

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ СЛОЯ ШЛАКА НА КПД ДУГ И РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

*А.Н. Макаров*

*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2020

**Аннотация.** Исследовано влияние высоты слоя шлака во всем номенклатурном ряде дуговых сталеплавильных печей (емкостью от 0,5 до 120 тонн) на КПД дуг и удельный расход электроэнергии в печах. Установлено, что с ростом высоты слоя шлака КПД дуг в малотоннажных и большегрузных печах возрастает и достигает 78...80 % при полном погружении дуг в шлак, а удельный расход электроэнергии уменьшается. При увеличении высоты слоя шлака и увеличении КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии в печах снижается на 0,75...1,0 %.

**Ключевые слова:** электрическая дуга, сталь, печь, теплообмен, энергосбережение.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2020-4-66-72**

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в высокомоощных большегрузных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) большую часть времени расплавления шихты дуги горят на ванну металла, покрытую толстым слоем шлака, для чего используют инжекторы угольного порошка и кислород для вспенивания шлака. В результате вспенивания высота слоя шлака в большегрузных ДСП может достигать 400...500 мм. В печах малой вместимости инжекторы для вспенивания шлака не используют, высота слоя шлака невелика и составляет 40 мм в ДСП-6. Проведено исследование влияния высоты слоя шлака в дуговых сталеплавильных печах всего ряда вместимостей от 0,5 до 120 тонн на КПД дуг и удельный расход электроэнергии в печах.

### РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КПД ДУГ В 6- И 120-ТОННЫХ ДСП

По методике расчета КПД дуг [1] вычислили и исследовали влияние высоты слоя шлака  $h_{ш}$ , высоты заглубления дуги в металл  $h_m$  и шлак:  $h_3 = h_m + h_{ш}$ , на КПД дуг в дуговых сталеплавильных печах вместимостью 6 и 100 тонн (ДСП-6 и ДСП-100). Результаты расчета представлены на рис. 1, где график I характеризует изменение КПД дуг в зависимости от отношения высоты заглубления дуги к длине дуги:  $\eta_d = h_3/l_d$ , в ДСП-100; график II – изменение КПД:  $\eta_d = f(h_3/l_d)$ , в ДСП-6.

В ДСП-100 используются инжекторы для вспенивания шлака. Как видно из графика I на рис. 1, с ростом высоты слоя шлака и высоты заглубления дуги в шлак в ДСП-100 КПД дуги увеличивается неравномерно. При напряжении на дуге 280 В [2] и длине дуги 325 мм рост высоты слоя шлака от 0 до 195 мм, при которой  $h_3/l_d = 0,6$ , малоэффективен, так как КПД дуги возрастает лишь на 8 % (с 0,45 до 0,49). Дальнейшее увеличение высоты слоя шлака в печи ДСП-100 с 195 до 325 мм, при которой  $h_3/l_d = 1,0$ , приводит к возрастанию КПД дуги на 35 % (с 0,49 до 0,75). С увеличением слоя шлака возрастает КПД дуг и уменьшается удельный расход электроэнергии ( $G_э$ ) [3–15], который в ДСП-100 составляет 385 кВт·ч/т при расплавлении твердой шихты.

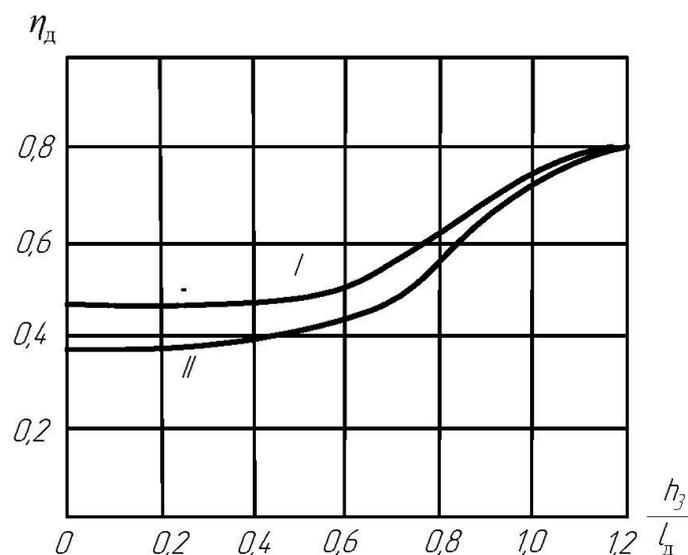


Рис. 1. Зависимость КПД дуг печей ДСП-100 (I), ДСП-6 (II) от заглубления дуг в ванну металла и шлак

Результаты расчета КПД дуг подтверждены экспериментальными исследованиями на ДСП-120 ОАО «Уральская сталь» [16]. Металлошихта, загружаемая в ДСП-120, состояла из 60 % металлолома и 40 % жидкого чугуна. На опытных плавках вспенивание шлака проводили вдуванием углеродосодержащего материала с помощью инжекторов и присадкой коксовой мелочи через отверстие в своде. Анализировали изменение технико-экономических показателей работы ДСП в зависимости от толщины вспененного шлака. Из результатов исследования [16] следует, что при увеличении высоты слоя шлака с 238 до 356 мм удельный расход электроэнергии снизился с 260 до 203 кВт·ч/т жидкой стали, что объясняется уменьшением тепловых потерь дуг, повышением КПД дуг вследствие увеличения экранирования излучения дуг шлаком.

Так как параметры дуг ДСП-100, ДСП-120 близкие, то воспользуемся графиком I на рис. 1 для определения КПД дуг печи ДСП-120 ОАО «Уральская сталь». При  $h_3 = 238$  мм и  $l_d = 325$  мм  $h_3/l_d = 0,73$ , из рис. 1 график I следует  $\eta_d = 0,55$ ,  $G_3 = 260$  кВт·ч/т. При  $h_3 = 356$  мм  $h_3/l_d = 1,1$ , по графику I определяем  $\eta_d = 0,77$ ,  $G_3 = 203$  кВт·ч/т. При увеличении высоты слоя шлака с 238 до 356 мм КПД дуг увеличился с 0,55 до 0,77, т. е. на 29 %, а удельный расход электроэнергии снизился с 260 до 203 кВт·ч/т, т. е. на 22 %.

Таким образом, расчетными и экспериментальными данными подтверждено, что между КПД дуг и удельным расходом электроэнергии существует обратно пропорциональная связь: при каждом увеличении КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии печью уменьшается на 0,75...1 %. Из рис. 1 следует, что достичь КПД дуг больше 0,78...0,8 практически невозможно, так как при дальнейшем увеличении высоты слоя шлака и достижении  $h_3/l_d = 1,2...1,4$  КПД дуг достигает максимума  $\eta_d = 0,8$  и далее остается практически неизменным, что объясняется электромагнитным выдуванием дуг. Под воздействием электромагнитного поля дуга выбрасывает из углубления металл, шлак, при этом экранирующее действие шлака снижается и дуга излучает 20 % своей мощности в верхнюю часть объема печи, на водоохлаждаемые панели стен, свода. При полностью погруженной в металл и шлак дуге вследствие ее электромагнитного выдувания 20 % мощности дуги излучается в свободное пространство печи и поглощается внутрипечными газами и водой стеновых и сводовых панелей и уносится из печи (тепловые потери).

На рис. 1 график II характеризует изменение КПД дуг в зависимости  $\eta_d = f(h_3/l_d)$  в ДСП-6. В ДСП-6 расстояние от дуг до стен 0,69 м (в 3 раза меньше по сравнению с ДСП-100), что сказывается на КПД дуг, который в ДСП-6 изменяется от  $\eta_d = 0,35$  при отсутствии шлака (на 24 % меньше КПД дуги печи ДСП-100) до  $\eta_d = 0,42$  при  $h_3/l_d = 0,6$ .

В ДСП-6 устройства для вспенивания шлака отсутствуют, высота слоя шлака составляет 35...40 мм и дуги длительное время плавки работают с параметрами  $h_3/l_d = 0,4...0,8$  и низким КПД  $\eta_d = 0,38...0,55$ , в результате чего в ДСП-6 возрастает расход электроэнергии до 475 кВт·ч/т на расплавление шихты и до 750 кВт·ч/т за плавку.

При использовании в ДСП-6 устройства для вспенивания шлака и повышении в результате вспенивания шлака среднего за период расплавления и за плавку в целом КПД дуг на 15 % до  $\eta_{dc} = 0,67$  можно сократить удельный расход электроэнергии на расплавление и за плавку в целом на  $[15\% (0,75...1,0)] = 11...15\%$ , так как при каждом увеличении КПД дуги на 1 % удельный расход электроэнергии сокращается на  $0,75...1\%$ . Таким образом, при использовании в ДСП-6 устройств для вспенивания шлака и заглужении дуг в шлак до значения  $h_3/l_d = 0,9...1,0$  можно снизить в ДСП-6 удельный расход электроэнергии на расплавление ( $G_{\text{рп}}$ ) и за плавку в целом ( $G_3$ ) до значений:

$$G_{\text{рп}} = 475 (0,89...0,85) = 423...404 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т};$$

$$G_3 = 750 (0,89...0,85) = 667...638 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}.$$

На практике при рассмотрении вопроса о целесообразности использования на малотоннажных печах устройств для вспенивания шлака анализируются капиталовложения на газоочистку, количество простоев печи, влияние вдувания кислорода и углеродосодержащего материала на повышение угара дорогостоящих легирующих элементов (хрома, молибдена, ванадия и других) на качество готового металла.

### **РАСЧЕТ И АНАЛИЗ КПД ДУГ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ДСП**

Рассчитали средний КПД дуг за период расплавления ДСП (вместимостью от 0,5 до 120 тонн) и сравнили со статическими данными об удельном расходе электроэнергии в действующих дуговых сталеплавильных печах [1–11, 15, 16]. По расчетным данным построили зависимость удельного расхода электроэнергии  $G_3$  на расплавление от расстояния от дуг до стен  $r_{\text{ст}}$  и вместимости печей  $G$ . Зависимость  $G_3 = f(r_{\text{ст}}, G)$  носит линейный характер до значения расстояния от дуг до стен в печи ДСП-6  $r_{\text{ст}} = 0,69$  м, после которого удельный расход электроэнергии резко возрастает (рис. 2).

Причины большого удельного расхода электроэнергии в малотоннажных печах по сравнению с большегрузными печами следующие. В большегрузных ДСП-100, ДСП-120 расстояние от дуг до стен 2...2,5 м. В процессе прорезки колодцев и горения дуг в колодцах в период расплавления шихты тепловое излучение дуг при горизонтальном слое шихты 2...2,5 м не достигает стен и тепловое излучение дуг полезно расходуется на расплавление шихты и нагрев ванны металла.

В печах ДСП-0,5...ДСП-6 расстояние от дуг до стен очень маленькое:  $r_{\text{ст}} = 0,31...0,69$  м, и в процессе прорезки колодцев и горения дуг в колодцах часть теплового излучения дуг, проходя через полости между кусками шихты, достигает футеровки стен, вызывая нагрев огнеупоров, КПД дуг снижается, удельный расход электроэнергии увеличивается.

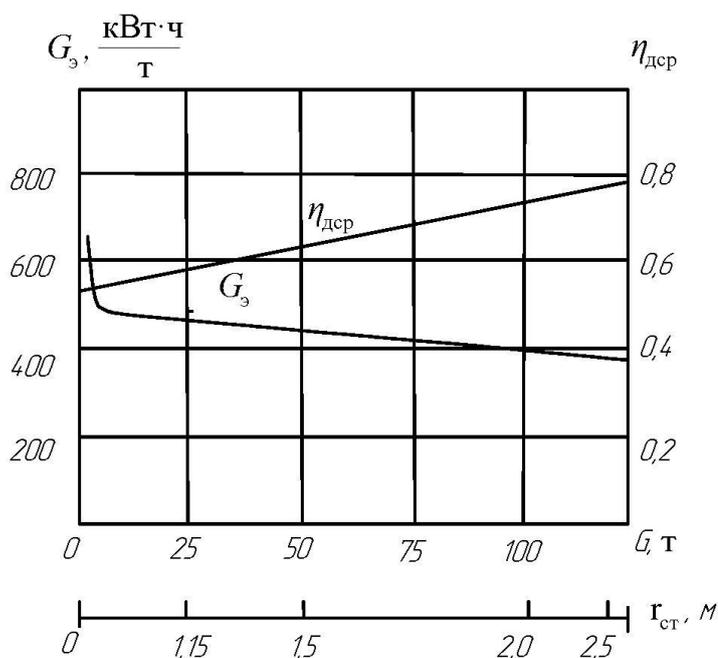


Рис. 2. Зависимость удельного расхода электроэнергии на расплавление и среднего за период расплавления КПД дуг от расстояния от дуг до стен и вместимости печей

Средний КПД дуг и удельный расход электроэнергии печей (см. рис. 2) в ДСП-120  $\eta_{дсп} = 0,78$ ,  $G_3 = 375$  кВт·ч/т; ДСП-6  $\eta_{дсп} = 0,57$ ,  $G_3 = 475$  кВт·ч/т. Зависимость  $\eta_{дсп} = f(r_{ст}, G)$  носит линейный характер. У ДСП-6 КПД дуг меньше, чем у ДСП-120 на 27 % (так как  $0,57/0,78 = 0,73$ ). В результате снижения среднего за период расплавления КПД дуг в ДСП-6 на 27 % по сравнению с средним КПД дуг ДСП-120 удельный расход электроэнергии на расплавление  $\Delta G_3$  в ДСП-6 увеличивается на 27 %, так как  $\Delta G_3 = 475/375 = 1,27$ .

Ранее линейная зависимость удельного расхода электроэнергии и КПД дуг, высоты слоя шлака подтверждена экспериментальными исследованиями на ДСП-120 ОАО «Уральская сталь» [10]: при каждом увеличении КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии печью уменьшался на 0,75...1,0 %. Современные ДСП-100, оснащенные устройствами для вспенивания шлака, современными устройствами автоматизации, работают со средним за плавку КПД дуг  $\eta_{дс} = 0,74...0,78$ , имеют удельный расход электроэнергии  $G_3 = 360...385$  кВт·ч/т.

Показатели КПД дуг и удельного расхода электроэнергии у других печей следующие: ДСП-50  $\eta_{дс} = 0,63...0,65$ ,  $G_3 = 420$  кВт·ч/т; ДСП-25  $\eta_{дс} = 0,59...0,62$ ,  $G_3 = 440$  кВт·ч/т; ДСП-12  $\eta_{дс} = 0,57...0,60$ ,  $G_3 = 450$  кВт·ч/т. Данные эксплуатационные показатели дуговых сталеплавильных печей подтверждают линейную зависимость удельного расхода электроэнергии от расчетного КПД дуг печей, подтверждают правильность расчетов КПД дуг ДСП.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными аналитическими исследованиями установлено, что с увеличением высоты слоя шлака от 0 до 325 мм в 100-тонных ДСП КПД дуг возрастает с 0,45 до 0,75. С ростом высоты слоя шлака и высоты заглубления дуги в шлак КПД дуг в малотоннажных и большегрузных печах возрастает и достигает при полном погружении дуг в шлак 78...80 %, а удельный расход электроэнергии с ростом высоты слоя шлака, с ростом КПД дуг уменьшается. Аналитические исследования подтверждают экспериментальные исследования на 120-тонной ДСП ОАО «Уральская сталь»: при увеличении высоты слоя

шлака и КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии печью уменьшался на 0,75...1,0 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makarov A.N. Effect of the Architecture on Energy Efficiency of Electric Arc Furnaces of Conventional and Consteel Designs // *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. № 9, pp. 882–891. DOI: 10.1007/s11015-019-00743-9.
2. Makarov A.N. Calculation and Analysis of Energy Parameters of Meltings in EAFs of Conventional and Consteel Design // *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. № 9-10, pp. 974–978. DOI: 10.1007/s11015-019-00733-x.
3. Макаров А.Н. Влияние конструктивного исполнения на энергоэффективность дуговых сталеплавильных печей обычной конструкции и Consteel // *Металлург*. 2018. № 9. С. 30–36.
4. Макаров А.Н. Расчет и анализ энергетических параметров плавок в дуговых сталеплавильных печах обычной конструкции и Consteel // *Металлург*. 2018. № 10. С. 13–15.
5. Евстратов В.Г., Киселев А.Д., Зинуров И.Ю. [и др.]. Особенности тепловой работы электропечи ДСП-120 Consteel на Ашинском металлургическом заводе // *Электрометаллургия*. 2012. № 8. С. 2–6.
6. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
7. Огороков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
8. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
9. Сойфер В.М. Выплавка стали в кислых электропечах. М.: Машиностроение, 2009. 480 с.
10. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
11. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг горящих в парах металлов // *Электрометаллургия*. 2009. № 11. С. 19–24.
12. Волохонский Л.А. Вакуумные дуговые печи. М.: Энергоатомиздат, 1985. 232 с.
13. Лесков Г.И. Электрическая сварочная дуга. М.: Машиностроение, 1970. 335 с.
14. Тиходеев Г.М. Энергетические свойства электрической сварочной дуги. М.: АН СССР, 1961. 236 с.
15. О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглубливание в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах / Макаров А.Н [и др.] // *Промышленная энергетика*. 2014. № 1. С. 10– 95.
16. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали в дуговой печи / Кузнецов М.С.[и др.]. // *Электрометаллургия*. 2010. № 2. С. 2–6.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*МАКАРОВ Анатолий Николаевич* – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Влияние высоты слоя шлака 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. 66–72.

---

# INFLUENCE OF THE HEIGHT OF THE SLAG LAYER ON THE EFFICIENCY OF ARCS AND ELECTRICITY CONSUMPTION IN EAF

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

**Abstract.** Investigated the influence of the height of the slag layer in the nomenclature row EAFs, with a capacity from 0.5 to 120 tons, on the efficiency of arcs and specific power consumption in the furnaces. It was found that with an increase in the height of the slag layer, the efficiency of arcs in low-tonnage and heavy-duty furnaces increases and reaches 78...80 % when the arcs are completely immersed in the slag, and the specific power consumption decreases. With an increase in the height of the slag layer and an increase in the efficiency of arcs by 1%, the specific power consumption in the furnaces decreases by 0.75...1.0 %.

**Keywords:** electric arc, steel, furnace, heat exchange, energy saving.

## REFERENCES

1. Makarov A.N. Effect of the architecture on energy efficiency of electric arc furnaces of conventional and Consteel designs. *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. № 9, pp. 882–891. DOI: 10.1007/s11015-019-00743-9.
2. Makarov A.N. Calculation and analysis of energy parameters of meltings in EAFs of conventional and Consteel design. *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. № 9-10, pp. 974–978. DOI: 10.1007/s11015-019-00733-x.
3. Makarov A.N. Influence of design on energy efficiency of EAF of conventional design and Consteel. *Metallurg*. 2018. № 9, pp. 30–36.
4. Makarov A.N. Calculation and analysis of energy parameters of smelting in EAF of conventional design and Consteel. *Metallurg*. 2018. № 10, pp. 13–15.
5. Evstratov V.G., Kiselev A.D., Zinurov I.Yu. [at al.]. Features of thermal operation of the an electric furnace EAF-120 Consteel at the Ashinsky Metallurgical Plant. *Electrometallurgy*. 2012. № 8, pp. 2–6.
6. Nikolsky L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N. Thermal work of EAF. M.: Metallurgy, 1981. 344 p.
7. Okorokov N.V. EAF. M.: Metallurgy, 1971. 347 p.
8. Egorov A.V. Electrosmelting furnaces of ferrous metallurgy. M.: Metallurgy, 1985. 280 p.
9. Soifer V.M. Smelting steel in acidic electric furnaces. M.: Mechanical engineering, 2009. 480 p.
10. Makarov A.N. Heat exchange in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants. St. Petersburg: Lan, 2014. 384 p.
11. Makarov A.N., Sokolov A.Yu. Electrical, geometric, thermal parameters of arcs burning in metal vapors. *Electrometallurgy*. 2009. № 11, pp. 19–24.
12. Volokhonsky L.A. Vacuum arc furnaces. M.: Energoatomizdat, 1985. 232 p.
13. Leskov G.I. Electric welding arc. M.: Mechanical Engineering, 1970. 335 p.
14. Tikhodeev G.M. Energy properties of electric welding arc. M.: USSR Academy of Sciences, 1961. 236 p.
15. Makarov A.N., Kuznetsov A.V., Rybakova V.V. [at al.]. On influence of electrode shape and arc parameters on its deepening into metal bath in EAF. *Industrial energy*. 2014. № 1, pp. 10–95.
16. Kuznetsov M.S., Yakushev E.V., Kulagin S.A. [at al.]. Influence of metal charge weight and slag thickness on steel smelting technology in arc furnace. *Electrometallurgy*. 2010. № 2, pp. 2–6.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*MAKAROV Anatoly Nikolaevich* – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Makarov A.N. Influence of the height of the slag layer on the efficiency of arcs and electricity consumption in electric arc furnace // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2020. No. 4 (8), pp. 66–72.