в период расплавления.

В результате исследования установлено, что уменьшение габаритов кусков загружаемого лома приводит к снижению удельного расхода электроэнергии: на ДСП-100 ЧерМК при завалке тяжеловесного лома установлен расход 429 кВт·ч/т, а при завалке лома средней плотности – 385 кВт·ч/т; на ДСП-180 ОАО «ММК» на ломе с габаритами $800 \times 500 \times 500$ мм установлен расход 310 кВт·ч/т, а на ломе с габаритами $600 \times 500 \times 500$ мм – 278 кВт·ч/т.

Переход на габариты загружаемой шихты не более $200 \times 150 \times 100$ мм для печей малой вместимости ДСП-0,5–ДСП-12 обеспечит снижение расхода электроэнергии в период расплавления и повысит КПД дуги. Процесс плавки протекает с уменьшением времени без изменения вводимой мощности, так как расплавление кусков металла меньшего размера осуществляется быстрее расплавления кусков металла большего размера. Сокращение времени плавки также связано со снижением бесполезного теплового излучения дуг на футеровку стен печи через пустоты в шихте и с повышением полезного теплового излучения дуг на шихту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А.Н. Расчет и анализ взаимосвязи КПД и расположения дуг с электропотреблением в дуговых сталеплавильных печах малой и большой вместимости. Часть I. Расчет и анализ взаимосвязи КПД дуг и электропотребления // *Металлург*. 2019. № 4. С. 29–35.
2. Макаров А.Н. Расчет и анализ взаимосвязи КПД и расположения дуг с электропотреблением в дуговых сталеплавильных печах малой и большой вместимости. Часть II. Расчет и анализ взаимосвязи расположения дуг, стен и электропотребления // *Металлург*. 2019. № 5. С. 21–27.
3. Макаров А.Н., Окунева В.В., Кузнецов А.В. Влияние высоты слоя шлака, состава газа, емкости печей на КПД дуг и теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Влияние высоты слоя шлака и емкости печи на КПД дуг // *Металлург*. 2020. № 10. С. 11–18.
4. Макаров А.Н. Влияние емкости, расстояния от дуг до стен на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах // *Вестник Тверского государственного*

технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 72–81.

5. Кузнецов А.В. Разработка методики расчета КПД дуг и повышение энергоэффективности малотоннажных дуговых сталеплавильных печей: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2020. 154 с.

6. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.

7. Сойфер В.М. Выплавка стали в кислых электропечах. М.: Машиностроение, 2009. 480 с.

8. Патент РФ 2767318, МПК C21C 5/52. *Способ плавки стали в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока фасонно-литейного цеха* / Макаров А.Н., Крупнов А.В., Окунева В.В. Заявл. 11.03.2020. Опубл. 17.03.2022, Бюл. № 8.

9. Павлов В.В., Ивин Ю.А., Пехтерев С.В., Мацко И.И., Логунова О.С. Влияние фракционного состава металлолома на показатели работы дуговой сталеплавильной печи. // *Электрометаллургия*. 2011. № 11. С. 2–6.

10. Протасов А.В., Пасечник Н.В., Сивак Б.А. Электрометаллургические мини-заводы. М.: Metallurgizdat, 2013. 420 с.

11. Тулуевский Ю.Н., Зинуров И.Ю., Попов А.Н., Галкин В.С. Экономия электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах. М.: Энергоатомиздат, 1987. 102 с.

12. Поволоцкий Д.Я., Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю. Устройство и работа сверхмощных дуговых сталеплавильных печей. М.: Metallurgiya, 1990. 174 с.

13. Электрометаллургия стали и ферросплавов / под ред. Д.Я. Поволоцкого. М.: Metallurgiya, 1984. 568 с.

14. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

КРУПНОВ Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

ОКУНЕВА Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: bukashka_89@inbox.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н., Крупнов А.В., Окунева В.В. Способ повышения энергоэффективности выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока фасонно-литейного производства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 58–66.*

**A METHOD FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY
OF STEEL SMELTING IN ARC STEELMAKING FURNACES
OF THREE-PHASE CURRENT OF SHAPED CASTING PRODUCTION**

A.N. Makarov, A.V. Krupnov, V.V. Okuneva
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This article discusses the problem of higher specific power consumption in low-capacity arc steelmaking furnaces of shaped foundry production compared with large-capacity furnaces. The influence of the dimensions of the loaded scrap metal on the energy consumption during its melting is explained. A transition to scrap dimensions in a charge of no more than $200 \times 150 \times 100$ mm is proposed as a way to reduce energy consumption for steel smelting in low-tonnage arc furnaces and its justification is given.

Keywords: electric arc furnace, power consumption, charge, lining temperature, energy efficiency improvement.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

OKUNEVA Victoria Valeryevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: bukashka_89@inbox.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N., Krupnov A.V., Okuneva V.V. A method for increasing the energy efficiency of steel smelting in arc steelmaking furnaces of three-phase current of shaped casting production // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 58–66.