

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ШЛАКА И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЫДУВАНИЯ НА КПД ДУГ В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

В статье рассмотрены основные причины тепловых потерь излучением и возможности их уменьшения в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока. По результатам исследования представлена зависимость КПД дуги от высоты слоя шлака. Выявлена зависимость КПД дуги от электрического режима и соотношения заглубления дуги в металл и шлак к длине дуги.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрическая дуга, заглубление, электромагнитное выдувание.

ВВЕДЕНИЕ

С разработкой авторами методики расчета КПД дуг появилась возможность анализировать влияние толщины слоя шлака на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах (ДСП).

В дуговой сталеплавильной печи в начале и середине периода плавления шихты электрические дуги экранируются ломом. По мере расплавления металлошихты происходит открытие дуг, что вызывает интенсивное облучение стен и свода. Электрические дуги образуют в расплаве мениск и частично погружаются в него, однако этого недостаточно для экранирования электрических дуг. Поэтому на современных ДСП для уменьшения тепловых потерь излучением электрической дуги на стены и свод, а также увеличения срока службы водоохлаждаемых панелей используют экранирование электрических дуг вспененным шлаком [1]. Использование устройств для вспенивания шлака позволяет достичь высокого КПД дуг и низкого удельного расхода электроэнергии на печах [2]. Толщина слоя шлака в печах трёхфазного тока (ДСПТТ), как и в дуговых сталеплавильных печах постоянного тока (ДСПСТ) вместимостью 150 т, составляет 250-500 мм.

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ

Проведённые нами расчеты для ДСП-100 показали, что при увеличении высоты шлака на 28% до $h_{ш} = 450$ мм, при которой отношение высоты заглубления h_3 к длине дуги l_d составляет $h_3/l_d = 1,2$ и торец электрода находится на 100 мм ниже уровня шлака, КПД дуги увеличивается на 6% $\eta_d = 0,73$. При $h_{ш} = 550$ мм, $h_3/l_d = 1,4$, $\eta_d = 0,76$, при $h_{ш} = 100$ мм, $h_3/l_d = 0,5$, $\eta_d = 0,51$. При отсутствии шлака $h_{ш} = 0$, $h_3/l_d = 0,3$, $\eta_d = 0,47$. Результаты расчетов сведены в таблицу.

По данным таблицы построен график $\eta_d = f(h_3/l_d)$ (рис. 1). Как видно из рис. 1 и данных таблицы, при отсутствии шлака КПД дуги низкий $\eta_d = 0,47$, с ростом высоты шлака КПД дуги увеличивается и принимает предельное значение $\eta_d = 0,76$ при высоте шлака $h_{ш} = 550$ мм, оставаясь практически неизменным при дальнейшем увеличении высоты шлака. Таким образом, вследствие выдувания дуги в высокомошных

ДСПТТ достичь КПД дуги выше 0,76 практически невозможно, так как дуга выбрасывает из углубления шлак, металл и выходит в конце полупериода протекания тока на поверхность жидкометаллической ванны, излучая около одной четвертой своей мощности в объем печи, заполненный газом, и на водоохлаждаемые панели стен и свода. При полностью погруженной в металл и шлак дуге вследствие электромагнитного выдувания 24% мощности дуги излучается в свободное пространство, поглощается внутрипечными газами и водой стеновых и сводовых панелей и уносится из печи в виде потерь.

На рис. 1 изображены результаты аналитического исследования влияния электромагнитного выдувания и высоты слоя шлака на КПД дуг. С увеличением высоты слоя шлака КПД дуг увеличивается.

Зависимость КПД дуги от высоты слоя шлака в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока

l_d , мм	$h_{ш}$, мм	h_3 , мм	h_3/l_d	η_d
500	0	150	0,3	0,47
500	100	250	0,5	0,51
500	350	500	1,0	0,67
500	450	600	1,2	0,73
500	550	700	1,4	0,76

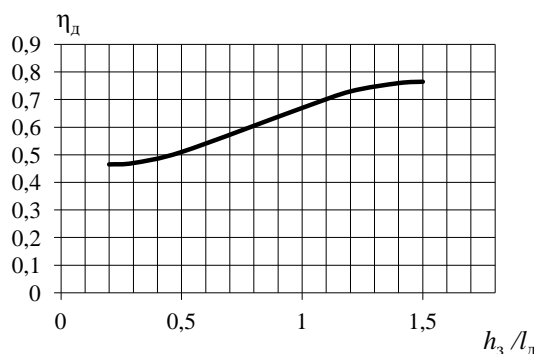


Рис. 1. Зависимость КПД дуги от отношения высоты заглубления дуги в металл и шлак к длине дуги для печи ДСП-100, $U_d = 500$ В, $I_d = 50$ кА

Большую часть жидкого периода плавки высокомошные ДСП работают с КПД дуги $\eta_d = 0,57-0,69$. При высоте шлака в высокомошных дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока $h_{ш} = 450-550$ мм мож-

но достичь предельного КПД дуги $\eta_d = 0,73-0,76$, дальнейшее увеличение высоты шлака не приводит к увеличению КПД дуги и снижению удельного расхода электроэнергии.

Результаты аналитического исследования КПД дуг подтверждены экспериментальными исследованиями на 120-т ДСП в ОАО «Уральская сталь» [3]. 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 от толщины вспененного шлака. Из результатов исследования [3] следует, что при увеличении высоты слоя шлака с 238 до 356 мм расход электроэнергии снизился с 260 до 203 кВт·ч/т жидкой стали, что объясняется уменьшением тепловых потерь дуги, повышением КПД дуги вследствие увеличения толщины шлака и улучшения экранирования излучения дуги шлаком.

Анализ электромагнитных сил в дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока показал, что на дугу воздействуют две электромагнитные силы – осевая F_1 и отклоняющая F_2 . Осевая электромагнитная сила оказывает положительное влияние на теплообмен, так как под действием осевой силы дуга горит соосно с электродом, погружается в металл и шлак, и полезная мощность, усваиваемая металлом, и КПД дуги увеличиваются [4]. Отклоняющая электромагнитная сила оказывает отрицательное влияние на теплообмен, так как под действием отклоняющей силы дуга выдувается из-под электрода в сторону стенок, ее излучение в свободное пространство увеличивается, а на металл и шлак уменьшается, полезная мощность и КПД дуги уменьшаются. Из осуществленного анализа следует, что для повышения КПД дуг необходимо уменьшить или устранить отклоняющую электромагнитную силу, которую создает ток, протекающий горизонтально по ванне металла.

Электромагнитное выдувание можно уменьшить, изменив электрический режим печи. Исследование влияния электромагнитного выдувания и заглабления дуг в металл и шлак на коэффициент полезного действия дуги было проведено на ДСП 100-150-т. Диапазон изменения напряжения на дуге составлял от 150 до 500 В, ток дуги от 40 до 60 кА. Результаты расчета зависимости КПД дуг от соотношения высоты заглабления дуги к длине дуги и электрического режима приведены на **рис. 2**. Как видно из этого рисунка, чем больше соотношение высоты заглабления дуги к длине дуги, тем больше КПД дуги. Электрический режим влияет на КПД дуги следующим образом. В первом электрическом режиме дуга короче, ток дуги больше, восстанавливающая электромагнитная сила больше и дуга меньше выдувается из-под электрода. Во втором электрическом режиме дуга длиннее, ток дуги меньше, восстанавливающая сила меньше и дуга далеко выдувается из-под электрода, ее излучение на стены и свод возрастают (**рис. 3**). Потери мощности во втором случае выше.

Как видно из **рис. 2, 3**, чем больше соотношение h_3/l_d , тем больше дуга заглаблена в металл и шлак, больше доля мощности дуги, усваиваемая металлом, и тем меньше мощности излучения дуги выходит наружу

из заглабления в металле и шлаке, тем меньше потери мощности дуги. И наоборот, чем меньше соотношение h_3/l_d , тем меньше дуга заглаблена в металл и шлак, меньше излучение дуги на металл и больше мощности излучения дуги выходит наружу из заглабления в металле и шлаке, тем больше потери мощности дуги.

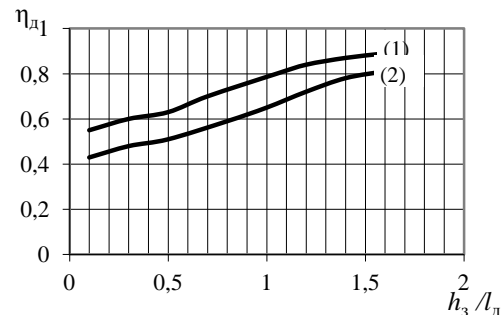


Рис. 2. Зависимость КПД дуги (η_d) от соотношения высоты заглабления к длине дуги и электрического режима: 1 – $U_d = 200$ В, $I_d = 60$ кА; 2 – $U_d = 500$ В, $I_d = 50$ кА

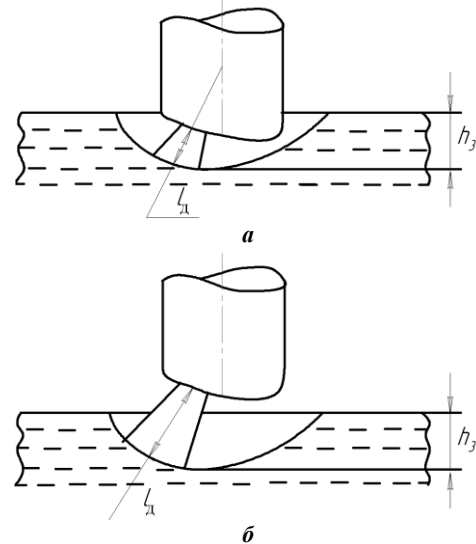


Рис. 3. Внешний вид (разрез) углубления в металле, дуги, электрода для двух электрических режимов:
 а – $I_d = 60$ кА, $U_d = 200$ В, $h_3/l_d = 1,5$, $l_d = 200$ мм, $h_3 = 300$ мм, $h_{ш} = 120$ мм, $\eta_d = 0,86$;
 б – $I_d = 50$ кА, $U_d = 500$ В, $h_3/l_d = 1,2$, $l_d = 500$ мм, $h_3 = 600$ мм, $h_{ш} = 450$ мм, $\eta_d = 0,75$

В результате выполненных нами расчетов выявлена зависимость КПД дуги от электрического режима и соотношения заглабления дуги в металл и шлак к длине дуги: чем больше это соотношение, тем больше КПД дуги. При превышении высотой заглабления длины дуги в 1,5 раза КПД дуги равен 80-86%, при равенстве высоты заглабления и длины дуги КПД дуги – 65-78%, при превышении длины дуги высоты заглабления на 25% КПД дуги – 45-55% [4].

Проведенными исследованиями установлено, что вследствие электромагнитного выдувания в дуговых сталеплавильных печах трехфазного тока достичь КПД дуги равным единице практически невозможно даже при полутора-, двухкратном заглаблении дуги, то есть таком заглаблении, когда длина дуги в 1,5-2 раза меньше высоты заглабления и дуга горит ниже уровня ванны металла вследствие потерь мощности дуги на излучение, исходящее наружу из заглабления в метал-

ле. Уменьшить электромагнитное выдувание дуги из-под электрода, расход электроэнергии за плавку можно, регулируя электрический режим работы печи, однако диапазон регулирования электрического режима в современных ДСП невелик [5].

Для устранения отклоняющей электромагнитной силы необходимо, чтобы ток на всем пути электрод, дуга, ванна жидкого металла не менял своего направления, то есть чтобы ось тока в ванне металла совпадала с осью электрода. Такой путь тока существует в дуговых сталеплавильных печах постоянного тока с двумя электродами, одним сводовым графитовым и одним водоохлаждаемым подовым, установленным соосно с графитовым электродом. В этих печах путь тока по ванне металла вертикальный и отклоняющая электромагнитная сила отсутствует. Вертикального направления тока в ванне металла ДСПТТ можно достичь при питании дуг от трех независимых фазных цепей и установке трех подовых электродов таким образом, чтобы их оси симметрии совпадали с осями симметрии трех графитовых электродов [6]. Зарегистрирован способ плавки стали в ДСП тремя вертикальными дугами с их заглублением в жидкий металл [7] и независимым питанием от трех независимых фазных цепей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика расчета КПД дуг позволяет анализировать влияние толщины слоя шлака на КПД дуг и расход электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах. В современных ДСП даже при полно-

стью погруженных дугах в шлак в результате излучения дуг в свободное пространство и на водоохлаждаемые панели, мощность потерь дуг может составлять 30% их мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роль вспенивания шлака в оптимизации тепловой работы ДСП переменного тока / П. Поррачин, Д. Онести, А. Гроссо, Ф. Миани // *Сталь*. 2005. №44. С.84-86.
2. Кожухов А.А. Исследование роли металлургических окатышей при вспенивании шлака в современных ДСП // *Электрометаллургия*. 2012. №12. С.11-16.
3. Влияние массы металлошихты и толщины шлака на технологию выплавки стали с дуговой печи / М.С. Кузнецов, Е.В. Якушев, С.А. Кулагин, Г.И. Котельников, А.Е. Семин, К.Л. Косырев, Р.С. Кулиш // *Электрометаллургия*. 2010. №2. С. 2-6.
4. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учеб. пособие. СПб.: Издательство Лань, 2014. С.267-268.
5. Макаров А.Н., Окунева В.В., Галичева М.К. Повышение энергоэффективности электродуговых и факельных металлургических печей // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 28. С.43-48.
6. Пат. 2333438 РФ, МКИ F27B 3/08. Дуговая сталеплавильная печь трехфазного тока / А.Н. Макаров, Ю.А. Шарова, В.Ю. Галкин // *Изобретения*. 2008. №25.
7. Пат. 2368670 РФ, МКИ C21C 5/52. Способ плавки стали в дуговой сталеплавильной печи трехфазного тока / А.Н. Макаров, А.Ю. Соколов // *Изобретения*. 2009. №27.

INFORMATION IN ENGLISH

RESEARCH OF THE EFFECT OF SLAG LAYER DEPTH AND ELECTROMAGNETIC BLOWING ON ARC EFFICIENCY IN ARC STEEL MELTING FURNACES

Makarov A.N., Kuznetsov A.V.

The article discusses the main reasons causing heat losses by radiation and the opportunities to decrease them in a three phase arc steel melting furnace. According to the results of the study, the relation between the arc efficiency and the slag layer depth is presented. The investigation revealed the relation between the arc efficiency and electric regime and the ratio of arc penetration into the metal and slag to the arc length.

Keywords: Arc steel melting furnace, electric arc, penetration, electromagnetic blowing.

REFERENCES

1. Porrachin P., Onesti D., Grosso A., Miani F. Rol vspenivaniya shaka v optimizacii teplovoy raboty DSP peremennogo toka [Role of SLAG FOAMING in Optimization of Thermal Operation of AC Electric Arc Furnace]. *Steel*. 2005, no.44, pp.84-86.
2. Kozhukhov A.A. Issledovanie roli metallizirovannykh oratyshei pri vspenivaniy shlaka v sovremennykh DSP [Role of Metallized Pellets in SLAG FOAMING in Modern Arc Steelmaking Furnaces]. *Electrometallurgy*. 2012, no.12, pp.11-16.
3. Kuznetsov M.S., Yakushev E.V., Kulagin S.A., Kotelnikov

G.I., Semin A.E., Kosyrev K.L., Kulish R.S. Vliyanie massy metallosihty i tolshiny shlaka na tehnologiyu vyplavki stali v dugovoi pechi [Effect of Metal Charge Mass and SLAG Thickness on Technology of Steel Making in Arc Furnace]. *Electrometallurgy*. 2010, no.2, pp.2-6.

4. Makarov A.N. *Teploobmen v elektrodugovykh i fakelnykh metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [Heat Exchange in Electric Arc and Torch Furnaces and Metallurgical Power Plants]. Textbook. Saint-Petersburg. Publishing house "LAN". 2014, pp. 267-268.
5. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Povyshenie energoeffektivnosti elektrodugovykh i fakelnykh metallurgicheskikh pechey [Energy Efficiency Improvement of Electric Arc and Torch Furnaces]. *Vestnik of Tver State Technical University*. 2015, vol.28, pp.43-48.
6. Makarov A.N., Sharov Y.A., Galkin V.Y. *Dugovaya staleplavilnaya pech trekhfaznogo toka* [Three-phase Electric Arc Furnace]. Patent RF, no.2333438, 2008, no.25.
7. Makarov A.N., Sokolov A.Yu. *Sposob plavki stali v dugovoi staleplavilnoi pechi trekhfaznogo toka* [Method of Melting Steel in Three-phase Electric Arc Furnace] Patent RF no. 2368670 C21C 5/52, 2009, no.27.